

Б. А. НОВАКОВСКИЙ

## ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕЛЬСИНОВ В КОНСТРУКЦИЯХ УСТРОЙСТВ ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ АЭРОСНИМКОВ

Электронно-механическое коррекционное устройство, предназначенное для исправления координат точек аэроснимка за углы  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  и превышение правого конца базиса над левым —  $b_z$ , работает на индуктивных датчиках-сельсинах. Электронно-механический корректор совместно с высокоточной измерительной частью типа стереокомпаратора представляет собой универсальный стереофотограмметрический прибор. Измерительная часть позволяет при визировании на лобовую точку обрабатываемого аэроснимка непрерывно вводить данные (координаты) в коррекционное устройство, а также принимать обрабатываемые корректором поправки  $\Delta x$  и  $\Delta y$ . Аналитическое выражение поправок следующее:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \frac{X_t \cdot X}{f} \sin \alpha_x + \frac{X_t \cdot Y}{f} \sin \alpha_y, \\ \Delta y &= \frac{Y_t \cdot X}{f} \sin \alpha_x + \frac{Y_t \cdot Y}{f} \sin \alpha_y. \end{aligned} \quad (1)$$

Теория устройства приводится в статье доц. Г. Д. Федорука «Электронно-механическое устройство трансформирования координат точек снимка». Автор статьи принимал участие в создании макета электронно-механического устройства и провел предварительные его исследования.

### § 1. Конструктивное решение и функциональная взаимосвязь узлов

Измерительная часть (стереокомпаратор) схематически показана на рис. 1. На станине прибора размещена общая каретка  $X$ , на которой находятся две каретки  $\Delta x$  и  $\Delta y$  для отработки дифференциальных движений. Снимок закладывается в кассету, которая закреплена на каретке  $\Delta y$ . На каретке  $Y$  покоится часть наблюдательной системы. Все сельсины (датчики и приемники) как на рис. 1, так и на рис. 2 условно обозначены прямоугольниками. Причем, если прямоугольник черный — сельсины установлены неподвижно на соответствующей станине, если светлый — сельсины установлены на соответствующей каретке и перемещаются вместе с ней.

Сельсин-датчик  $X$ , передает движение общей каретки  $X$ , а сельсин-датчик  $Y$  передает суммарное перемещение каретки  $\Delta x$ .  $D-Y$  фиксирует перемещение каретки  $Y$  наблюдательной системы, а  $D-Y$  — совместное перемещение каретки  $\Delta y$  и наблюдательной системы. Для сельсина-датчика  $Y$  предусмотрены дополнительные направляющие, которые служат для развязки его перемещений от перемещений каретки  $X$  и  $\Delta x$ .  $\Pi-\Delta x$  и  $\Pi-\Delta y$  принимают движения, обрабатываемые собственно электронно-механическим корректором.

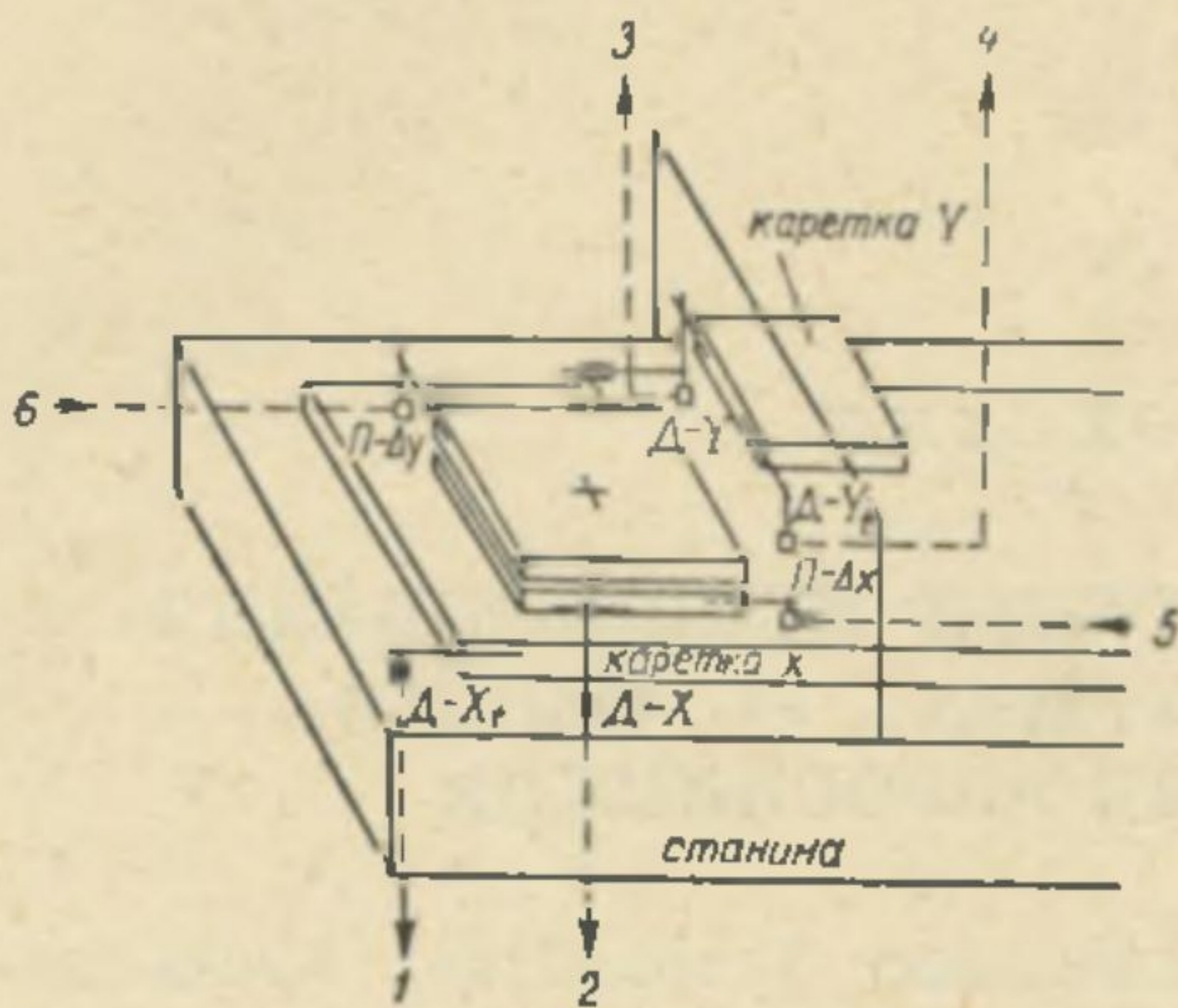


Рис. 1.

