

Если ток считывающего луча имеет значение, при котором за время прохождения строки трубка работает в условиях полного отбора вторичных электронов (участок *ab* на рис. 1.4), то при считывании в соответствии с рис. 1.45 происходит как бы копирование имевших место на мишени потенциальных рельефов и перенос их на уровень больших потенциалов. При этом считанный импульс, соответствующий пересечению строкой считывания потенциальной дорожки, не выделяется.

Однако описанной операцией можно сместить рабочую точку на рис. 1.4 в точку *б*. Собственно считывание начинается только после того, как рабочая точка сместится правее точки *б*.

Считанный импульс можно выделить двумя способами.

Первый из них состоит в повторном сканировании мишени считывающим лучом с током, достаточным для снятия потенциала зарядной дорожки.

Второй способ заключается в увеличении тока считывающего луча до значения, при котором не происходит полного отбора вторичных электронов.

При работе ЗЭЛТ, даже при больших скоростях записи иногда считанные импульсы выделяются как при первом сканировании мишени считывающим растром, так и при втором. Это означает, что ЗЭЛТ работает в режиме вблизи точки *б* характеристики на рис. 1.4, так как переход от участка *ab* к участку *бв* в трубках носит плавный характер. Для полного считывания импульсов необходимо увеличить ток считывающего луча или уменьшить потенциал коллектора.

Считывание однократным растром с током луча, превышающим значение, при котором нарушается полный отбор вторичных электронов, позволяет реализовать большие скорости записи и поэтому предпочтительнее многократного считывания.

Следующим важным достоинством принятого способа считывания является то, что он не требует точного установления начальной рабочей точки считывания (см. характеристику на рис. 1.4), а следовательно, и установления определенного тока считывающего луча. При считывании потенциал каждого элемента мишени по строке последовательно смещается от точки *a* к точке *б* в соответствии с зависимостью коэффициента вторичной эмиссии. При переходе точки *б* начинается считывание потенциальных рельефов, при этом считывание потенциалов с небольшим превышением уровня, соответствующего границе полного отбора вторичных электронов, осуществляется на более крутом начальном участке кривой, что равносильно некоторому усилению малых сигналов. Таким образом, рабочая точка устанавливается автоматически.

При пересечении считывающим лучом записанной дорожки на мишень возвращается дополнительное количество вторичных электронов, которые формируют ток считанного импульса i_c . Поэтому значение k (крутизны характеристики действующего коэффициента вторичной эмис-

сии) на начальном участке кривой зависимости при переходе точки *б* в σ раз больше, чем определяемое выражением (1.4).

Нанесение вспомогательного заряда происходит в два последовательных этапа.

Первый этап происходит при полном отборе вторичных электронов, при этом на мишени образуется потенциал приблизительно равный потенциалу зарядной дорожки. Значение этого потенциала $U_{в1}$ определяется в соответствии с выражением (1.5).

Второй этап нанесения заряда происходит со все увеличивающимся захватом вторичных электронов и потенциал мишени стремится к потенциалу, превышающему потенциал коллектора на $2U_H \ln \sigma$. При этом разность потенциалов между мишенью и коллектором после прохождения лучом по мишени изменяется по экспоненциальному закону [4]:

$$u_{в.м.к} = 2U_H \ln \left\{ \left[\exp \left(\frac{U_k - U_{в1}}{2U_H} \right) - \sigma \right] \exp \left(- \frac{I_c \Delta t_c}{2U_H C} \right) + \sigma \right\}$$

с постоянной времени

$$\tau = I_c / 2U_H C = R_i C.$$

Таким образом, при

$$\Delta t_c = U_{в1} C / I_c (\sigma - 1) + (3 - 5) \tau \quad (1.77)$$

нанесение вспомогательных зарядов можно считать закончившимся.

При считывании не надо доводить потенциал мишени до равновесного. Достаточно чтобы он превышал значение u_{min} в 2 ... 10 раз.

