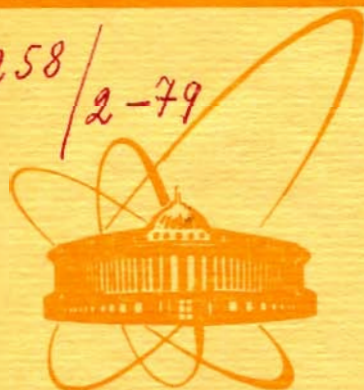


11/079

2258 / 2-79



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

Ц845

Б-447

P10 - 12184

А.В.Беляев, Н.Г.Симонова, Ю.И.Сусов

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ТЕСТ  
СКАНИРУЮЩЕГО АВТОМАТА НРД  
(ПРОГРАММА GOTHIER )

1979

P10 - 12184

А.В.Беляев, Н.Г.Симонова, Ю.И.Сусов

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ТЕСТ

СКАНИРУЮЩЕГО АВТОМАТА **HPD**

(ПРОГРАММА **GOTHIER** )

Беляев А.В., Симонова Н.Г., Сусов Ю.И.

P10 - 12184

Геометрический тест сканирующего автомата HPD  
(программа GOTNIER )

Программа GOTNIER - одна из тестовых программ сканирующего автомата HPD. Задачей программы является качественное и количественное определение геометрических искажений, возникающих при измерениях на HPD. Для выполнения этой задачи используется специальный эталонный тестовый объект - "решетка Готье". В работе объясняется алгоритм программы. Приводятся выражения для определяемых ею характеристик геометрических искажений. Представлены и обсуждены результаты реальной работы программы.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Belyaev A.V., Simonova N.G., Susov Yu.I.

P10 - 12184

Geometrical Test of HPD Scanning Device  
(GOTNIER Program)

GOTNIER program is one of the HPD test programs. Its goal is to determine qualitatively and quantitatively if there are any distortions of geometrical origin in HPD data. A specific test frame - a so-called "GOTNIER mesh" - is used for this purpose. The program algorithm is discussed. The expression evaluated by the program are given. Some results obtained with the help of this program are discussed.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Описываемая программа GOTNIER является одной из тестовых программ сканирующего автомата HPD<sup>1/1</sup>, задачей которого является качественное и количественное определение некоторых геометрических искажений, возникающих при измерениях. С помощью программы определяются искажения подобия. Программа не устанавливает причины искажений, но только фиксирует их наличие или отсутствие. Для выполнения этой задачи на HPD измеряется простейший геометрический объект - так называемая "решетка Готье"; данные сканирования обрабатываются программой.

Программа GOTNIER представляет собой также удобное средство для визуального просмотра данных сканирования, выдаваемых в графическом виде на устройство широкой печати. Программа написана для ЭВМ CDC 1604-A на языках FORTRAN 63 и CODAP 1. Управление работой программы возложено на оператора ЭВМ. При этом оператор широко использует пультовый телетайп для ввода команд и вывода сообщений.

## 2. РЕШЕТКА ГОТЬЕ

Изображенная на рис. 1 решетка Готье /РГ/ выполнена на фотопленке стандартной для HPD ширины. Оригинал РГ делается на стеклянной пластинке.

Прямые, из которых составлен оригинал РГ, характеризуются высокой степенью точности нанесения и взаимного расположения. Прямые одного направления /ря-

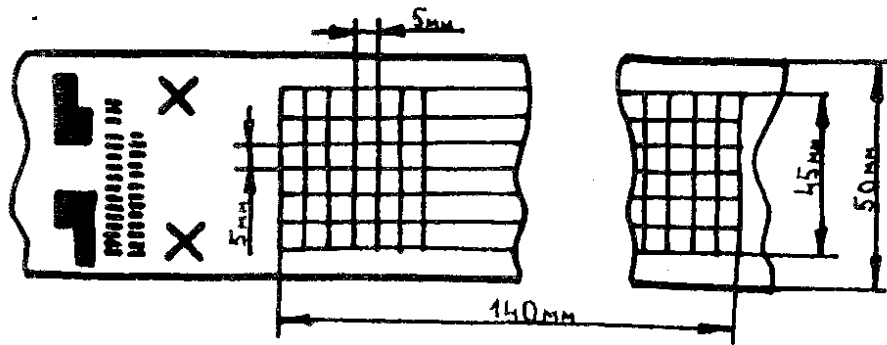


Рис. 1. Решетка Готье.