Электронно-механический корректор (рис. 2) состоит из двух узлов: узла линеек  $\gamma_1; \gamma_2$  (рис. 2, а) и узла угольников (рис. 2, б). Электронная связь всех элементов корректора условно обозначена штриховыми линиями с соответствующими стрелками и цифрами. Узел линеек служит для обработки углов  $\psi_1$  и  $\psi_2$  в функции координат  $X$  и  $Y$  и углов  $\gamma_1; \gamma_2$ . Углы  $\gamma_1; \gamma_2$  устанавливаются от руки в процессе ориентирования.

Координаты  $X$  и  $Y$  обрабатываются сельсинами-приемниками  $\Pi-X$  и  $\Pi-Y$ , при работе которых линейки углов  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  перемещаются вдоль направляющих на величины  $X$  и  $Y$  от своего начального положения. При перемещении линеек углов  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  происходит наклон линеек углов  $\psi_1$  и  $\psi_2$ , которые укреплены неподвижно. Отработанные углы

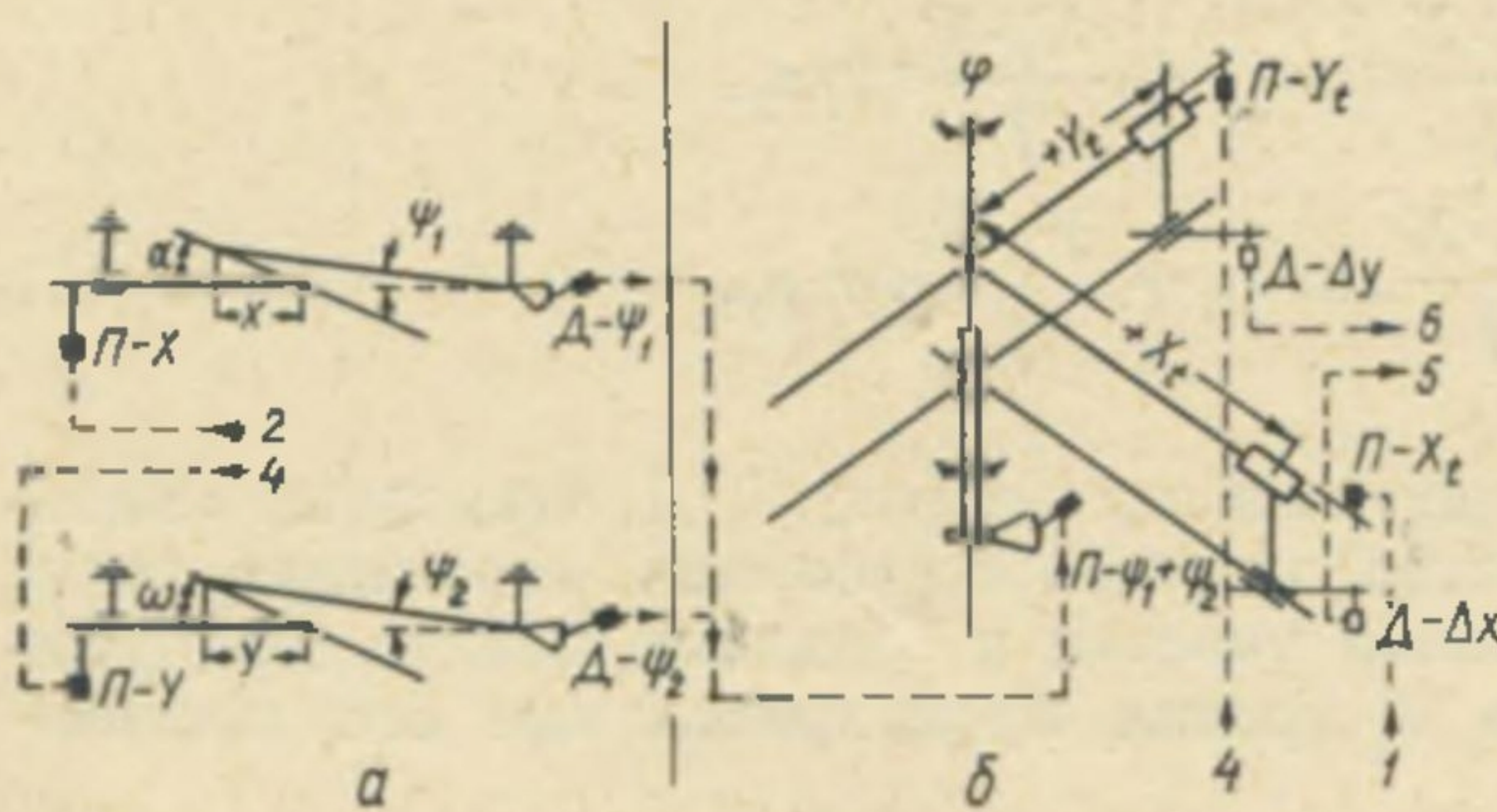


Рис. 2.

