

Ц 8408

0-756

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА

15/4-78



2146/2-78

IO - 11290

Г.А.Ососков, В.Е.Комолова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

СКАНИРУЮЩЕГО АВТОМАТА

“СПИРАЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ”

IV. Модернизация программы CALIBR

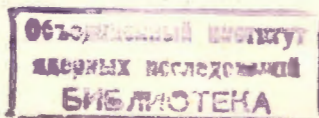
**1978**

10 - 11290

Г.А.Ососков, В.Е.Комолова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
СКАНИРУЮЩЕГО АВТОМАТА  
“СПИРАЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ”

IV. Модернизация программы CALIBR



Ососков Г.А., Комолова В.Е.

Ю - 11290

Математическое обеспечение сканирующего автомата  
"Спиральный измеритель" IV Модернизация программы  
CALIBR

Программа CALIBR, входящая в математическое обеспечение сканирующего автомата "Спиральный измеритель", предназначена для проведения еженедельных калибровок автомата с целью определения его точностных характеристик и коэффициентов преобразования между декартовой и полярной системами координат, в которых производятся измерения. В настоящей работе приводится описание изменений и улучшений, внесенных в программу CALIBR по сравнению с ее первоначальным вариантом, по результатам измерений 1975-1977 гг. Были усовершенствованы алгоритмы поиска центров крестов и вычисления их ошибок, введена оперативная проверка качества калибровочных коэффициентов путем использования их для восстановления прямой линии.

Проведенная модернизация повысила точность и ускорила время обработки калибровочных данных.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИАИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Ososkov G.A., Komolova V.E.

Ю - 11290

The Spiral Reader Software, IV. Program CALIBR  
Development

The program CALIBR is a part of Spiral Reader Software and is intended for weekly testing of this device with the aim to determine its precision and parameters of the transformation between two co-ordinate systems (cartesian and polar) in which measurements are made.

The program CALIBR was quite updated during the measurements in 1975-1977. The description of all these changes and improvements is given below in comparison with the original CALIBR version. There were improved algorithms of the cross center finding and their residuals calculation; straight line reconstruction as a quick test of the calibration parameter quality was introduced.

The development made increased the accuracy and speeded up the run time of the program.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

В настоящем сообщении содержится описание изменений и улучшений, внесенных в первоначальный вариант программы калибровки автомата "Спиральный измеритель" (СИ) (см. /1/), по результатам обработки калибровочных измерений, проведенных за четыре года эксплуатации СИ. Этот опыт позволил, прежде всего, проверить важное упрощающее предположение относительно вида функционального преобразования между полярной и декартовой системами координат СИ. В основу программы /1/ было положено допущение о достаточности преобразования простейшего вида<sup>х)</sup>

$$x = M_R(R - R_0) \cos[M_\theta(\theta - \theta_0)] + x_0 + dx,$$

$$y = M_R(R - R_0) \sin[M_\theta(\theta - \theta_0)] + y_0 + dy. \quad (1)$$

Поправочные члены  $dx$  и  $dy$  вычисляются с помощью двумерной линейной интерполяции по ближайшим четырем узловым значениям, взятым из массива поправочных членов, определение которых вместе с шестью параметрами преобразования (I)

$$M_R, M_\theta, R_0, \theta_0, x_0, y_0 \quad (2)$$

и было целью калибровки.

Упомянутое предположение состояло в том, что оптические и механические дисторсии СИ будут достаточно малы, чтобы обеспечить равномерную малость поправочных членов даже в случае простого преобразования вида (I).

х) Параметры сдвига  $x_0, y_0$  были внесены в это преобразование после появления публикации /1/.