да/ - взаимно параллельны, а прямые разных рядов - перпендикулярны. Расстояния между прямыми каждого из рядов кратны шагу с точностью порядка 2 мкм. Толщина прямых на эталонной РГ равна 20 мкм. На НРД используется решетка с шагом 5 мм.

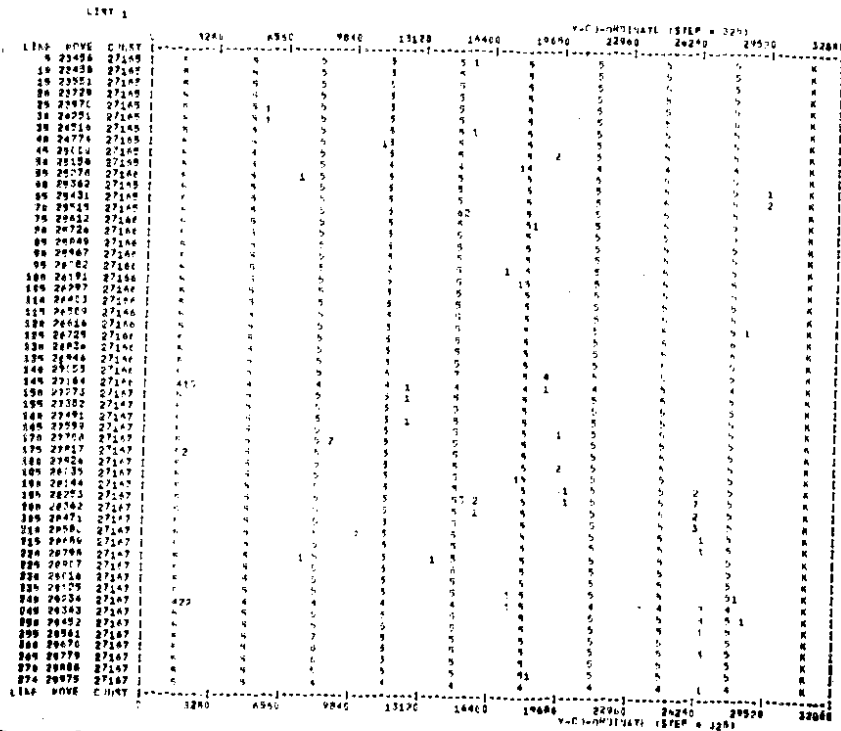


Рис. 2. Представление данных сканирования в программе.

Поскольку прямые одного ряда РГ взаимно перпендикулярны прямым другого ряда, РГ сканируется при работе программы дважды: один раз в нормальном направлении /поперечном/, другой раз - в абнормальном /продольном/. Данные каждого сканирования обрабатываются программой независимо.

На рис. 2 представлена полученная программой GOTNIER распечатка графического представления данных сканирования, соответствующих одному из участков РГ.

### 3. ПОИСК ПРЯМЫХ РГ

При измерениях на НРД со сканируемого изображения в память ЭВМ неизбежно попадает посторонняя, не относящаяся к прямым РГ информация, например, различные "шумы" оптического или электронного происхождения, данные о реперных крестах /см. рис. 1/ и т.д. Для получения достоверных результатов теста такая информация удаляется.

Пусть после удаления посторонней информации выделены для обработки данные для  $J \leq 10$  прямых. Тогда для каждой  $m$ -й прямой ( $m=1, \dots, J$ ) получается совокупность пар декартовых координат

$$(X_{im}, Y_{im}) \quad (i=1, \dots, K_m) \quad /1/$$

причем

$$X_F \leq X_{1m} \leq X_{2m} \leq \dots \leq X_{km} \leq X_L$$

/здесь  $k_m$  - количество точек на  $m$ -й прямой,  $X_F$  - координата начала сканирования,  $X_L$  - координата конца сканирования/.