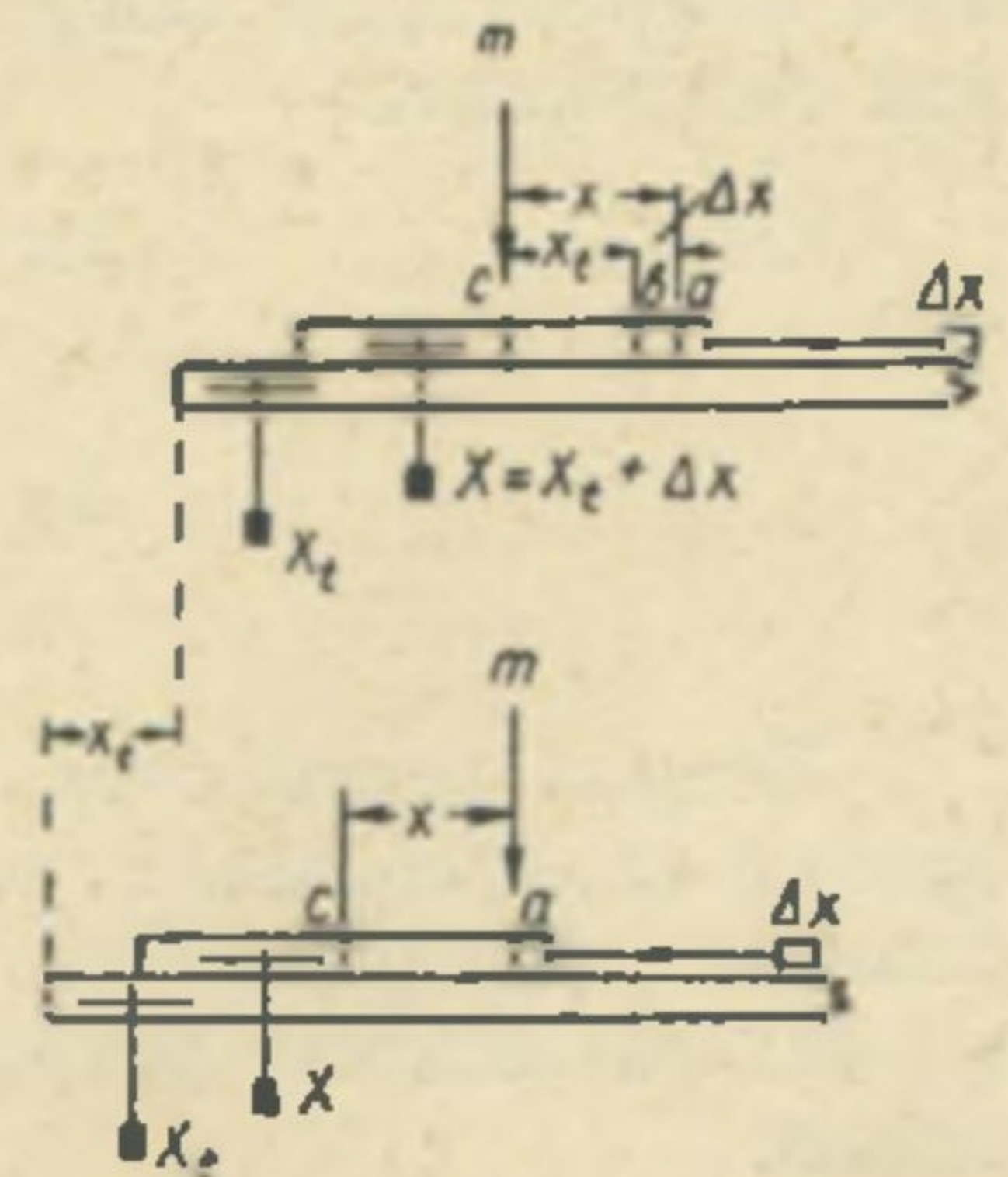


Рис. 3.

$\psi_1$  и  $\psi_2$  алгебраически суммируются сумматором, работающим на дифференциальном сельсине, и суммарный угол обрабатывается  $\Pi-\psi_1+\psi_2$ , установленным в узле угольников. Согласно теории, связь линейки угла  $\gamma_1$  с линейкой угла  $\psi_1$  должна осуществляться посредством общей ползушки, передвигающейся вдоль оси  $Y$ . Для упрощения конструкции эта связь осуществлена с помощью ролика, укрепленного на конце линейки угла  $\psi_1$ . Ролик постоянно контактирует с линейкой угла  $\gamma_1$ .

Узел угольников непосредственно обрабатывает поправки  $\Delta x$  и  $\Delta y$  в функции координат  $X_i$  и  $Y_i$  и суммарного угла  $\psi_1+\psi_2$ . Верхний угольник неподвижен и выполняет роль направляющих, по которым от сельсинов-приемников передвигаются каретки с сельсинами-датчиками

$\Delta x$  и  $\Delta y$ . Сельсины-датчики  $\Delta x$  и  $\Delta y$  работают при повороте нижнего подвижного угольника на угол  $\psi_1 + \psi_2$ . Кроме того, нижний угольник имеет возможность дополнительно поворачиваться на постоянный угол  $\phi$ , что соответствует введению поправки  $b_2$ . Отработанные поправки  $\Delta x$  и  $\Delta y$  принимаются П- $\Delta x$  и П- $\Delta y$ , установленными на измерительной части прибора.

Работа устройства происходит по принципу текущей коррекции с обязательным наличием обратной связи между измерительной частью и корректором.

Сущность принципа текущей коррекции применительно к данному прибору показана на рис. 3. В начальный момент марка установлена над точкой нулевых искажений  $s$  снимка (см. верхнюю часть рис. 3). Корректор не отрабатывает поправки  $\Delta x$ , что будет иметь место при начале ориентирования, когда линейки  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  находятся в нулевых положениях. В этом случае при визировании на точку  $a$  снимка с координатой  $X = X_1 + \Delta x$  как общая каретка  $X$ , так и дифференциальная  $\Delta x$  пройдут одно и то же расстояние  $X$ . После завершения ориентирования линейки  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  корректора будут наклонены соответственно на углы  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , что вызовет отработку поправок  $\Delta x$  и  $\Delta y$ . Тогда при визировании на точку  $a$  снимка (см. нижнюю часть рис. 3) одновременно дифференциальная каретка пройдет расстояние  $X$ , а общая каретка — расстояние  $X_1$ , что соответствует конечной цели работы электронно-механического корректора. Те же рассуждения справедливы и для второй оси —  $Y$ .

## § 2. Сельсинная следящая система

Передача движений и взаимосвязь всех узлов электронно-механического корректора обеспечивается следящей системой, работающей на сельсинах. Сельсины включены в трансформаторном режиме.

Принцип работы сельсина в трансформаторном режиме основан на том, что при повороте его ротора относительно статора коэффициент взаимоиנדукции между обмотками ротора и статора меняется по закону синуса или косинуса угла поворота ротора, вследствие чего и электродвижущая сила, наводимая во вторичных обмотках, также следует закону синуса или косинуса угла поворота ротора.

Принципиальная схема дистанционной передачи представлена на рис. 4. При включении ротора датчика в однофазную сеть переменного тока в его обмотке будет протекать ток, в результате чего в магнитной системе датчика возникает пульсирующий магнитный поток  $\Phi$ , магнитная ось которого совпадает с осью обмотки ротора датчика. Поток  $\Phi$ , сцепляясь с витками обмотки статора, наводит в фазах обмотки электродвижущие силы, одинаковые по фазе (во времени), и пропорциональные величины проекции вектора потока  $\Phi$  на ось каждой из фаз обмотки:

$$\begin{aligned} e_1 &= k W_1 \Phi \cos \alpha, \\ e_2 &= k W_2 \Phi \cos (120^\circ + \alpha), \\ e_3 &= k W_3 \Phi \cos (240^\circ + \alpha), \end{aligned}$$

где  $W_1 = W_2 = W_3$  — число витков в фазе обмотки статора;  $\alpha$  — угол между осью потока  $\Phi$  и осью фазы первой обмотки статора.

