

С 344.1и

Г-547

ЛЯП 115/4-71

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P5 - 5397



Н.Н. Говорун, И.М. Иванченко, А.С. Чвыров

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
БЕСФИЛЬМОВЫХ ИСКРОВЫХ КАМЕР

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
И АВТОМАТИЗАЦИИ

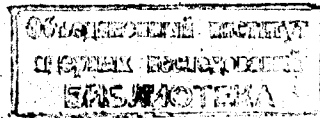
1970

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	00	00	00	00	00
0	0	0	0	00	0	0	0	0
0	0	0	0	000	00	00	00	00

P5 - 5397

Н.Н. Говорун, И.М. Иванченко, А.С. Чвыров

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
БЕСФИЛЬМОВЫХ ИСКРОВЫХ КАМЕР



Необходимым этапом экспериментального цикла^{/3/} является определение параметров и исследование технических характеристик экспериментального комплекса.

Одной из сильных сторон методики эксперимента на линии с электронно-вычислительными машинами является возможность определения в сжатые сроки характеристик системы в реальных условиях эксперимента. Такая возможность оперативного получения оценок параметров резко уменьшает длительность подготовительного этапа эксперимента и обеспечивает надежный контроль функционирования всей системы и её отдельных звеньев в процессе основного этапа проведения измерений.

В работе рассматриваются алгоритмы определения необходимых параметров системы. Исходной информацией являются наборы измеренных координат точек m_k^2 , соответствующих прямым прохождениям частиц через исследуемые камеры. Отбор таких событий реализуется за счет программных средств и специальных условий опыта, обеспечиваемых средствами экспериментального оборудования.

Один из методов отбора необходимой информации приведен в конце данной работы.

I. Определение величины, характеризующей пространственное разрешение искровых камер.

Величины координат точек траектории частицы, получаемые при помощи искровых камер, содержат ошибки, являющиеся результатом влияния многочисленных факторов.

Здесь мы не касаемся анализа причин, приводящих к ошибке в

определении траектории частицы, а рассматриваем только количественную характеристику случайных погрешностей при определении координат точек трека.

Точность искровых камер исследуем по результатам прохождения частиц через эффективные области искровых камер, число которых не меньше 3. Ниже рассматривается алгоритм определения оценки величины среднеквадратичной ошибки регистрации координаты на основании статистической выборки, объем которой определяется количеством прямых прохождений частиц через искровые камеры.

Для определенности рассмотрим способ нахождения оценки погрешности x -координаты. Определение соответствующей величины для y -координаты производится аналогично.

Обозначим искомую величину σ_x .

Рассмотрим вспомогательную величину

$$d_k = x_k - x_k^2 \quad (I)$$

Здесь

x_k^2 - измеренное значение координаты точки $m_k^2(x_k^2, z_k)$

x_k - вычисленное значение x -координаты точки $m_k(x_k, z_k)$ прямой, аппроксимирующей проекцию трека на плоскость x, z .

Легко показать, что при определении параметров прямой по методу наименьших квадратов с использованием информации о координатах точек $m_i^2 (i=1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots, n)$ величина d_k может быть представлена в виде:

$$d_k = \sum_{i=1, i \neq k}^n a_{ik} x_i^2 - x_k^2$$

Величины a_{ik} определяются формулами:

$$a_{ik} = \Delta_{ik} / \Delta,$$

где

$$\Delta_{ik} = [(n-1)]$$

$$\Delta = (n-1) \sum_{j=1}^n$$

Для отклонений Δx и соотношение:

$$d_k = \sum_{i=1}^n$$

Предположим равноискровых камер. Равнотдисперсии величин Δx_i

$$D \Delta x_i$$

Предполагая стохастическую дисперсию величин d_k и величин Δx_i :

$$D d_k$$

Отсюда искомая дисперсия

$$D x$$

а среднеквадратичная характеристика пространства

$$\sigma_x$$

Величина $D d_k$ определена

$$D d_k = (u_2)$$

где

$$u_p = \sum_{j=1}^m$$

m - общее количество рассматриваемой величины

м только количественно-определенных координат

льтатам прохождения р, число которых не ления оценки величинаты на основании ется количеством н.