Назовем все наборы координат /1/, полученные как для нормального, так и для абнормального сканирования, образом решетки Готье /ОРГ/. При отсутствии геометрических искажений ОРГ должен быть подобен РГ, т.е.

наборы координат /1/ должны соответствовать параллельным прямым, а прямые разных рядов ОРГ - взаимно перпендикулярным прямым. Однако ввиду возможных искажений ОРГ может оказаться не подобным РГ. В программу заложено предположение о том, что геометрические искажения образа - достаточно малые. ОРГ, даже будучи подобным РГ, может быть повернут на малый угол относительно оси координат прибора. Прямые ОРГ при этом будут непараллельны оси X. Ввиду этого получение наборов координат /1/ проводится /упрощенно/ следующим образом.

1. Рассматриваются точки /данные/, принадлежащие некоторому начальному участку сканирования. Y - координаты этих точек гистограммируются по направлению оси X с достаточно широким шагом гистограммы. Через точки, принадлежащие максимумам гистограммы, методом наименьших квадратов проводятся прямые. Средний наклон  $t_0$  этих прямых определяет направление дальнейшего гистограммирования.

2. Рассматриваются данные, полученные при сканировании всего кадра, их Y-координаты гистограммируются в направлении  $t_0$ . Через точки, принадлежащие максимумам наклонной гистограммы, вновь проводятся по методу наименьших квадратов прямые, дающие уточненное значение среднего наклона прямых ОРГ -  $t$ , а также индивидуальные наклоны  $t_m$ .

3. Для каждого m-го набора данных, попавших в максимумы наклонной гистограммы, проводится отбрасывание точек, отстоящих от соответствующей прямой с наклоном  $t_m$  более чем на три среднеквадратичных отклонения. Оставшиеся точки объявляются принадлежащими прямым ОРГ, их координаты составляют наборы /1/. На каждом этапе описанного процесса могут быть забракованы данные, относящиеся к некоторым прямым ОРГ. Главная причина этого - значительное отличие наклонов промежуточных прямых от соответствующих средних наклонов / $t_0$  или  $t$ / или малое количество точек в прямой.

#### 4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

Для того, чтобы выяснить, насколько координаты /1/ соответствуют прямым, каждый набор /1/ ( $m=1, \dots, J$ ) аппроксимируется полиномами 1-й и 2-й степеней. При этом высчитываются следующие величины:

- коэффициенты  $d_{0m}$  и  $d_{1m}$  уравнения прямой

$$y = d_{1m} \cdot x + d_{0m}, \quad /2/$$

проведенной по методу наименьших квадратов через точки с координатами /1/;

- коэффициенты  $P_{0m}$ ,  $P_{1m}$  и  $P_{2m}$  уравнения параболы

$$y = P_{2m} \cdot x^2 + P_{1m} x + P_{0m}, \quad /3/$$

проведенной по методу наименьших квадратов через точки с координатами /1/;

- длина  $L_m$  использованного отрезка m-й прямой ОРГ:

$$L_m = (x_{k_m m} - x_{1m}) \sqrt{1 + d_{1m}^2};$$

- среднеквадратичные отклонения  $C_m$  и  $S_m$  точек m-й прямой ОРГ от МНК-полиномов /2/ и /3/:

$$C_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k_m} (d_{1m} x_{im} + d_{0m} - y_{im})^2}{k_m - 1}},$$

$$S_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k_m} (P_{2m} x_{im}^2 + P_{1m} x_{im} + P_{0m} - y_{im})^2}{k_m - 1}},$$

- радиус  $R_m$  кривизны параболы /3/ в точке  $X = X_{1m}$ :

$$R_m = \frac{[1 + (2P_{2m} x_{1m} + P_{1m})^2]^{3/2}}{2P_{2m}};$$

- стрелка прогиба  $H_m$  дуги окружности радиуса  $R_m$  с хордой  $L_m$ :

$$H_m = \frac{L_m}{2} \operatorname{tg} \left( \frac{1}{2} \arcsin \frac{L_m}{2R_m} \right).$$

Для того, чтобы судить о степени параллельности прямых /2/, вычисляется непараллельность - угловая величина  $\Delta\phi$ , равная