При подключении к статору датчика статора приемника в фазах их обмоток будут протекать токи  $i_1, i_2, i_3$ , пропорциональные соответственно э. д. с.  $e_1, e_2, e_3$ , так как статор приемника является симметрич-

ной нагрузкой (при разомкнутом роторе). Токи  $i_1, i_2, i_3$  создадут в магнитной системе приемника магнитные потоки  $\Phi'_1, \Phi'_2, \Phi'_3$ , соответственно пропорциональные потокам статора датчика  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$ . В результате геометрического сложения потоков приемника  $\Phi'_1, \Phi'_2, \Phi'_3$  будет действовать результирующий вектор потока  $\Phi'$ , пропорциональный вектору потока датчика  $\Phi$  и аналогично расположенный, то есть повернутый на угол  $\alpha$  относительно фазы первой обмотки статора приемника.

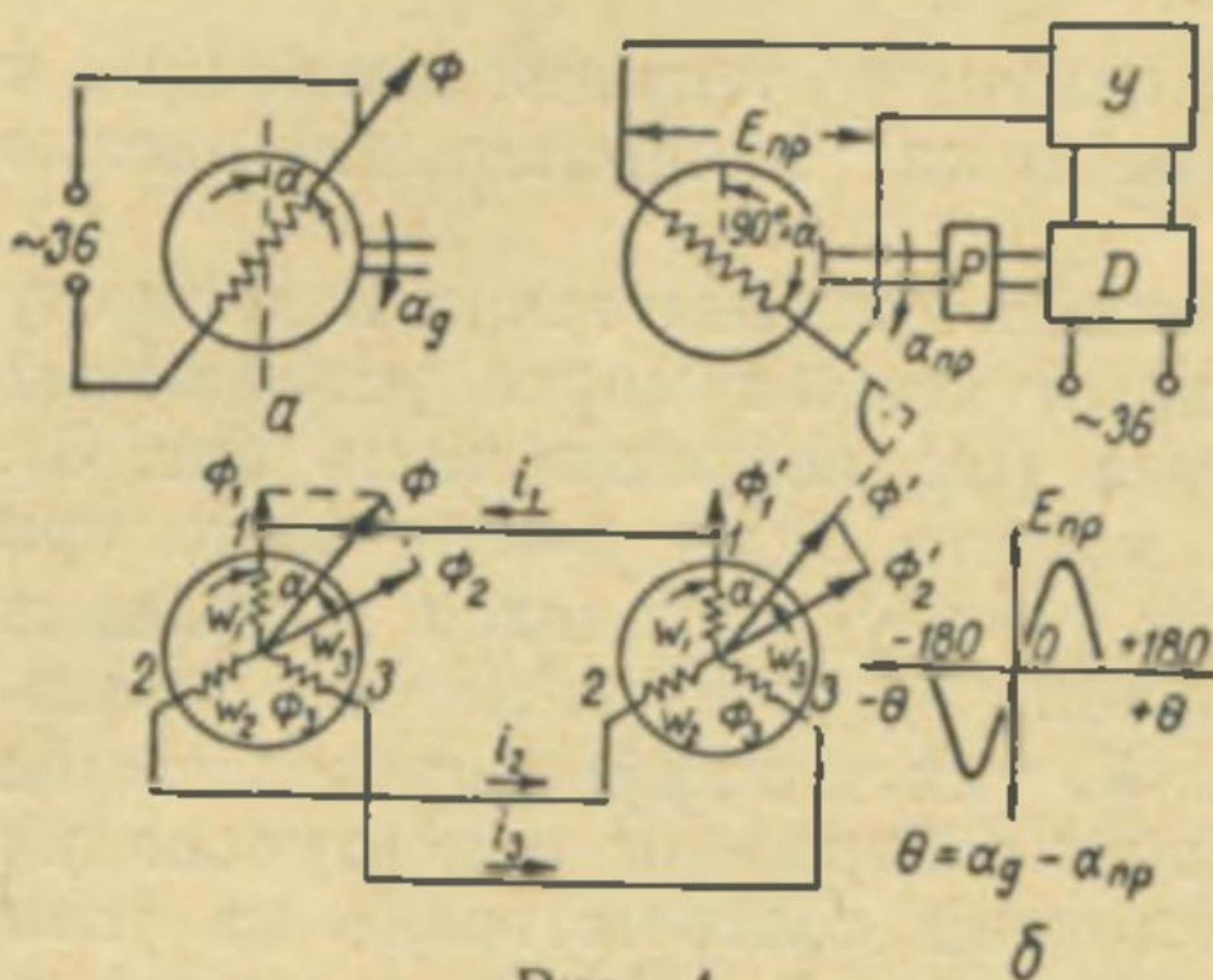


Рис. 4.

тока  $\Phi'$ . Это положение в трансформаторных схемах дистанционной передачи принято считать согласованным.

При рассогласовании системы в обмотке ротора приемника наводится электродвижущая сила, которая меняется пропорционально синусу угла рассогласования:  $E_{пр} = k \sin \Theta$ , где  $\Theta = \alpha_d - \alpha_{пр}$ ;  $\alpha_d$  — угловое положение ротора датчика.

При рассогласовании системы в другую сторону э. д. с. обмотки ротора приемника изменится по фазе (во времени) на  $180^\circ$ . Зависимость  $E_{пр}$  от угла рассогласования представлена на рис. 4, б. Наличие э. д. с.  $E_{пр}$ , пропорциональной углу рассогласования, дает возможность производить автоматическую отработку ротора приемника в положение согласования. Для этого э. д. с.  $E_{пр}$ , предварительно усиленная с помощью усилителя, подается на управляющую обмотку отработывающего реверсивного двигателя  $D$ , ротор которого через механический редуктор соединяется с ротором приемника. Обмотка возбуждения двигателя подключается к сети. Отработывающий двигатель под действием приложенных к нему напряжений будет вращаться до положения, при котором  $E_{пр}$  равна нулю, то есть до согласованного положения.

Для дистанционной передачи координат  $X_i, X, Y_i, Y$  и поправок  $\Delta x, \Delta y$  в электронно-механическом корректоре использованы малогабаритные сельсины 1 и 2 классов точности. Напряжение питания  $\sim 36$  в, частота — 400 гц. Максимальные ошибки следования в минутах для различных диапазонов углов рассогласования приведены в таблице.