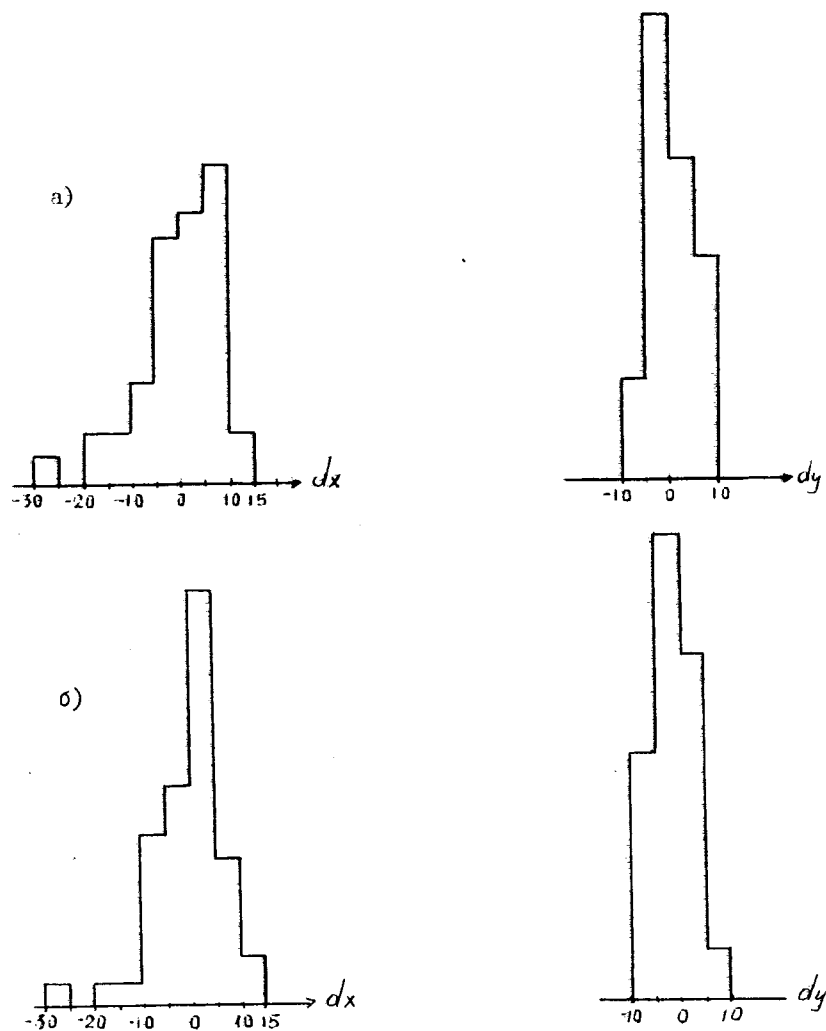


Рис. 1. Гистограммы поправок по осям.

а) Данные калибровки от 15.12.76 г.

б) Данные калибровки от 11.7.77 г.

Практика калибровки показала, что величины поправок  $dx$  и  $dy$ , найденные в узлах калибровочной пластины путем минимизации функционала

$$\Phi_1 = \sum_{k=1}^n (dx_k^2 + dy_k^2)$$

по набору параметров (2), не превышают значений в  $20 \pm 30$  мк, оставаясь в среднем на уровне  $10 \pm 15$  мк (см. рис. 1).

Случаи, когда  $\max(dx_k, dy_k)$  превышал 30 мк, обычно свидетельствовали о неудачном измерении и необходимости проведения повторной калибровки и, если это не помогало, — юстировки СИ.

Не менее критичной в этом смысле оказалась величина  $R_0$ , превышение абсолютного значения которой порога в 25 мк всегда приводило к недопустимому росту поправочных членов, переставших в этом случае компенсировать нелинейные искажения, оставшиеся после применения преобразования (1) (рис. 2).

В этой связи для быстрого определения качества калибровочных констант в процедуру калибровки был включен дополнительный этап измерения отрезка прямой линии путем сканирования ее от середины. В программу CALIBR соответственно была включена подпрограмма SLINES (см. ниже), которая использовала полученные калибровочные константы для восстановления этой прямой методом наименьших квадратов (м.н.к.) и проверки точности этого восстановления как по параметрам восстановленной прямой, так и по графику отклонения от нее каждой из точек, отнесенных к ней (см. рис. 3).

Отметим основные изменения, внесенные в программу CALIBR в процессе ее модернизации (все изменения согласовывались с инженерами-разработчиками СИ, часть из них была внесена по их инициативе).

1. Выборка данных калибровочных измерений с магнитной ленты проводится теперь по дате дня, когда состоялось измерение, число циклов калибровки не фиксировано, как в /1/, а может быть произвольным (но не менее двух).

2. Обрабатываются данные измерений не всех 65 крестов, имеющих на калибровочной пластине, а 45 крестов, расположенных в прямоугольнике  $(-40 \leq x \leq 40; -20 \leq y \leq 20)$ , входящем в поле сканирования СИ.