ждения оценки погрешностей величины для

(I)

$n^2(x_k^2, z_k)$

точки $m(x_k, z_k)$

а на плоскость x, z .

метров прямой по мето-

дании о координатах

может быть представ-

$$\Delta_{ik} = \left[(n-1)z_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n z_j \right] z_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n z_j^2 - z_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n z_j$$

$$\Delta = (n-1) \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n z_j^2 - \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n z_j \right)^2$$

Для отклонений Δx измеренных значений от истинных получаем соотношение:

$$d_k = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n a_{ik} \Delta x_i - \Delta x_k \quad (2)$$

Предположим равноточность измерений при помощи различных искровых камер. Равноточность будем понимать в том смысле, что дисперсии величин Δx_i одинаковы для всех камер, т.е.

$$D\Delta x_i = Dx \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Предполагая стохастическую независимость величин Δx_i , вычленим дисперсию величины d_k , являющуюся линейной комбинацией случайных величин Δx_i :

$$Dd_k = Dx \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n a_{ik}^2 + 1 \right)$$

Отсюда искомая дисперсия

$$Dx = \frac{Dd_k}{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n a_{ik}^2 + 1} \quad (3)$$

а среднеквадратичная ошибка, принимаемая в качестве величины, характеризующей пространственное разрешение

$$\sigma_x = \sqrt{Dx}$$

Величина Dd_k определяется по формуле:

$$Dd_k = (u_2 - u_1^2/u_0) / u_0$$

где

$$u_p = \sum_{j=1}^m (x_{kj} - \bar{x}_{kj})^p, \quad p = 0, 1, 2$$

m - общее количество событий - прямых прохождений. Для получения рассматриваемой величины отбираются события, для которых

величины $(x_{kj} - x_{kj}^2)$ удовлетворяют критерию:

$$\Delta_{min} \leq (x_{kj} - x_{kj}^2) < \Delta_{max}$$

Значения Δ_{min} , Δ_{max} уточняются на основании статистического ряда распределения (см. рис. 1) величины $(x_{kj} - x_{kj}^2)$. Для случая $n > 3$ используется дополнительный критерий: проводимая прямая должна хорошо аппроксимировать экспериментальные точки.

Рассмотрим частный случай применения описанного выше алгоритма, когда имеется минимальное количество искровых камер ($n=3$). Возьмем для определенности $K=3$. При таких условиях формула имеет вид:

$$Dx = \frac{Dd_3}{2 \left[\left(\frac{z_3 - z_1}{z_2 - z_1} \right)^2 - \frac{z_3 - z_1}{z_2 - z_1} + 1 \right]} \quad (4)$$

Такая же, по существу, формула получена в работе [4].

Для случая равноотстоящих камер и монотонной последовательности z_i получаем следующую простую формулу:

$$Dx = \frac{Dd_3}{6}$$

В некоторых работах в качестве оценки погрешности искровых камер принимается оценка стандартного отклонения измеренных точек от аппроксимирующей прямой. Это приводит к систематическому смещению оценки погрешности и зависимости этой оценки от расстояния между камерами. При таком методе делается следующее предположение:

$$Dx = Ddk.$$

Из формулы (3) следует, что имеет место строгое неравенство:

$$Dx < Ddk.$$

В том случае, когда при определении параметров аппроксимирующей

щей прямой по методу
ция о координатах все

$$Dx = \frac{Dd_3}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}$$

где

$$d'_k = \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}$$

$$a'_{ik} = \Delta$$

$$\Delta'_{ik} = [n$$

$$\Delta' = n \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}$$

Для рассмотренног

$z_3 - z_2 = z_2 - z_1$) име

D

Отметим, что для
таточно расположить и
проходил через эффек
систему координат был
при этом параметры пр
На рис. 1 показан
мой через точки, заре
Спектрометр, включав
исследования K^0 -мезон
(г.Серпухов).