В качестве отработывающего двигателя применен малогабаритный двухфазный двигатель. Напряжение возбуждения  $\sim 36$  в, частота — 400 гц. Малые габариты элементов системы позволяют удобно располагать их в узлах корректора.

Питание системы с усилителями производится от сети переменного тока (генератор частоты  $\sim 115$  в, 400 гц) через силовой трансформатор с соответствующими обмотками и выпрямителями.

\* Практически в этом положении имеет место так называемое остаточное (нулевое) напряжение, которое обуславливается электромагнитной несимметрией системы, вызванной технологическими факторами.

Силовой трансформатор состоит из первичной и вторичной обмоток. Количество вторичных обмоток зависит от количества пар сельсинов. К первичной обмотке подводится напряжение сети  $\sim 115$  в, 400 гц.

Максимальные ошибки следования

Класс точности Углы $\alpha$	1	2
	$\pm 10^\circ$	$\pm 8'$
$\pm 30^\circ$	$\pm 12'$	$\pm 22'$
$\pm 180^\circ$	$\pm 15'$	$\pm 30'$

С вторичных обмоток снимаются напряжения (для одного канала): 1)  $\sim 6,3$  в — для питания накалов ламп усилителя; 2)  $\sim 36$  в — для питания сельсинов; 3)  $\sim 36$  в — для питания обмоток возбуждения двигателя; 4)  $\sim 220$  в — для питания анодов выходного каскада усилителя.

Для питания анодных цепей усилителя напряжения применен однопериодный выпрямитель (рис. 5), собранный на диодах Д7Ж. Для сглаживания пульсаций на выходе выпрямителя включен фильтр, состоящий из сопротивления и емкости.

Сигнал, поступающий из сельсина приемника, перед подачей его на исполнительный двигатель усиливается усилителем (см. рис. 6). Усиление осуществляется двумя каскадами на лампах 6Н1П. Питание первых двух каскадов осуществляется от выпрямителя. Выходной каскад усилителя смонтирован на лампе 6Н12П. Питание анодов и накала усилителя мощности осуществляется от обмоток силового трансформатора.

Усиление напряжения происходит следующим образом. Сигнал подается на сетку и катод первого каскада усилителя (левая половина лампы  $L_1$ ).  $R_1$  является сопротивлением утечки. Для устранения самовозбуждения по входу между сеткой и катодом включена емкость  $C_1$ .  $R_2$  является нагрузкой в цепи анода (левая половина лампы  $L_1$ ). Усиленное напряжение через разделительный конденсатор  $C_2$  подается на сетку и катод второго каскада усилителя (правая половина лампы  $L_1$ ). Нагрузкой для второго каскада служит сопротивление  $R_3$ , а  $R_4$  является сопротивлением утечки. Со второго каскада усиленное напряжение через разделительный конденсатор  $C_3$  подается на сетку усилителя мощности, выполняющего одновременно и функции фазочувствительного каскада. Сопротивление  $R_5$  служит утечкой в цепи сетки, а также через него подается смещение — 14 в.

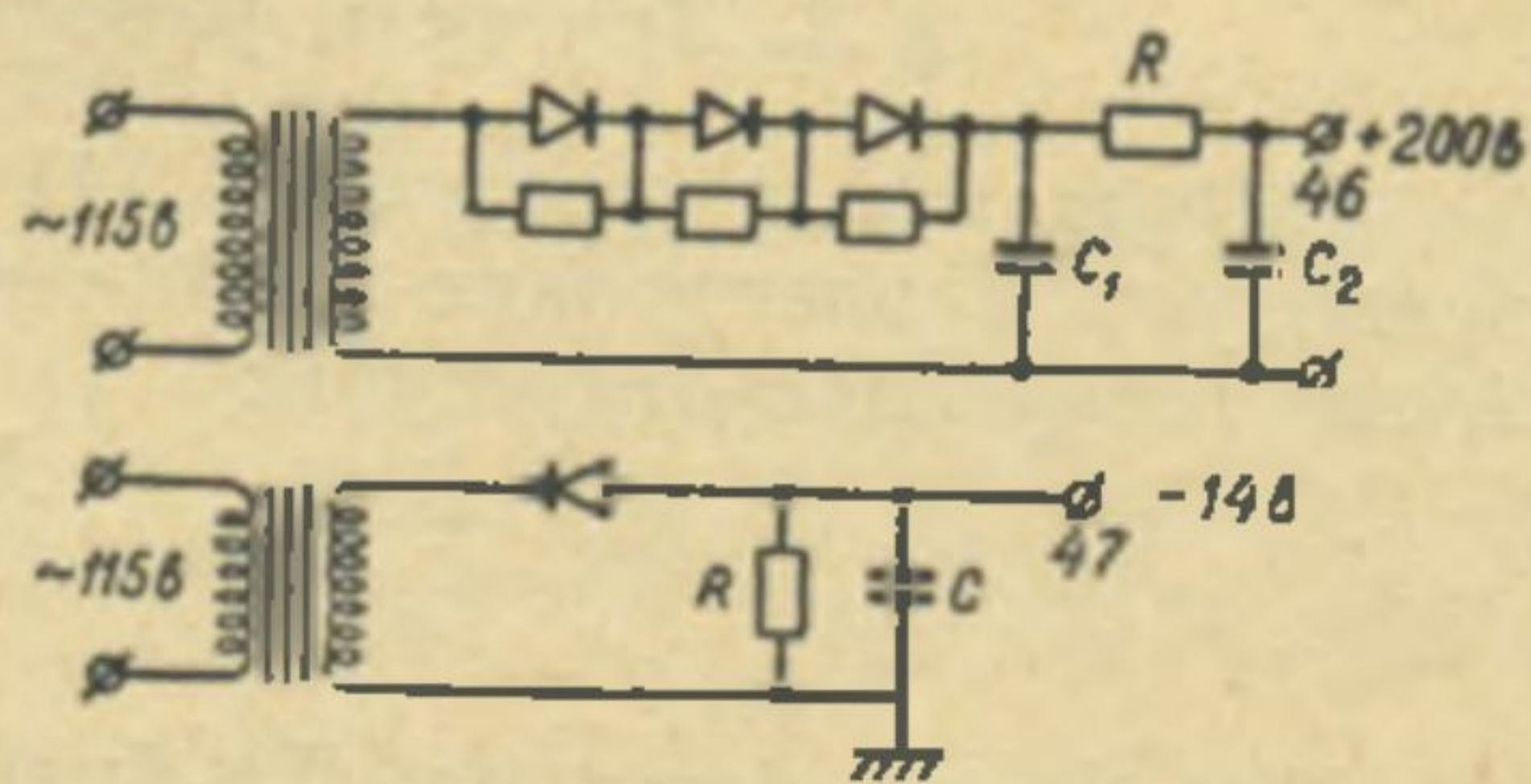


Рис. 5.