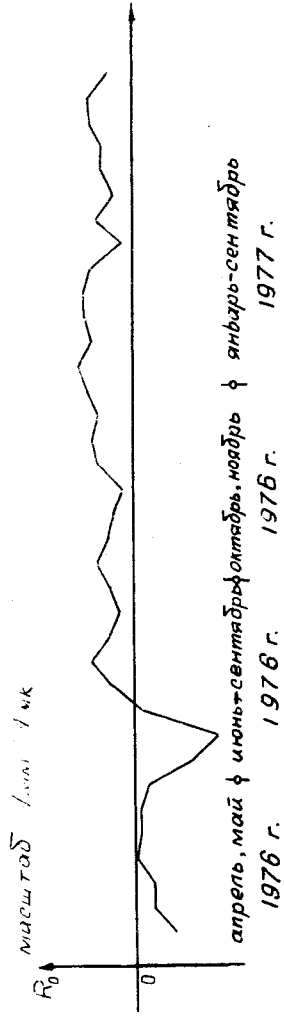


Рис. 2. Динамика изменения  $R_0$  по времени.

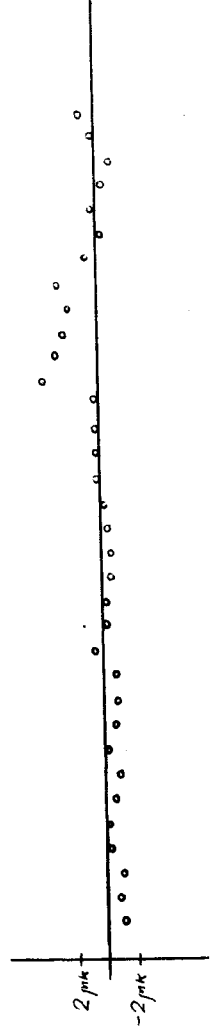


Рис. 3. Прямая линия, восстановленная по данным калибровки от 1.УШ.77 г.

При определении трансформации из системы  $X_{Y_{кл}}$  декартовых координат калибровочной пластины в систему  $X_{Y_{сп}}$  спирального измерения (подпрограмма REPK) измеряются четыре креста, расположенные ромбом, с координатами  $(-60; 0)$ ,  $(0; -20)$ ,  $(60; 0)$ ,  $(0; 20)$  (порядок их перечисления соответствует порядку измерения).

3. Полностью изменен алгоритм поиска центров крестов.

Точки, выделенные программами LIM и BOX из области, относящейся к данному кресту с центром  $(R_c, \theta_c)$ , классифицируются на две группы по плечам креста не с помощью медленной процедуры гистограммирования, как в /1/, а в соответствии с идеей работы /2/ путем подгонки их к известному образу креста. Для этого выделенный массив точек  $(R_i, \theta_i \quad i=1, \bar{n})$  с помощью преобразования

$$\begin{aligned} x_i &= R_i \cos(\theta_i - \theta_c) - R_c, \\ y_i &= R_i \sin(\theta_i - \theta_c) \end{aligned} \quad (3)$$

переводится в локальную систему декартовых координат  $x_i, y_i, \quad i=1, \bar{n}$  так, чтобы уравнения прямых, составляющих плечи креста, имели вид

$$\begin{aligned} y &= (\kappa + \Delta)x + \Delta_1, \\ y &= -(\kappa - \Delta)x + \Delta_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\kappa = \text{tg} 20^\circ$  для всех крестов, кроме центрального креста пластины, для которого  $\kappa = 1$ . Величины  $\Delta, \Delta_1, \Delta_2$  предполагаются достаточно малыми, чтобы можно было пренебречь их произведениями и квадратами, что позволяет построить квадратичный функционал

$$\Phi_2 = \sum_{i=1}^n n_i (y_i^2 - \kappa x_i^2 - a y_i - b x_i - c x_i y_i)^2,$$

путем минимизации которого по параметрам  $a, b$  и  $c$  можно найти приближенные значения коэффициентов уравнения (4):

$$\Delta_1 \approx \frac{1}{2} \left( a + \frac{b}{\kappa} \right), \quad \Delta_2 \approx \frac{1}{2} \left( a - \frac{b}{\kappa} \right), \quad \Delta \approx \frac{c}{2}.$$