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^J (\bar{\phi} - \phi_m)^2}{J-1}},$$

где

$$\bar{\phi} = \frac{\sum_{m=1}^J \phi_m}{J}, \quad \phi_m = \operatorname{arctg}(d_{1m}).$$

Рассчитывается среднее расстояние  $\bar{Q}$  между прямыми /2/:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{m=1}^{J-1} Q_m}{J-1}, \quad /4/$$

где  $Q_m = \frac{d_{0,m+1} - d_{0m}}{\cos \bar{\phi}}$  ( $m = 1, \dots, J-1$ )

и среднеквадратичный разброс  $q$  этих расстояний

$$q = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{J-1} (\bar{Q} - Q_m)^2}{J-2}}$$

Среднее расстояние  $\bar{Q}$ , вычисленное по формуле /4/, представляет интерес, если прямые /2/ - достаточно параллельны, т.е.  $\Delta\phi$  мало.

Все описанные выше величины находятся для каждого ряда ОРГ. Для проверки взаимной перпендикулярности

прямых из разных рядов ОРГ вычисляется таблица, содержащая для каждого узла ОРГ отклонение  $h_{ij}$  угла пересечения  $i$ -й и  $j$ -й прямых от прямого угла:

$$h_{ij} = \phi_i^{(A)} - \phi_j^{(N)} \quad (j=1, \dots, J^{(N)}; i=1, \dots, J^{(A)}).$$

Приводятся также значения среднего углового отклонения

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i,j} h_{ij}}{J^{(N)} J^{(A)}}$$

и его среднеквадратичного разброса

$$\Delta h = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} (\bar{h} - h_{ij})^2}{J^{(N)} J^{(A)} - 1}}$$

/Величины, снабженные выше индексом (N), относятся к данным нормального сканирования, а индексы (A) - к данным абнормального сканирования/.

## 5. ПРИМЕР И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ

На рис. 3,4 и 5 приведены результаты работы программы. Обозначения в таблицах на рис. 3 и 4 совпадают с обозначениями, введенными в пп. 3 и 4.

Данные, относящиеся к 1-й и 8-й прямым нормального сканирования и к 1-й прямой абнормального, были забракованы программой при выполнении алгоритма, описанного в п.3. У всех остальных прямых геометрические искажения не превышают допустимого значения. Для них среднеквадратичные отклонения  $S_m$  и  $S_{m1}$  не превышают 2,0 мкм, а стрелки прогиба  $H_m$  незначительно превышают  $S_m$ . Прямые обоих рядов ОРГ можно считать параллельными, потому что их непараллельность составляет всего около  $10^{-5}$  рад., при этом максимальное расхождение двух прямых, идущих под таким углом друг к другу, на длине сканируемого изображения /150 и 50 мм/ не превосходит 2,5 мкм. Это находится в пределах точности прибора.

NONPARALLELISM

VELOCITY DISCRIMINATION LEVEL PERCENT	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	118503.6	0	1.97E-03	0	1.0979E-02	0	0	0	0
2	118513.4	0	1.9697E-03	1.7	1.9999E-06	-4.0723E-03	7.28E-10	1.4	5.08E-01
3	118523.2	0	2.0531E-03	1.7	2.0930E-05	-4.6487E-03	7.18E-10	1.5	6.94E-01
4	118533.0	0	2.0945E-03	1.7	2.0933E-05	-4.0739E-03	7.46E-10	1.5	6.71E-01
5	118542.8	0	3.0381E-03	1.6	3.0435E-05	-4.0817E-03	6.66E-10	1.4	6.21E-01
6	118552.6	0	3.9827E-03	1.6	3.9916E-05	-4.0955E-03	6.02E-10	1.3	7.34E-01
7	118562.4	0	4.9273E-03	1.6	4.9362E-05	-4.1093E-03	5.42E-10	1.3	7.34E-01
8	118572.2	0	5.8719E-03	1.6	5.8808E-05	-4.1231E-03	4.82E-10	1.2	7.34E-01
9	118582.0	0	6.8165E-03	1.6	6.8254E-05	-4.1369E-03	4.22E-10	1.2	7.34E-01
10	118591.8	0	7.7611E-03	1.6	7.7700E-05	-4.1507E-03	3.62E-10	1.2	7.34E-01