Напряжение на анодах лампы  $L_2$  находится в противофазе. На сетку усилителя мощности поступает переменное напряжение, усиленное вторым каскадом. В зависимости от совпадения по фазе напряжения на сетке с напряжением на анодах лампы  $L_2$ , проводимости каждой из половин этой лампы будут различны. В соответствии с этим различны будут и токи, протекающие по управляющим обмоткам двигателя.

При отсутствии сигнала на сетке лампы  $L_2$  обмотку двигателя обтекают токи, равные по величине, и двигатель находится в покое. При появлении сигнала двигатель начинает вращаться в ту или иную сторону. Если изменится полярность сигнала, направление вращения двигателя также меняется.

Сложение углов  $\psi_1$  и  $\psi_2$  производится с помощью дифференциальной схемы включения сельсинов в трансформаторном режиме. Схема представлена на рис. 7, где  $D$  — сельсин-датчик,  $\Pi$  — сельсин-приемник,  $DC$  — дифферен-

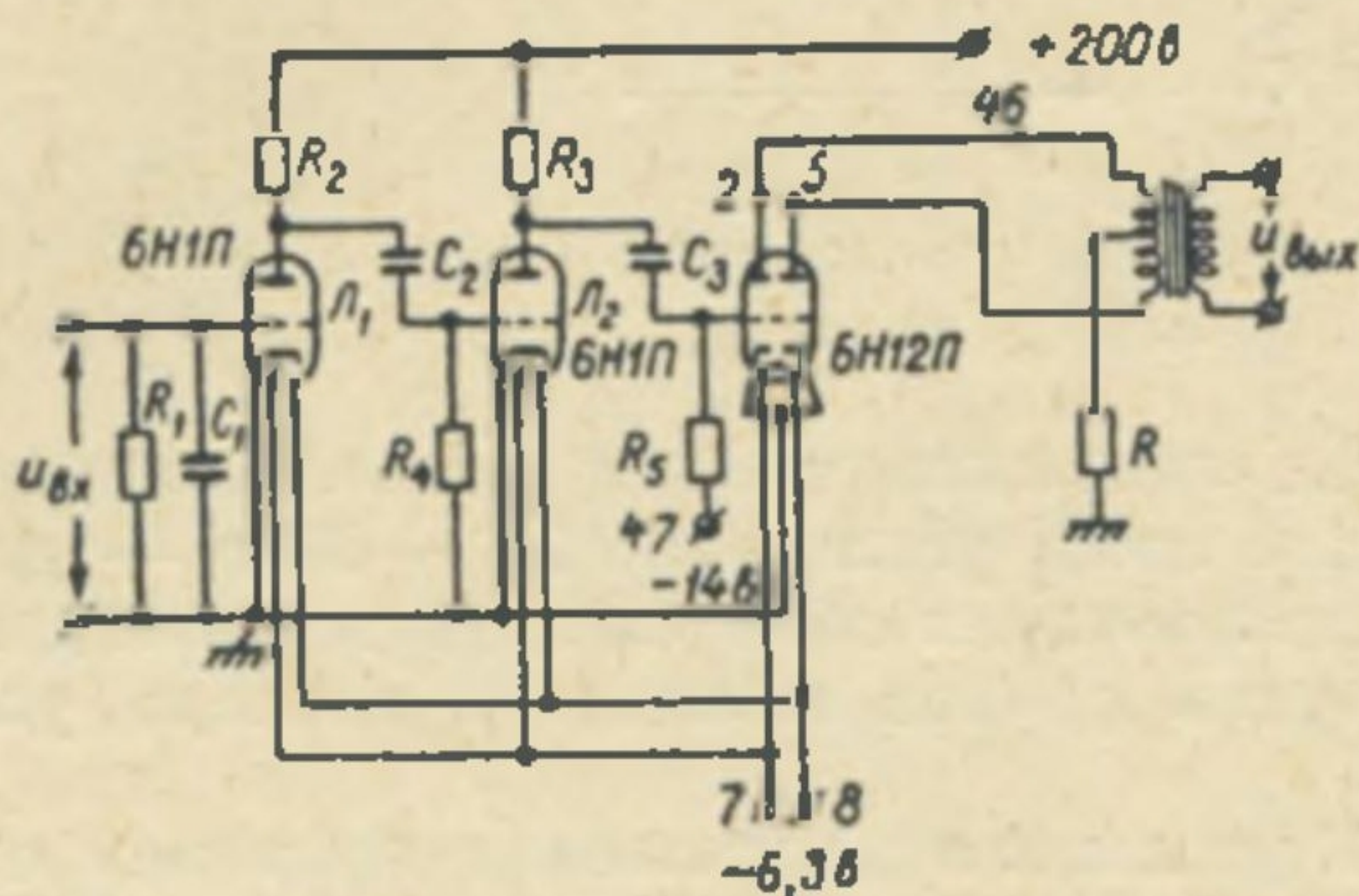


Рис. 6.