Полученной точности достаточно для проведения классификации точек на две группы в соответствии с их принадлежностью к плечам креста. При этом исключаются точки, близкие к концам и центру

креста, координаты которых искажены при сканировании целью. Далее по точкам каждой группы проводятся прямые с помощью м.н.к. с выбросом далеко отстоящих точек, находятся координаты центра креста ( $x_c, y_c$ ) как точка пересечения этих прямых, а также дисперсии их ошибок

$$\sigma_{x_c}^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_1^2 A_1^2}{1+A_1^2} + \frac{\sigma_2^2 A_2^2}{1+A_2^2} \right),$$

$$\sigma_{y_c}^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_1^2}{1+A_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{1+A_2^2} \right),$$

где  $A_1$  и  $A_2$  - угловые коэффициенты найденных прямых, а  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  - соответствующие среднеквадратичные ошибки, вычисленные м.н.к. Полученные координаты  $x_c, y_c$  относятся к какому-то одному из циклов калибровки (пусть его номер  $l$ ,  $l = \bar{1}, \bar{2}$ ; обычно  $\kappa = 10$ ). Поэтому их следует усреднить по всем циклам:

$$\bar{x}_c = \frac{\sum_{l=1}^{\kappa} \left( \frac{x_{cl}}{\sigma_{x_{cl}}} \right) \left( \sum_{l=1}^{\kappa} \frac{1}{\sigma_{x_{cl}}} \right)^{-1}, \quad \bar{y}_c = \frac{\sum_{l=1}^{\kappa} \left( \frac{y_{cl}}{\sigma_{y_{cl}}} \right) \left( \sum_{l=1}^{\kappa} \frac{1}{\sigma_{y_{cl}}} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Соответственно усредняются и дисперсии

$$\bar{\sigma}_{x_c}^2 = \frac{1}{\kappa} \sum_{l=1}^{\kappa} \sigma_{x_{cl}}^2, \quad \bar{\sigma}_{y_c}^2 = \frac{1}{\kappa} \sum_{l=1}^{\kappa} \sigma_{y_{cl}}^2. \quad (6)$$

Полученные локальные координаты с помощью обращения преобразования (3) переводятся обратно в исходные полярные координаты выбранного нами центра креста ( $\hat{R}_c, \hat{\theta}_c$ ):

$$\hat{R}_c = \sqrt{(\bar{x}_c - R_c)^2 + \bar{y}_c^2}, \quad \hat{\theta}_c = \theta_c + \arctg \left( \frac{\bar{y}_c}{\bar{x}_c - R_c} \right),$$

где  $R_c, \theta_c$  взяты из (3), а  $\bar{x}_c, \bar{y}_c$  - из (5).

Интересно, что пересчет ошибок при таком обратном переходе дает нам недиагональную ковариационную матрицу. Кроме ошибок по осям,

$$\hat{\sigma}_{x_c} = \sqrt{\bar{\sigma}_{x_c}^2 \cos^2 \theta_c + \bar{\sigma}_{y_c}^2 \sin^2 \theta_c}, \quad \hat{\sigma}_{y_c} = \sqrt{\bar{\sigma}_{x_c}^2 \sin^2 \theta_c + \bar{\sigma}_{y_c}^2 \cos^2 \theta_c}, \quad (7)$$

оказывается отличной от нуля и ковариация

$$D_{x_y} = [\bar{\sigma}_{y_c}^2 - \bar{\sigma}_{x_c}^2] \cos \theta_c \sin \theta_c, \quad (8)$$

которая не учитывается пока в настоящей версии CALIBR (хотя для  $\theta = \pi/4$ , например, может достигать величины, сравнимой со значениями ошибок (7)).

Вышеописанный алгоритм реализован в программе COMBIN, работающей значительно быстрее варианта, где нахождение плеч креста выполняется путем двукратного гистограммирования вдоль идеальных направлений этих плеч. Тем не менее на случай больших  $\Delta$  в (4), не позволяющих применять COMBIN, в CALIBR сохранен и этот вариант, реализуемый программой SELFIT. Отличие SELFIT от аналогичной программы, описанной в [1], заключается в ином виде преобразования (3) к локальной системе координат и более аккуратной процедуре усреднения по циклам калибровки, выполняемой по формулам (5) и (6). Переключение на вариант SELFIT может быть выполнено путем присвоения значения 1 ключу KSEL.