NON-PARALLELISM 6.5E-06

MEAN DISTANCE BETWEEN STRAIGHT LINES 4991.1 +/- 3.0

DISTANCES BETWEEN STRAIGHT LINES

4992.0	4991.8	4992.4	4992.3	4991.3	4997.7
--------	--------	--------	--------	--------	--------

LEASTM, C, S, MAXD, DR, P, DISTANCE - NCM  
 RADIUS - CM  
 RADIUS(\*2)  
 NON-PARALLELISM - RADIAN

Рис. 3. Образец результатов теста. Проверка прямолинейности и параллельности прямых нормального ряда ОРГ.

BOTHIER TEST OF CLASS PLATE

NONPARALLELISM

VELOCITY DISCRIMINATION LEVEL PERCENT	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	35341.2	0	9.9972E-03	0	0	0	0	0	0
2	35349.7	0	1.4495E-02	1.3	1.4599E-06	-4.1434E-03	2.10E-09	1.3	1.67E-01
3	35358.2	0	1.9991E-02	1.2	1.9578E-05	-4.1793E-03	2.94E-09	1.2	1.78E-01
4	35366.8	0	2.4994E-02	1.6	2.4605E-05	-4.3392E-03	4.37E-09	1.5	1.17E-01
5	35375.3	0	2.9994E-02	1.4	2.9988E-05	-4.0736E-03	1.72E-09	1.3	2.91E-01
6	35383.8	0	3.4994E-02	1.4	3.4996E-05	-4.0225E-03	1.16E-09	1.4	4.33E-01
7	35392.4	0	3.9991E-02	1.2	3.9992E-05	-3.9534E-03	4.98E-10	1.2	1.02E 00

NON-PARALLELISM 2.8E-05

MEAN DISTANCE BETWEEN STRAIGHT LINES 4990.1 +/- 3.1

DISTANCES BETWEEN STRAIGHT LINES

4990.0	4990.8	5004.3	4998.7	4990.6	4996.9
--------	--------	--------	--------	--------	--------

LEASTM, C, S, MAXD, DR, P, DISTANCE - NCM  
 RADIUS - CM  
 RADIUS(\*2)  
 NON-PARALLELISM - RADIAN

Рис. 4. Образец результатов теста. Проверка прямолинейности и параллельности прямых абнормального ряда ОРГ.

GOTHIER TEST OF GLASS PLATE

25.10.1974

\*\*\*\*\*

VELOCITY  
DISCRIMINATION LEVEL 30R  
DENSITY .50

THE TABLE OF ANGLE DEVIATIONS FROM THE RIGHT ANGLE

	2	3	4	5	6	7	9
8	.0000319	.0000315	.0000284	.0000276	.0000223	.0000223	.0000153
7	.0000075	.0000072	.0000041	.0000035	-.0000020	-.0000020	-.0000090
6	.0000079	.0000076	.0000045	.0000039	-.0000016	-.0000016	-.0000086
5	-.0000099	-.0000092	-.0000033	-.0000029	-.0000029	-.0000029	-.0000036
4	.0000162	.0000159	.0000128	.0000122	.0000067	.0000067	-.0000003
3	-.0000089	-.0000092	-.0000024	-.0000020	-.0000024	-.0000024	-.0000035
2	-.0000045	-.0000048	-.0000049	-.0000045	-.0000051	-.0000051	-.0000058

THE MEAN ANGLE DEVIATION -.0000086 +/- .0000243

ALL DATA - IN RADIAN'S

Рис. 5. Образец результатов теста. Проверка взаимной перпендикулярности прямых из разных рядов ОРГ.

Среднее расстояние  $\bar{Q}$  между прямыми нормального сканирования не оказалось равным /с точностью до величины ошибок  $q / 5000$  мкм из-за неточного задания цены отсчета прибора. Для того, чтобы расстояние между прямыми вычислялось точно, перед проведением теста желательно вводить в память ЭВМ точные значения калибровочных констант прибора.