Значение емкости элемента мишени с размерами, определяемыми диаметром луча, можно найти по формуле для емкости диска, помещенного между двумя бесконечными параллельными плоскостями [24]:

$$\frac{C}{8\epsilon_0 \epsilon 2r_0} = 1 + \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{2}{\lambda} + \left(\frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{2}{\lambda} \right)^2 + \dots$$

$$\lambda = \frac{d}{r_0} \text{ см. 15}$$

1.9. Методика расчета режима работы ЗЭЛТ и параметров считанного импульса

Будем считать, что известны основные параметры ЗЭЛТ: l — толщина мишени; d — расстояние от поверхности мишени до коллектора; размеры рабочего поля мишени $L \cdot N$; σ — полный коэффициент вторичной эмиссии; значения токов и диаметров записывающего и считывающего лучей.

Так как известен требуемый коэффициент масштабного-временного преобразования K_m , то заданными можно считать также $t_{р.з}$ — длительность развертки записи и $T_{р.с}$ — длительность строчной развертки считывания. Угол между осью x и линией фронта сигнала может составлять 70° .

Необходимо определить: U_k — потенциал коллектора; I_c — ток считывающего луча; Δa — шаг считывания; i_c и $t_{с.и}$ — амплитуду и длительность считанного импульса соответственно.

Примем $\lambda = l/r_0 = 10$; $\delta = d/r_0 = 100$; $L = N = 5 \cdot 10^{-2}$ м; $\sigma = 4$; $I_{3max} = 100 \cdot 10^{-6}$ А; $r_{p.з} = r_{p.с} = 10^{-4}$ м; $\text{tg } 70^\circ = 2,7$.

1. Определяем минимальное значение η_0 записанной зарядной дорожки:

$$\eta_0 = \frac{I_{3max} 4r_0 t_{p.з} (\sigma - 1)}{\pi r_0^2 2,7L} = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 3}{3,14 \cdot 10^{-8} \cdot 2,7 \cdot 5 \cdot 10^{-2}} \approx 10^{-7} \text{ Кл/м}^2.$$

2. По известным значениям η_0 , λ и δ , используя результаты численных решений по определению E_t , представленные графически на рис. 1.23 и 1.25, находим $E_{tmax} = 7,6 \cdot 10^2$ В/м (данные расчетов получены при $\eta_0 = 10^{-6}$ Кл/м²); принимаем $E_{tmax} \approx 8 \cdot 10^2$ В/м.

3. Выбираем шаг считывания $\Delta\alpha = 5$. В этом случае строки считывания в растре отстоят друг от друга на расстоянии, немногим превышающим значение диаметра луча. Это позволяет получить 100 выборок преобразуемого сигнала, что в большинстве случаев является вполне достаточным, и вместе с тем использовать для расчетов данные, полученные для одной дорожки (рис. 1.42).

При выборе шага считывания $\Delta\alpha < 4$ необходимо пользоваться для расчетов суммарным значением составляющей $E_{tв.к}$, полученной при наложении близлежащих вспомогательных зарядов строк.

4. С учетом принятого шага считывания, в соответствии с рис. 1.43 и используя зависимости, приведенные на рис. 1.23, находим значение $E_{tв.к}$ вспомогательного заряда в точке, удаленной от оси симметрии зарядной дорожки на расстояние, равное $\Delta\alpha$ ($\beta = \Delta\alpha$).

В рассматриваемом случае согласно рис. 1.23 получаем

$$E_{tв.к}(\Delta\alpha) \approx 5E_{tmax}.$$

В соответствии с полученным соотношением находим $\eta_{во}$ вспомогательного заряда.

В частности, имеем

$$\eta_{во} = 5\eta_0 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м}^2.$$

5. По известному значению η_0 с использованием данных рис. 1.18 находим значение E_n в середине записанной дорожки, и принимаем напряженность поля коллектора $E_k < E_n$.

Из рис. 1.18 находим $E_n = 12 \cdot 10^2$ В/м. Задавшись значением $E_k \approx 0,5 E_n$ и воспользовавшись данными расчетов, приведенными в виде графических зависимостей на рис. 1.18, находим

$$E_k = 0,5 E_n = 6 \cdot 10^2 \text{ В/м.}$$

6. С учетом выражения (1.63) находим значение потенциала коллектора U_k .