4. Уже упомянутая программа SLINES после сканирования прямой линии (или звезды, образованной пересечением в одной точке  $\kappa$  прямых;  $\kappa \leq 5$ ) производит поиск линий, выходящих из центра сканирования и отстоящих друг от друга не более чем на  $\Delta \theta = \pi/40$  в интервале  $R \leq R_{max}$  ( $R_{max} = 10$ ). Если число найденных линий из-за шумовых отсчетов превысит 10, то поиск остальных не производится. Дальнейшее прослеживание найденных лучей ведется упрощенным вариантом метода шнуров [3]. После чего из массива найденных лучей выбираются все такие пары, для которых

$$|\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_2| - \pi \leq \Delta \theta,$$

где  $\bar{\theta} = \frac{1}{\kappa} \sum_{\kappa} \theta_{\kappa}$  - среднее значение полярного угла всех точек луча. Графики отобранных пар вместе с  $\bar{\theta}$  и

$$\bar{\sigma}_{\theta} = \sqrt{\frac{1}{\kappa} \sum_{\kappa} \theta_{\kappa}^2 - \bar{\theta}^2}$$

выдаются на печать, а все точки, входящие в пару, объединяются в один общий массив, переводятся в  $x, y$ -координаты с помощью программ TRANS, RTXY и GOTOXY, использующих только что полученные калибровочные коэффициенты и карту поправок. Далее программа LSFLIN с помощью м.н.к. проводит по всем этим точкам прямую линию (если угловой коэффициент этой

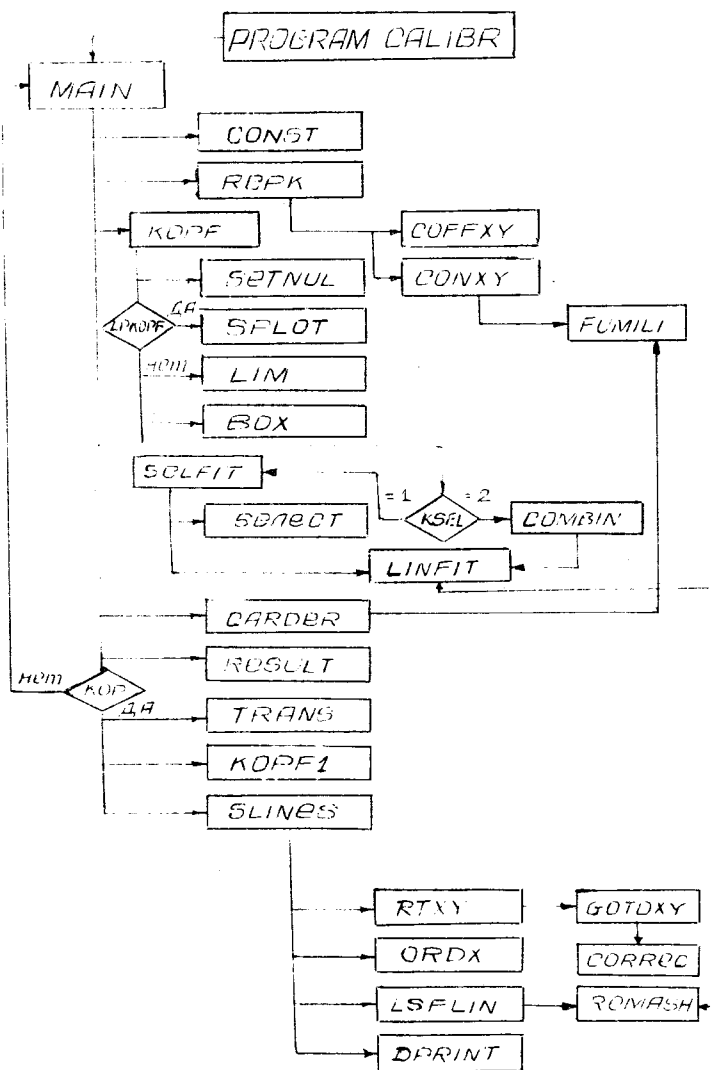


Рис. 4. Блок-схема программы CALIBR.