ив:

основании статисти-
чны $(x_{kj} - x_{kj}^2)$.

критерий: проводимая
ментальные точки.

санного выше алгорит-

овых камер ($n=3$).

влиях формула имеет

(4)

оте/4/.

ной последовательнос-

ости искровых камер

меренных точек от

матическому смещению

от расстояния между

предположение:

строгое неравенство:

метров аппроксимирую-

щей прямой по методу наименьших квадратов используется информа-
ция о координатах всех n точек, величина

$$Dx = \frac{Dd'_k}{\sum_{i=1}^n (a'_{ik})^2 + (a'_{kk} - 1)^2} \quad (5)$$

где

$$d'_k = \sum_{i=1}^n a'_{ik} \Delta x_i - \Delta x_k$$

$$a'_{ik} = \Delta'_{ik} / \Delta'$$

$$\Delta'_{ik} = [n z_i - \sum_{j=1}^n z_j] \cdot z_k + \sum_{j=1}^n z_j^2 - z_i \sum_{j=1}^n z_j$$

$$\Delta' = n \sum_{j=1}^n z_j^2 - (\sum_{j=1}^n z_j)^2$$

Для рассмотренного ранее частного случая (при $n=3$ и
 $z_3 - z_2 = z_2 - z_1$) имеем:

$$Dx = Dd'_3 \cdot 6$$

Отметим, что для применения рассматриваемого алгоритма доста-
точно расположить искровые камеры так, чтобы пучок частиц
проходил через эффективные области камер, а переход в единую
систему координат был возможен за счет параллельного переноса,
при этом параметры преобразования могут быть неизвестны.

На рис. I показаны отклонения координат от прямой, проводи-
мой через точки, зарегистрированные двумя опорными камерами.
Спектрометр, включающий указанные камеры, используется для
исследования K^0 -мезонов высоких энергий на ускорителе ИФЭ
(г.Серпухов).

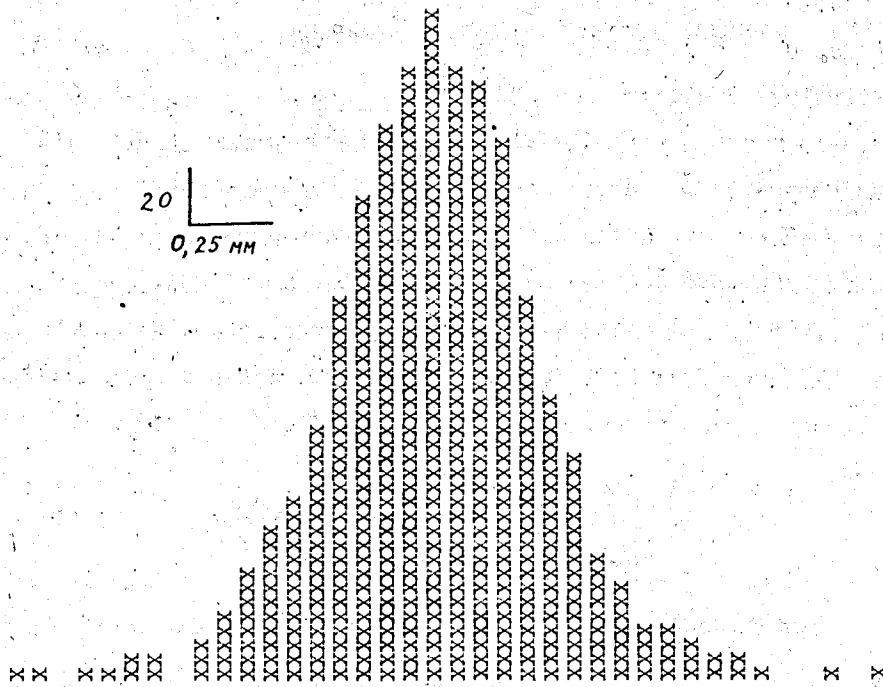


Рис. I. Гистограмма распределения величины d_2 .
($n=3, z_1 < z_2 < z_3$)

2. Определение параметров преобразований для перехода от систем координат, связанных с отдельными искровыми камерами в общую систему координат

Отдельные искровые камеры позволяют регистрировать положение искры в декартовой системе координат (x_i', y_i', z_i') , так что для перехода в единую систему координат (x, y, z) необходимо получать параметры преобразования: параллельного переноса и поворота осей.