В данном случае

$$U_k = E_k (l/\epsilon_1 + d) = 6 \cdot 10^2 \left(\frac{10^{-3}}{8} + 10^{-2} \right) \approx 6 \text{ В.}$$

7. Находим установившееся значение потенциала мишени

$$U_{м.у} = U_k + 2U_n \ln \sigma,$$

которое в рассматриваемом случае при $U_n = 3 \text{ В}$

$$U_{м.у} \approx 6 + 6 \ln 4 \approx 14,5 \text{ В.}$$

8. По найденному значению $\eta_{во}$, данным рис. 1.14 и результатам расчетов находим значение потенциала вспомогательного заряда, который в рассматриваемом примере равен $U_v = 5U$, где $U = 0,26 \text{ В}$ — потенциал дорожки, соответствующий значению η_0 , $U_v = 1,3 \text{ В}$. Сравнивая значения $U_{м.у}$ и U_v , убеждаемся в том, что $U_{м.у} > U_v$. В противном случае необходимо увеличить значение E_k , не нарушая условия $E_k < E_n$, и повторить расчет.

В данном случае значение U_v потенциала вспомогательного заряда составляет примерно 16 % от значения потенциала $U_{м.у} - U_k = 2U_n \ln \sigma$, что достигается при $\Delta t_c \approx 0,17 \tau$.

9. Исходя из заданного значения Δt_c и используя выражение (1.77), находим для каждого из слагаемых значение I_c — тока считывающего луча:

$$I_{c1} = \frac{U_{в1} C}{(\sigma - 1) \Delta t_{c1}}; \quad I_{c2} \approx 0,17 \frac{2U_n C}{\Delta t_{c2}}.$$

В рассматриваемом случае при $\Delta t_c = 10^6 \text{ с}$ $I_{c1} \approx 1 \cdot 10^{-8} \text{ А}$, $I_{c2} \approx 1 \times 10^{-7} \text{ А}$.

Находим I_c — значение тока считывающего луча — из условия $\Delta t_{c1} + \Delta t_{c2} = \Delta t_c$:

$$\frac{U_{в1} C}{(\sigma - 1) I_{c1}} + 0,17 \frac{2U_n C}{I_{c2}} = \Delta t_c,$$

откуда

$$I_c = C \frac{U_v + 0,17 \cdot 2U_n (\sigma - 1)}{(\sigma - 1) \Delta t_c} = 10^{-13} \frac{0,26 + 0,17 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3}{3 \cdot 10^{-6}} \approx 1,11 \times 10^{-7} \text{ А.}$$

10. Находим максимальную плотность тока луча

$$j_0 = I_c / \pi r_0^2$$

и по ее значению, воспользовавшись расчетными данными, приведенными на рис. 1.37, определяем наличие отрицательного объемного потенциала в промежутке мишень — коллектор.

В рассматриваемом примере имеем

$$j_0 = \frac{1,2 \cdot 10^{-7}}{3,14 \cdot 10^{-8}} \approx 3,5 \text{ А/м}^2,$$

что согласно рис. 1.37 при $d=10^{-2}$ м лежит вне значения граничной плотности тока, при которой возникает отрицательный объемный потенциал.

Определив параметры потенциального барьера β_0 , γ_0 и U_{min} , можно определить параметры считанного импульса.

Рассмотрим случай, когда значение j_0 больше полученного и трубка работает в условиях существования объемного потенциала. Предположим, что $j_0=5 \text{ А/м}^2$.

11. Воспользовавшись результатами расчетов, приведенными на рис. 1.36, и выражением (1.74), определяем минимальное значение объемного потенциала $U_{min \text{ в.э}}$ и S_{min} — его координату.

Из расчетов, приведенных в [4], следует, что $U_{min \text{ в.э}} \approx 0,5 \text{ В}$, поэтому

$$S_{min} = \sqrt[4]{\frac{q_e 2U_H}{2\pi m_e}} \sqrt{\frac{\epsilon_0 2U_H}{j_0}} = \sqrt[4]{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 3}{2 \cdot 3,14 \cdot 9 \cdot 10^{-25}}} \times \\ \times \sqrt{\frac{8,8 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 3}{5}} = 22 \cdot 3,1 \cdot 10^{-6} \approx 0,7 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Таким образом, минимум объемного потенциала находится у поверхности мишени трубки.