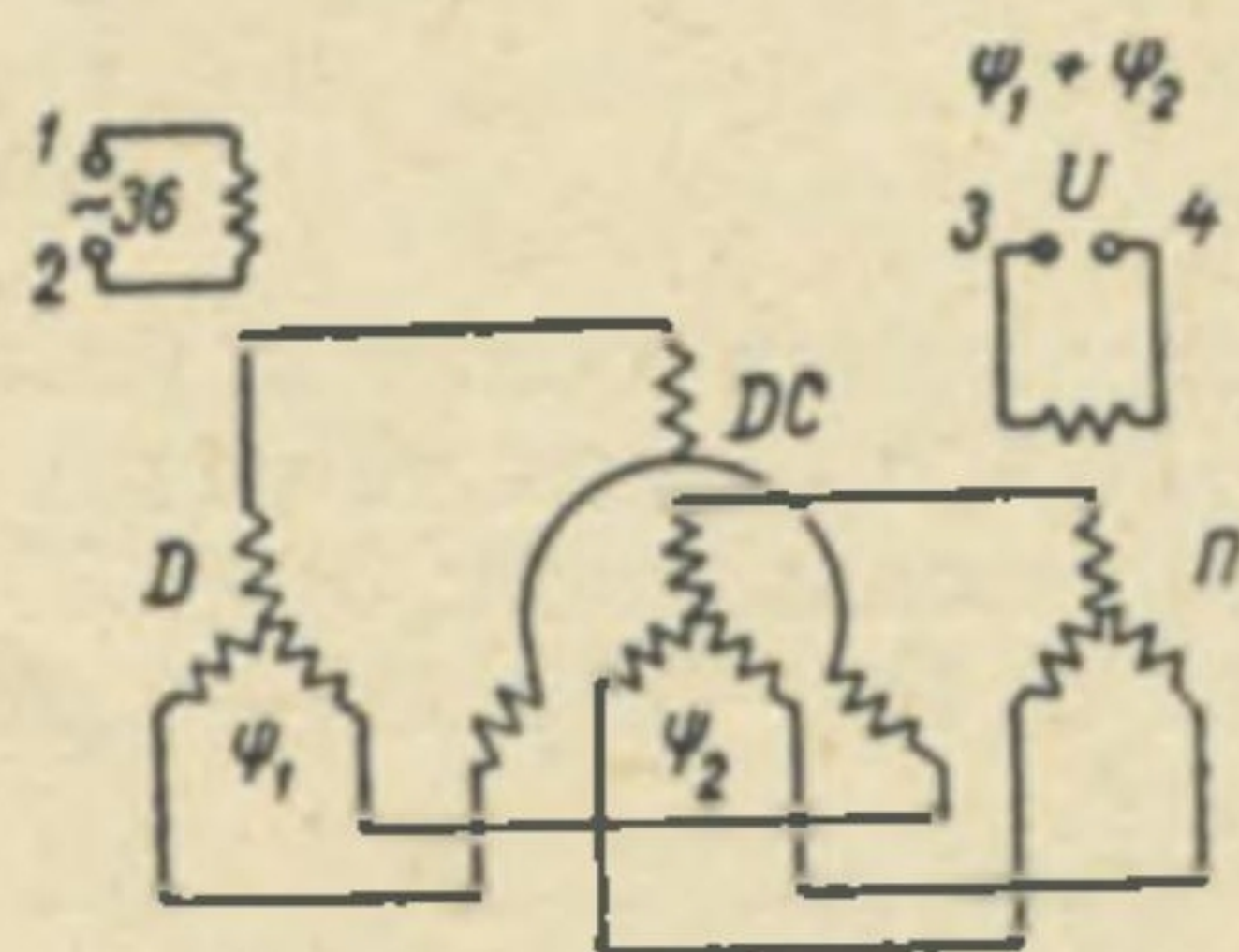


Рис. 7.

циальный сельсин. Датчиком угла  $\psi_1$  в этой схеме является сельсин  $D$ , датчиком угла  $\psi_2$  — дифференциальный сельсин  $DC$ . Угол  $\psi_2$  вводится поворотом ротора сельсина  $DC$ . Со статорной обмотки приемника  $\Pi$  снимается напряжение  $U$  (клеммы 3 и 4), пропорциональное сумме или разности угловых перемещений роторов датчиков.

Суммарное напряжение  $U$  через усилитель подается на исполнительный двигатель, который связан с ротором сельсина  $\Pi$  механическим редуктором. Система приемник—усилитель—двигатель—приемник полностью идентична ранее описанной системе, которая используется для дистанционной передачи отрезков.

### § 3. Точность работы элементов корректора

Обращаясь к формулам (1) видим, что основной зависимостью, реализуемой электронно-механическим корректором, является зависимость следующей структуры:

$$\Delta x_1 = \frac{X_t \cdot X}{f} \cdot \sin \alpha. \quad (2)$$

При  $X_t = X$  формула (2) будет иметь вид:

$$\Delta x_1 = \frac{X^2}{f} \cdot \sin \alpha. \quad (2')$$

Определим допустимую ошибку введения в корректор координаты  $X$  ( $X_t, Y, Y_t$ ) при заданной точности отработки поправки  $\Delta x_1$ . Для этого продифференцируем (2') по переменным  $\Delta x_1$  и  $X$ . Получим

$$dX = \frac{f \cdot d(\Delta x)}{2X \cdot \sin \alpha}.$$

При  $f = 100$  мм,  $X = 70$  мм,  $\sin \alpha = \frac{\alpha}{\rho'} = \frac{180'}{3500}$  и  $d(\Delta x) = 0,01$  мм получим ошибку  $dX \approx 0,1$  мм. Следовательно, конструкция корректора дол-

жна обеспечивать введение координат  $X, X_1, Y$  и  $Y_1$  с точностью порядка 0,1 мм и вывод поправок  $\Delta x, \Delta y$  с точностью порядка 0,01 мм.

Нетрудно показать, что сельсины, точность которых приведена в таблице 1 (см. § 2), могут вполне обеспечить допуски точностей, используемых в фотограмметрии.

Ошибки линейных обработок, обусловленные ошибками следования сельсинов, могут быть представлены следующей зависимостью:

$$\Delta l = \frac{\pi D}{21600} \Delta \mu',$$

где  $D$  — диаметр рабочих шестерен датчика и приемника (они должны быть равны);

$\Delta \mu'$  — ошибки следования сельсинов (см. таблицу);

$\Delta l$  — линейная ошибка.

Используя формулу

$$D = \frac{21600}{\pi \cdot \Delta \mu'} \Delta l, \quad (3)$$

можно заранее рассчитать диаметр рабочих шестерен. Для отработки величин  $\Delta x$  и  $\Delta y$  использованы сельсины I класса точности. Следует заметить, что при отработке  $\Delta x$  и  $\Delta y$  угол рассогласования не превысит  $\pm 10^\circ$ . Подставляя в формулу (3)  $\Delta l = d(\Delta x) = 0,01$  мм и  $\Delta \mu' = 8'$ , получим

$$D \Delta x, \Delta y \leq 9 \text{ мм.}$$

Для передачи координат  $X_1, X, Y_1, Y$  использованы сельсины 2 класса точности. Подставив в (3)  $\Delta l = dX = 0,1$  мм,  $\Delta \mu' = 30'$ , будем иметь:

$$D x, y \leq 23 \text{ мм.}$$

Шестерни указанных диаметров применены в корректоре.