Непосредственное измерение этих величин, связанное с тщательной юстировкой системы, сопряжено со значительными трудностями и

расходом времени. Планируемые или нежелательные процессы проведения эксперимента быстрого и надежного способа геометрии установки. Способ получения рассматриваемого метода юстировки камер юстировки, отличающимся вы-

Достаточно просто отдельных камер были параллельными координатами старых систем координат:

$$\begin{aligned} x_i' &= x \cos \alpha \\ y_i' &= x \sin \alpha \\ z_i' &= z - \end{aligned}$$

Величины C_{zi} , определяющие могут быть определены с помощью простых непосредственных измерений параметров φ_i, C_{zi} . Параметры преобразования систем координат $(2 \leq i \leq n)$ координат). Оценки искры квадратов из условия минимума

M

где

расходом времени. Если же учесть ситуации, когда происходят планируемые или нежелательные смещения отдельных искровых камер в процессе проведения эксперимента, становится очевидной необходимостью быстрого и надежного способа получения параметров, характеризующих геометрию установки. Следует отметить, что предлагаемый ниже способ получения рассматриваемых величин, даже при наличии удобного метода юстировки камер, может служить критерием правильности юстировки, отличающимся высокой надежностью и простотой.

Достаточно просто выставить камеры так, чтобы плоскости различных камер были параллельны между собой, так что связь между координатами старых систем и новой может быть выражена соотношениями:

$$x_i' = x \cos \varphi_i - y \sin \varphi_i - C_{xi} \quad (6)$$

$$y_i' = x \sin \varphi_i + y \cos \varphi_i - C_{yi}$$

$$z_i' = z - C_{zi}$$

(i - номер камеры)

Величины C_{xi} , определяемые базовыми расстояниями между камерами, могут быть определены с малой относительной погрешностью при помощи простых непосредственных измерений. Задача сводится к нахождению параметров $\varphi_i, C_{xi}, C_{yi}$.

Параметры преобразования предполагаются известными для n систем координат ($2 \leq n \leq N$, где N - общее количество систем координат). Оценки искоемых параметров ищем по методу наименьших квадратов из условия минимума суммы:

$$M = \sum_{j=1}^m M_j, \quad (7)$$

где

$$M_j = \sum_{i=1}^{N-n} \left\{ [x'_{ij} - (a_{xj} z_i + b_{xj}) \cos \varphi_i - (a_{yj} z_i + b_{yj}) \sin \varphi_i + c_{xi}]^2 + [y'_{ij} - (a_{yj} z_i + b_{yj}) \sin \varphi_i + (a_{xj} z_i + b_{xj}) \cos \varphi_i + c_{yi}]^2 \right\} + \sum_{k=1}^n [(x_{kj} - a_{xj} z_k - b_{xj})^2 + (y_{kj} - a_{yj} z_k - b_{yj})^2] \quad (8)$$

x'_{ij}, y'_{ij} - результаты измерений в смещенных системах координат
(i - номер камеры, j - номер траектории)

x_{kj} - результаты измерений в выбранной системе координат;

$a_{xj}, b_{xj}, a_{yj}, b_{yj}$ - параметры j -ой траектории;

$c_{xi}, c_{yi}, \varphi_i$ - искомые величины;

z_i - координата z , соответствующая i -той камере.

Выражение (8) получено на основании соотношений (6) и из условия линейности уравнения траектории. Обращаем внимание на то, что функциональный аргумент нелинейно зависит от искомых параметров. Для получения указанных величин можно воспользоваться стандартной программой для решения задач методом наименьших квадратов /1/.