На рис. 5 дана таблица угловых отклонений, вычисленных при проведении теста. Видно, что модуль среднего углового отклонения  $|\bar{h}| < \Delta h - 10^{-5}$  рад. Следовательно, прямые разных рядов могут считаться взаимно перпендикулярными.

В целом можно считать, что ОРГ подобен РГ и геометрические искажения при измерениях на НРД отсутствуют.

## 6. О ГРАФИЧЕСКОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ ДАННЫХ В ПРОГРАММЕ

Если результаты работы программы указывают на наличие геометрических искажений при измерениях на НРД, то, учитывая одни лишь характеристики, описанные в п.4, иногда бывает трудно понять причину возникновения искажений. Большую помощь в выяснении таких причин может оказать графическое представление данных сканирования на устройстве широкой печати. Программа GOTHIER обладает значительными возможностями для этого. Приведем, помимо рис. 2, еще два изображения данных сканирования, полученных программой.

На рис. 6 показана часть одной из прямых ОРГ, данная с большим увеличением по оси  $u$ . Это изображение есть участок графического представления данных, аналогичный показанному на рис. 2. При таком увеличении изображения детально видна структура участка данной прямой ОРГ. Подобным образом можно рассмотреть любой участок ОРГ.

Программа получает также, если требуется, полное изображение любой из исследуемых прямых ОРГ. На таких графиках специальными символами метятся некоторые особые точки. Один из подобных графиков представ-



TRAC.  
RECORD 1

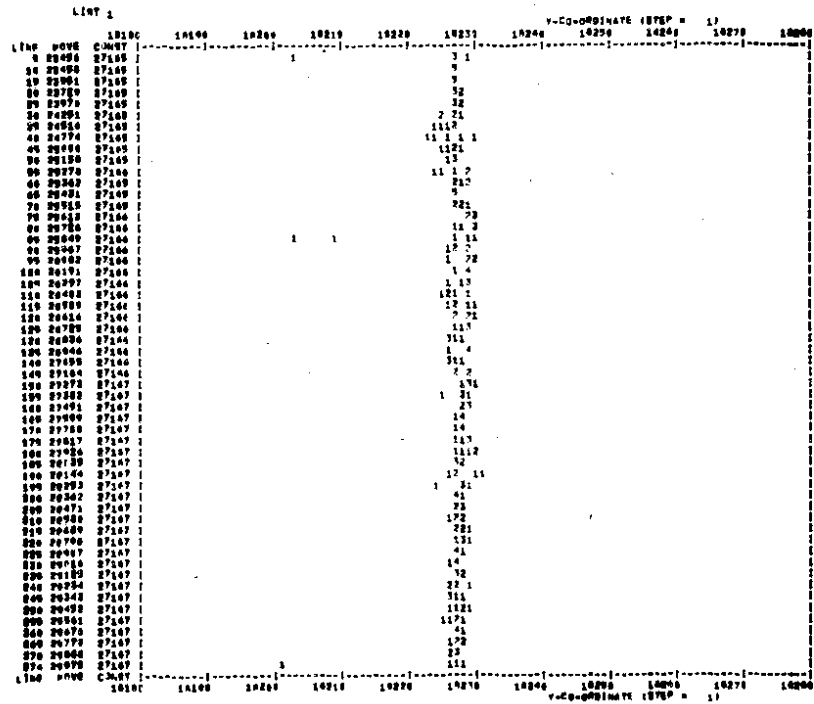


Рис. 6. Данные сканирования для участка одной из прямых ОРГ.

лен на рис. 7. Символом "Н" на нем указаны точки, не принадлежащие, "по мнению программы", изображенной прямой.

Рис. 6 и 7 представляют типичные изображения достаточно "хороших" прямых ОРГ.