прямой превышает 9, то оси X и Y меняются местами, о чем выдается диагностика). При превышении среднеквадратичным разбросом  $\sigma_L$  порога в 20 мкм производится выброс максимально отстоящей точки, повторяющийся либо до уменьшения  $\sigma_L$ , либо до сокращения числа точек до 8. Если и при 8 точках  $\sigma_L$  велико, выдается диагностика "мало точек в прямой линии". По окончании программы PRINT печатает график отклонений оси  $\Delta y$  от прямой линии (упорядоченных программой ORDX по возрастанию  $x$ ) и параметры прямой. На рис.4 приведена блок-схема программы CALIBR. Порядок следования подпрограмм по вертикали сверху вниз определяет очередность их вызова. Большинство из них вызывается последовательно по одному разу для каждого рекорда сканирования, кроме программ LIM, BOX, COMBIN, которые вызываются для каждого рекорда 45 раз, т.е. для каждого креста. Программы CONST, RBPk, CARDER, RESULT вызываются один раз для данной калибровки. Программа SPLOT работает по ключу LKOPF =2, если возникнет необходимость посмотреть изображение крестов на калибровочной пластине в R-,  $\theta$ -координатах.

#### Заключение

Результаты модернизации программы CALIBR, проводимой постепенно в процессе эксплуатации СИ, проверялись при проведении еженедельных калибровок. Включение в процедуру этих калибровок сканирования прямой линии и ее последующей обработки по программе SLINES позволило увеличить надежность СИ и оперативно устранять возникающие неполадки в его работе. Введение нового алгоритма поиска центров крестов и более удачная программная организация CALIBR сократили на 20-30 сек время обработки данных каждой калибровки, а более точные формулы для вычисления ошибок способствовали повышению точности измерений в среднем на 2-3 микрона.

Значительно улучшена сервисная часть программы, что упростило ее эксплуатацию.

В приложениях дан список общих блоков COMMON с перечислением основных переменных, используемых в программе CALIBR, а также значения ключей печати.

Авторы благодарят В.М.Котова и А.Е.Селиганова за полезные обсуждения, коллективы операторов СИ и БЭСМ-6 за своевременное проведение калибровочных измерений и расчетов.

Приложение I

ОБЩИЕ БЛОКИ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ

COMMON /IDP/ M2 (100) - паспорт одного рекорда сканирования калибровочной плиты

COMMON /B1/ IDIG (4000) - массив данных (в единицах отсчета), полученный со спирального измерителя

COMMON /A2/ CROSS (6000) - массив  $R, \theta$  в мм и радианах (переформированный массив IDIG)

COMMON /XUSK/ XUSK (90) - массив X, Y центров крестов на калибровочной пластине

COMMON /KT/ KT, KT2 - количество точек и удвоенное количество точек при сканировании КП

COMMON /LDATE/ LDATE - дата калибровки (день, месяц)

COMMON /OTL/, LPRINT/, /LPKOFF/, LPCARD/, LPRINB/, LPCOMB/, /LRIS/ - ключи для дополнительной печати (см. выше)

COMMON /KPLIN/ KPLIN - количество прямых линий в данной калибровке

COMMON /A1/ SIGMXY (90), CENTR2(90) - массив ошибок ( $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ ) и массив полярных координат центров крестов ( $R_c, \theta_c$ )

COMMON /RES/ RESMAP (90) - карта поправок  $dx, dy$  для всех крестов калибровочной пластины

COMMON /A7/ ALFA - половина меньшего угла между ветвями креста

COMMON /EKOR1/ EKOR1, KR  
EKOR1 - промежуточная величина для вычисления  $\theta_{kor}$   
KR - количество рекордов в одной калибровке

COMMON /WEIGHT/ WEIGHT (90) - массив весов для вычисления средних значений координат центров крестов

COMMON /XUSC/ XUA(90), SCA(90) - промежуточные значения декартовых координат,  $\sin$  и  $\cos$  полярных углов каждого креста.