Отметим следующий частный случай, когда искровые камеры устанавливаются так, что переход в единую систему координат может быть достигнут только за счет параллельного переноса, что соответствует случаю, когда $\varphi_i = 0$, а искомыми параметрами являются

$$c_{xi}, c_{yi}$$

Требуемые параметры в этом случае получаем по формулам:

$$c_{xi} = \bar{a}_x z_i + \bar{b}_x - \bar{x}_i'$$

где

$$\bar{a}_x = \left(\sum_{j=1}^m a_{xj} \right) / m, \quad \bar{b}_x = \left(\sum_{j=1}^m b_{xj} \right) / m, \quad \bar{x}_i = \left(\sum_{j=1}^m x'_{ij} \right) / m$$

$$a_{xi} = \left(n \sum_{k=1}^n (x_{kj} z_k) - \sum_{k=1}^n x_{kj} z_k^2 \right) / \left(\sum_{k=1}^n z_k^2 \right)$$

$$b_{xi} = \left(\sum_{k=1}^n z_k^2 \sum_{k=1}^n x_{kj} - \sum_{k=1}^n x_{kj} z_k \right) / \left(\sum_{k=1}^n z_k^2 \right)$$

$$\Delta_x = n \sum_{k=1}^n z_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n z_k \right)^2$$

Величины c_{yi} получаем

При получении указанной точности отдельных искровых камер жестким, так как метод позволяет получить хорошую идентичность

В реальных условиях ровки камер, указанная поправка к величинам, характерного параллельного переноса и отдельных искровых камер. В таблице I приведены величины переноса для установки, искровых камер высоких энергий.

Номер камеры	1	2	3	4	5
$c_x (x0.26 \text{ мм})$	0	3	4	6	9
$c_y (x0.26 \text{ мм})$	0	-1	3	-4	-1

$$\left. \begin{aligned} & [z_i + v_{yj}) \sin \varphi_i + C_{xi}]^2 + \\ & + v_{yj}) \cos \varphi_i + C_{yi}]^2 \} + \\ & (x - v_{yi})^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

системах координат
(траектории)

системе координат;
траектории;

-той камере.

соотношений (6) и из

Обращаем внимание на то,

исит от исконых параметров.

пользоваться стандартной

эньших квадратов /I/.

гда искровые камеры уста-

тому координат может быть

еноса, что соответствует

етрами являются

лучаем по формулам:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij}}{m}$$

$$a_{xi} = (n \sum_{k=1}^n (x_{kj} z_k) - \sum_{k=1}^n z_k \sum_{k=1}^n x_{kj}) / \Delta x$$

$$b_{xi} = \left(\sum_{k=1}^n z_k^2 \sum_{k=1}^n x_{kj} - \sum_{k=1}^n z_k \sum_{k=1}^n x_{kj} z_k \right) / \Delta x$$

$$\Delta x = n \sum_{k=1}^n z_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n z_k \right)^2$$

Величины C_{yi} получаем по аналогичным формулам.

При получении указанных выше соотношений предполагается равно- точность отдельных искровых камер. Это предположение не являет- ся жёстким, так как метод изготовления искровых камер позволяет получить хорошую идентичность камер, входящих в систему.

В реальных условиях, как правило, после выставления и юсти- ровки камер, указанная процедура применяется для вычисления попра- вок к величинам, характеризующим параметры преобразования (па- раллельного переноса и поворота) систем координат, связанных с отдельными искровыми камерами. В качестве иллюстрации в табли- це I приведены величины поправок к параметрам параллельного пе- реноса для установки, используемой при изучении распадов K^0 -ме- зонов высоких энергий.

Таблица I.

Номер камеры	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$C_x (\times 0.26 \text{ мм})$	0	3	4	6	9	10	4	4	9	-8	-12	-21	-10	-10	-8	-5	-4	0
$C_y (\times 0.26 \text{ мм})$	0	-1	3	-4	-1	-3	-8	-9	10	3	-2	-2	-6	-4	-4	-3	0	0

3. Определение эффективности искровых камер

Такой параметр, как эффективность системы, используется на различных этапах экспериментального цикла:

а) на стадии проведения измерений — это основной глобальный параметр, используемый для контроля в реальном времени функционирования экспериментального оборудования;

б) в некоторых экспериментах на стадии окончательной обработки.