### 7. ОБ ОБРАБОТКЕ ТРЕКОВЫХ СИГНАЛОВ ИМИТАТОРА

Имитатор НРД<sup>2/1</sup> генерирует два постоянных трековых сигнала. Кроме того, при его работе на НРД исключается цепь обработки сигналов ФЭУ. Это позволяет, в случае

STRAIGHT LINE IC, 9

ADDRESS ARGUMENT FUNCTION  
11 9.4000000F 04 9.3000000F 04  
12 7.4000000F 04 7.2000000F 04  
SPARE 7.4000000F 04 7.2000000F 04

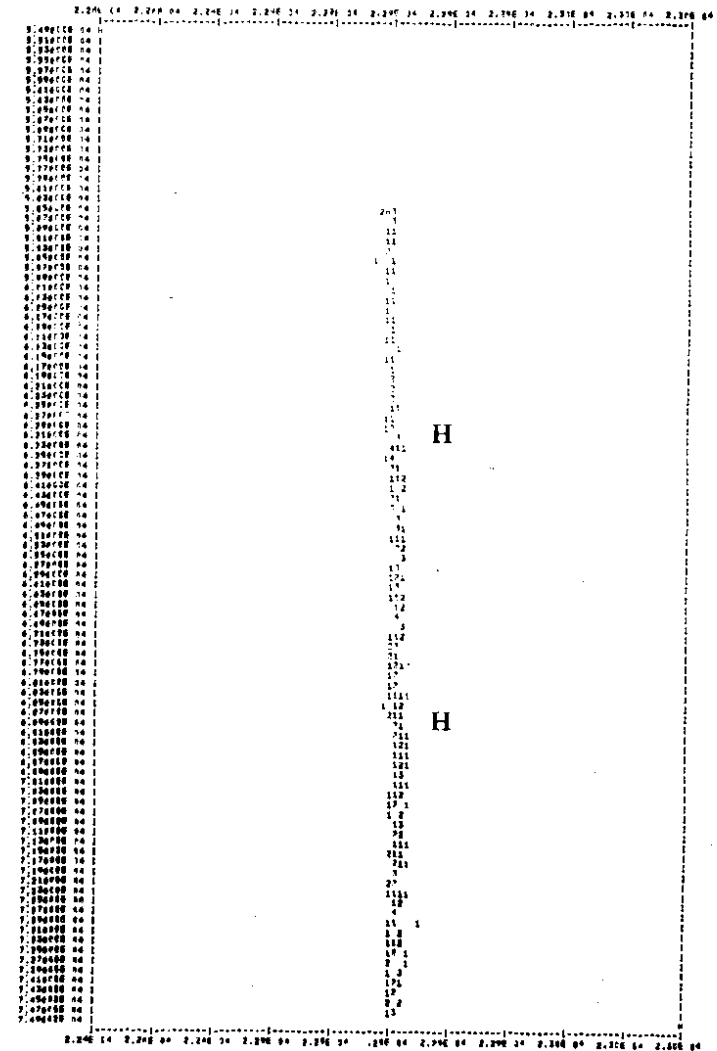


Рис. 7. Представление данных сканирования, полученных для одной из прямых ОРГ.

некоторых неполадок в работе прибора, быстрее находить источник этих неполадок. Можно считать, что два трековых сигнала имитатора получаются при сканировании некоторой идеальной РГ, содержащей всего две строго параллельные прямые. Поэтому для программы GOTHIER практически безразлично, обрабатывать ли данные от имитатора или данные сканирования реальной РГ.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программа GOTHIER первоначальный вариант которой был написан в 1973 году, а окончательный в 1976, использовалась как тестовая программа сканирующего автомата НРД. За это время с ее помощью неоднократно были обнаружены и устранены отклонения в нормальной работе прибора. Использование программы в составе комплекса тестовых программ сканирующего автомата - целесообразно. Можно рекомендовать еженедельную проверку работы НРД тестом GOTHIER.

Описанная программа с некоторыми изменениями, касающимися только подпрограммы управления, используется для проверки работы модернизированной измерительной системы НРД-ТРА-СДС. Кроме того, в связи с изменением характера информации, поступающей из НРД, вид выдачи результатов тестов и графического представления данных сканирования стал несколько иным.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алмазов В.Я. и др. ОИЯИ, Р10-4513, Дубна, 1969.
2. Инкин В.Д. и др. ОИЯИ, Р10-4771, Дубна, 1969.

*Рукопись поступила в издательский отдел  
15 января 1979 года.*