Далее, дифференцируя формулу (2') по переменным  $\Delta x_1$  и  $\alpha$ , получим допустимую ошибку отработки углов  $\alpha$  и  $\omega^*$  алгебраическим сумматором на дифференциальном сельсине.

$$d\alpha = \frac{f \cdot d(\Delta x)}{X^2 \cdot \cos \alpha}.$$

При  $f = 100$  мм,  $X = 70$  мм,  $\alpha = 3^\circ$  и  $d(\Delta x) = 0,01$  мм получим ошибку  $d\alpha \approx 1'$ .

Проведенные исследования точности работы сумматора углов показали, что максимальная ошибка при отработке угла не превышала  $20' - 25'$ . Исследования производились на специальном макете, снабженном круговыми шкалами.

Получение допустимой ошибки отработки углов в корректоре, не превышающей  $1'$ , достигнуто применением редукции углов. Углы  $\psi_1$  и  $\psi_2$  перед подачей на роторы датчиков сумматора углов увеличиваются в 30 раз механическим редуктором, состоящим из двух шестерен с соотношением 1/30. В то же время суммарный угол  $\psi_1 + \psi_2$  перед подачей его на вал узла угольников уменьшается в 30 раз механическим редуктором с тем же соотношением.

#### § 4. Результаты испытаний

Проведены предварительные испытания, которые позволяют оценить точность работы сельсинной следящей системы как в динамическом, так и в статическом режимах.

\* Согласно теории корректора при  $\bar{r} = f = X - a_x = \gamma_1 = \psi_1$ .

Сущность испытаний показана на рис. 8, где изображена измерительная сетка, заложенная в кассету прибора. Пусть сельсин-датчик установлен на каретке  $Y$  прибора, величина перемещений которой фиксируется индикатором с ценой деления  $0,01$  мм. Сельсин-приемник установлен на дифференциальной каретке  $\Delta y$  так, что повторение движений каретки  $Y$  кареткой  $\Delta y$  происходило в одну и ту же сторону.

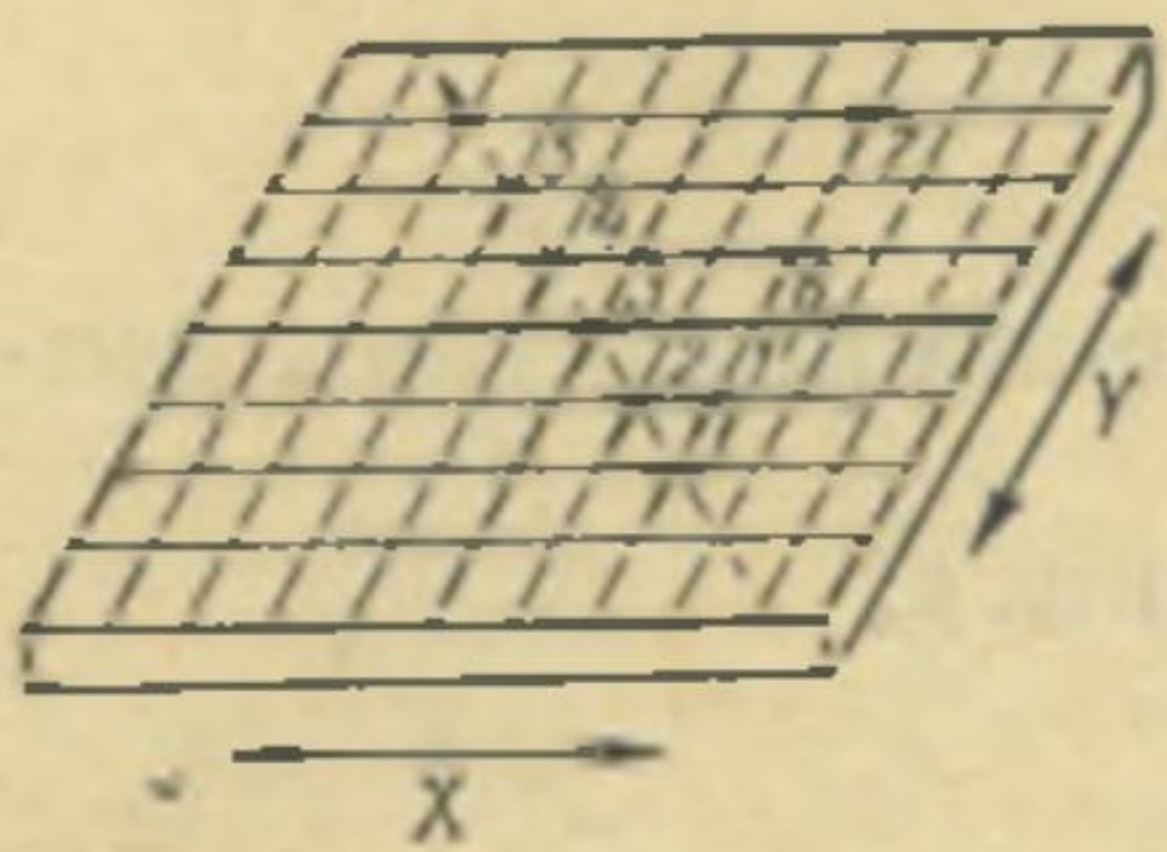


Рис. 8.

В начальный момент измерительная марка совмещена с перекрестием 6 сетки, а на индикаторе установлен нулевой отсчет. При перемещении каретки  $Y$  на величину  $5$  мм визирная марка точно совмещалась с перекрестием 7 сетки, то есть происходит точное повторение с удвоением величины перемещения каретки  $Y$ . Полученный результат позволяет сделать вывод о высокой точности работы сельсинной следящей системы в статическом режиме.

Точность работы в динамическом режиме проверялась без использования индикатора, только по измерительной сетке. Сельсин-датчик устанавливался на каретке  $Y$ , а сельсин-приемник — на дифференциальной каретке  $\Delta x$ . При отключении датчика от приемника и перемещении каретки  $Y$  измерительная марка будет последовательно занимать положение 1, 1', 6 и 7. Было замечено, что при совместной работе датчика и приемника марка последовательно занимала положения 1, 2, 3, 4, 5 на измерительной сетке. Причем, крест марки очень точно накладывался на крест сетки. При данном увеличении оптической системы прибора какие-либо отклонения креста марки от креста сетки вообще не были замечены. Это говорит о высокой точности работы сельсинной следящей системы в динамическом режиме.

### Выводы

Результаты предварительных испытаний показали высокую точность работы системы, ее стабильность, безынерционность, надежность.

Сельсинные следящие системы, сельсины которых включены в трансформаторном режиме, имеют большие потенциальные возможности для решения многих задач, связанных с конструированием устройств трансформирования координат аэроснимков.

Работа поступила  
21 марта 1966 г.