Если во втором случае необходимо получить с достаточной степенью точности оценку эффективности всей установки, то в первом, наряду с этой оценкой, крайне важно получить эффективность отдельных звеньев, так как это позволяет локализовать неисправность и, следовательно, уменьшить время, необходимое для её устранения.

Под эффективностью искровой камеры понимается вероятность регистрации рассматриваемой камерой координат точки, принадлежащей траектории частицы. Оценку этой величины получаем, как отношение количества случаев эффективных срабатываний камеры (когда камера зарегистрировала точку на треке) к общему количеству идентифицированных траекторий. Получение необходимых величин для вычисления указанной оценки производится в два приема. Вначале реализуется опознавание траектории, определяются её параметры и вычисляются координаты точки, соответствующие данной камере. Затем определяется, совпадают ли измеренные значения координат с вычисленными в пределах точности локализации искр. Если это условие выполняется, считаем срабатывание камеры эффективным. Опознавание траекторий и вычисление их параметров производится без привлечения информации с исследуемой искровой камерой. В противном случае оценка эффективности

может оказаться завышенной объективной характеристикой счет аппаратных средств между отдельными камерами. К таким мерам относятся питание камер, автономная работа каждой камеры, и т.д.

Отметим, что при таком подходе к оценке эффективности камер второго рода (принятие решения при опознавании траектории частицы в сторону меньших значений эффективности) алгоритмов автоматического выбора средств /5/.

Рассмотрим один из способов регистрации группой базисных камер. Пусть задан набор точек, рассматриваемый как траектория частицы, полученная через две точки, не принадлежащие базисным камерам, но содержащая не менее t точек, находящихся в заданных пределах от базисных камер (т.е. траектория состоит из t прямых) двух, расположенных друг от друга, область неопределенности базисных камер, оказывается минимальной.

Проводим все прямые, соединяющие точки базисных камер, которые содержат максимальное количество точек на l , пока не будет достигнуто минимальное

вых камер
темы, используется на
то основной глобальный
время функциониро-
и окончательной обработ-
чить с достаточной сте-
становки, то в первом,
ть эффективность отдель-
овать неисправность и,
е для её устранения.
нимается вероятность ре-
т точки, принадлежащей
случаем, как отношение
й камеры (когда камера
количеству идентифициро-
еличин для вычисления
. Вначале реализуется
параметры и вычисляются
амере. Затем определяется,
с вычисленными в пределах
е выполняется, считаем
ие траекторий и вычисле-
ения информации о исслед-
оценка эффективности

может оказаться завышенной. Для того, чтобы эффективность была объективной характеристикой исследуемой камеры, применяются за счет аппаратных средств меры обеспечения физической независимости отдельных камер. К таким мерам относятся, в частности, раздельное питание камер, автономная система продува газовой смесью, заполняющей камеру, и т.д.

Отметим, что при таком методе определения эффективности ошибки второго рода (принятие проверяемой гипотезы, когда она неверна) при опознавании траектории приводят к смещению оценки эффективности в сторону меньших значений. В настоящее время отработан ряд алгоритмов автоматического опознавания треков за счет программных средств /5/.

Рассмотрим один из способов опознавания линейных треков, зарегистрированных группой из n бесфильмовых камер. Трек определяется набором точек, расстояние которых от базисной прямой, проведенной через две точки, не превышает величины d . Набор должен содержать не менее t точек. Угол наклона базисной прямой должен находиться в заданных пределах: $S_1 \leq S \leq S_2$. При выборе в качестве базисных камер (т.е. тех, из которых набираются точки для базисных прямых) двух, расположенных на максимальном расстоянии друг от друга, область неопределенности, зависящая от ширины коридора ошибок, оказывается минимальной.