ОБЩИЕ БЛОКИ ПРОГРАММ ПО ОБРАБОТКЕ КАЛИБРОВОЧНОЙ ПЛАСТИНЫ

COMMON /XY/ XY(50) - массив точек, относящихся к данному кресту

COMMON /A4/ I, K3, EKOR

I - переменная цикла по количеству крестов

K3 - удвоенное количество точек, составляющих крест

$\theta_{kor}$  -  $\theta$  корректирующее

COMMON /PI/ PI, PI2, PIF, PIT

PI=3.1415926536; PI2=PI\*2; PIF=PI/4.; PIT=PI/2

COMMON /TNA/ TNA, TN2

TNA=  $tg \alpha$  TN2=  $tg^2 \alpha$

где  $\alpha$  определено в COMMON /A7/

COMMON /RNF/ RN, RF, EN1, EN2, EF1, EF2, RCK, ECK

RN, RF - начальное и конечное значения радиуса ветвей креста

EN1, EN2, EF1, EF2 - приближенные значения величины угла между ветвями креста

RCK, ECK - полярные координаты центра креста

COMMON /SCALFA/ S1ALFA, S2ALFA -  $\sin \alpha$  и  $\cos \alpha$

COMMON /RCE/ RCENTR, ECENTR - полярные координаты центрального креста

COMMON /XCYC/ XC, YC - координаты X, Y центрального креста

COMMON /PAR/ R0, TH0, MR, M0, X00, Y00

R0, TH0 - начальный радиус и начальное значение  $\theta$

MR, M0 - поправочные множители масштаба по R и  $\theta$

X00, Y00 - смещение центра по осям X и Y

COMMON /SC2AL/ S2ALF, C2ALF -  $\sin 2\alpha$ ,  $\cos 2\alpha$

COMMON /F0/ F - угол поворота при переходе из полярной системы в декартову

COMMON /KRV/ KRV - количество рекордов, выпавших из-за плохих измерений

COMMON /NVL/ NVL - обратная перемотка ленты

COMMON /RN/ RN, EN - константы для перевода из единиц отсчета в мм и радианы

COMMON /BAD/ IBAD - переключатель для выброса плохо измеренного креста

COMMON /A6/ AD, ND, UN, LT

AD=3 - длина половины плеча креста

ND=11 - число интервалов при гистограммировании

UN - не используется

LT=4 - минимальное значение числа точек в кресте



ОБЩИЕ БЛОКИ ПРОГРАММ ПО ОБРАБОТКЕ РЕПЕРНЫХ КРЕСТОВ

COMMON/CRK/CR, NC, JRK

CR=NC - количество используемых рекордов

JRK - количество реперных крестов

COMMON/AR/AR(14) - идеальные X,Y координаты реперных крестов на калибровочной пластине

COMMON/FID/FIDXY(60) - X,Y - координаты реперных крестов, взятые из паспорта

COMMON/ALRK/ S(14), S2(14), RMK(5)

S(14) - средние значения координат реперных крестов в мм

S2(14) - среднеквадратичные ошибки при измерении реперных крестов

RMK(5) - массив для вычисления расстояния между крестами вдоль осей X и Y

COMMON /XYV/ XYV (10) - X,Y координаты вершины центрального креста

COMMON /SVX/ SVX, SVY - среднее значение XYV

COMMON /PS/ PS - допустимый порог для среднеквадратичных отклонений

COMMON /A/, /PL/, /EXDA/, /NED/, /SIGMA/ -

- общие блоки, необходимые для работы программы FUMILI

COMMON /CON/ X<sub>3</sub>, Y<sub>3</sub>, A<sub>0</sub>, B, C, D - коэффициенты преобразования системы X,Y координат СИ и калибровочной пластины

COMMON / SWITCH/ KL - ключ для обращения к FUMILI

Приложение 2

ЗНАЧЕНИЯ КЛЮЧЕЙ ПЕЧАТИ

LPRINT=2 - выдвзется на печать координаты найденных центров крестов ( $X_c, Y_c$ ) и ( $R_c, \theta_c$ ) из программы LIM

LPKOPF=2 - выдвзется массив CROSS и рисунок всех крестов после сканирования из программы KOPF

LPCARD=2 - выдвзется массив EXDA - исходная информация для FUMILI из программы CARDER

LPRINB=2 - печать точек, принадлежащих данному кресту из программы BOX

LFP=2 - выдача результатов на перфокарты

LRIS=2 - делает LPKOPF=2 для прямой линии

LPCOMB=2 - промежуточная печать в программе COMVIN  
При установке ключей в I печати не производится.

Литература

1. В.Е.Комолога, Г.А.Ососков. ОИЛИ, IO-643I, Дубна, 1972.
2. Г.А.Ососков. ОИЛИ, 5-9787, Дубна, 1976.
3. Г.А.Ососков. Материалы семинара по обработке физической информации. Изд. ВМ, Ереван, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 января 1978 года.