Проводим все прямые, удовлетворяющие критерию направлений, через точки базисных камер. Принимаем в качестве искомым такие наборы, которые содержат максимальное количество точек. Уменьшая требуемое количество точек на I , повторяем процедуру поиска до тех пор, пока не будет достигнуто минимальное количество точек в наборе.

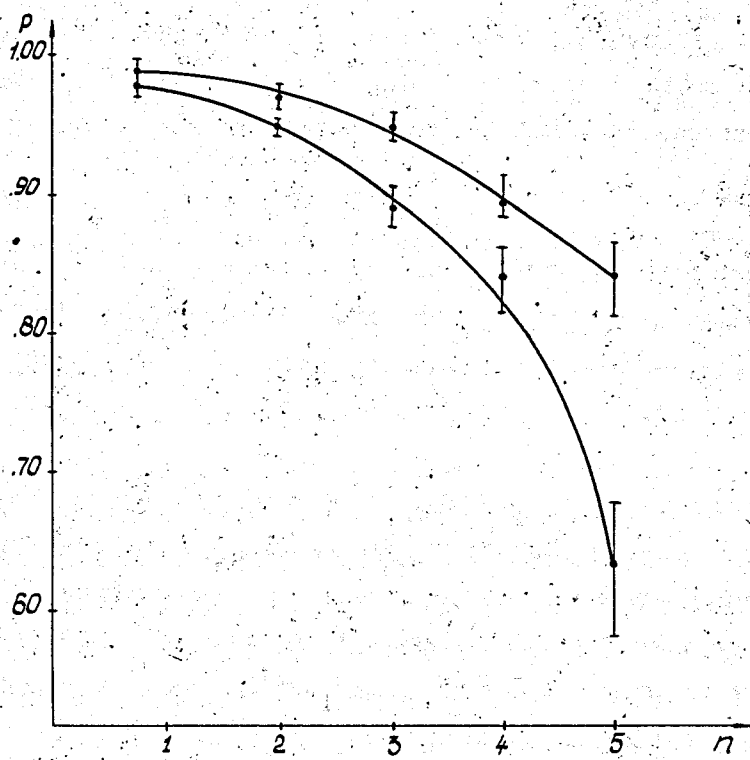


Рис. 2. Зависимость эффективности искровых камер от количества (n) дополнительных искр. Нижняя кривая соответствует "худшей" из 18 камер установки.

а верхняя?

Можно указать на возможные модификации этого алгоритма в программах опознавания может быть использован динамически базисных камер, величина d может изменяться в пределах набора и в зависимости от наклона базисной прямой. Выбор лучшей версии программы опознавания зависит от типа изучаемых событий, фоновых условий, эффективности и точности искровых камер.

Эффективность камер зависит от самых различных факторов и меняется не только при изменении внутренних условий (состояния, состав газовой смеси и т.д.), но и при изменении внешних условий, например, фоновых. На рис. 2 показана зависимость эффективности камер от количества дополнительных искр, зарегистрированных в камере. Исследовалась экспериментальная информация, полученная при изучении K^0 -мезонов высоких энергий.

Авторы выражают благодарность И.А.Голутвину, Ю.В.Зане, В.В.Кухтину, М.Ф.Лихачеву, И.А.Савину за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА :

1. И.Н.Силин. Стандартная программа для решения задач методом наименьших квадратов. Препринт ОИЯИ II-3362, Дубна, 1967.
2. Н.Н.Смирнов, И.В.Дунин-Барковский. Краткий курс математической статистики для технических приложений. Москва, 1959.
3. Ж.Нараи. Оптимизация ядерного измерительного оборудования и управление им с помощью счетной машины. Сообщение ОИЯИ P-1893, Дубна, 1964.
4. М.И.Дайон, Б.А.Долгошеин, В.И.Ефременко, Г.А.Лексин, В.А.Любимов. Искровая камера. Атомиздат, Москва, 1967.
5. P. Zanella. *Data processing for film and filmless spark chamber experiments. Preprint JINR R10-4245, Dubna, 1968.*

Рукопись поступила в издательский отдел
16 октября 1970 года.