12. В соответствии с выражением (1.76) определяем $U_{к.в.э}$ — потенциал коллектора, компенсирующий объемный потенциал, минимальное значение которого имеет координату S_{min} :

$$U_{к.в.э} = U_{min \text{ в.э}} \frac{l/\epsilon_1 + d}{l/\epsilon_1 + S_{min}} = \frac{101}{2} U_{min \text{ в.э}} = 50 U_{min \text{ в.э}} = 50 \cdot 0,5 = 25 \text{ В.}$$

Определяем потенциал коллектора ЗЭЛТ во время считывания при наличии объемного заряда:

$$U_{к0} = U_{к} + U_{к.в.э} = 6 + 25 \approx 30 \text{ В.}$$

13. Из графиков, приведенных на рис. 1.30—1.32, находим параметры потенциального барьера β_0 и γ_0 .

Так как численные расчеты проведены для случая $\eta_0=10^{-6}$ Кл/м², уменьшение η_0 эквивалентно увеличению $U_{к}$ на рис. 1.30—1.32. Например, при $\eta_0=10^{-7}$ Кл/м² и $U_{к}=10 \text{ В}$ необходимо пользоваться данными, приведенными для $\eta_0=10^{-6}$ Кл/м² и $U_{к}=100 \text{ В}$. В рассматриваемом случае для расчетов примем $U_{к}=10 \text{ В}$.

Из рис. 1.30, б находим $g_0=1,2$, из рис. 1.32 $\beta_0=2,5$.

Произведя построения в соответствии с рис. 1.27 или 1.28 и пользуясь данными рис. 1.11—1.13, находим значение U_{min} .

В частности, зависимость 2 на рис. 1.27 и 1.28 должна быть взята из рис. 1.12, зависимость 1 определяется значением $E_{к}$.

При линейной аппроксимации $U_{min} = U - E_{к} \left(\frac{U}{E_n} + \frac{l}{\epsilon_1} \right) = 0,26 - 6 \times \\ \times 10^2 \left(\frac{0,26}{12 \cdot 10^2} + \frac{10^{-3}}{8} \right) = 0,12 \text{ В.}$

При экспоненциальной аппроксимации

$$U_{min} = U \left[1 - \frac{E_{к}}{E_n} \left(1 + \ln \frac{E_n}{E_{к}} \right) \right] = 0,26 \left[1 - \frac{1}{2} (1 + \ln 2) \right] = 0,16 \times \\ \times 0,26 = 0,04 \text{ В.}$$

14. После определения I_c , β_0 и U_{min} можно воспользоваться для расчета параметров считанного импульса выражением (1.9).

Для расчетов трактов усиления и формирования сигналов необходимо определить амплитуду и длительность считанного импульса. Для этого в (1.9) вместо сомножителя $I_s(\sigma - 1)/2C_x v_a$ необходимо подставить значение потенциального барьера U_{min} , а вместо сомножителя $R(\beta - \beta_1)$, определяющего закон распределения потенциала записанной дорожки в направлении считывания с постоянной Гаусса r_0 , можно с некоторым допущением подставить распределение $R_0(\beta - \beta_1)$ с постоянной $r_{00} = \beta_0/2$. Тогда выражение (1.9) принимает вид

$$i(\theta) = k I_c U_{min} \int_{-\infty}^{\infty} R_0(\beta - \beta_1) R(\beta - \theta) \exp \left\{ -\frac{1}{2} \gamma_c [1 - \Phi(\beta - \theta)] \right\} d\beta, \quad (1.78)$$

где R_i , γ_c определяются из (1.8), (1.10)

Внутреннее сопротивление R_i для большинства ЗЭЛТ находится в пределах от 10^5 до 10^8 Ом в зависимости от I_c — тока считывающего луча и k — крутизны характеристики коэффициента вторичной эмиссии в рабочей точке.

На рис. 1.47 представлена зависимость пикового значения величины J_{max} от значения постоянной времени трубки τ , полученная численным интегрированием выражения (1.78) при различных значениях Δt_c :

$$J = \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left\{ -(\beta - \beta_1)^2 - (\beta - \theta)^2 - \frac{\Delta t_c}{2\tau} [1 - \Phi(\beta - \theta)] \right\} d\beta, \quad (1.79)$$

$$\text{где } J = \frac{i(\theta) \pi}{U_{min} C}, \quad \tau = R_i C = C/k I_c.$$

На характеристике, приведенной на рис. 1.47, есть участок, где при соотношении $\Delta t_c = (0,1 \div 1,0)\tau$ наблюдается слабая зависимость ампли-

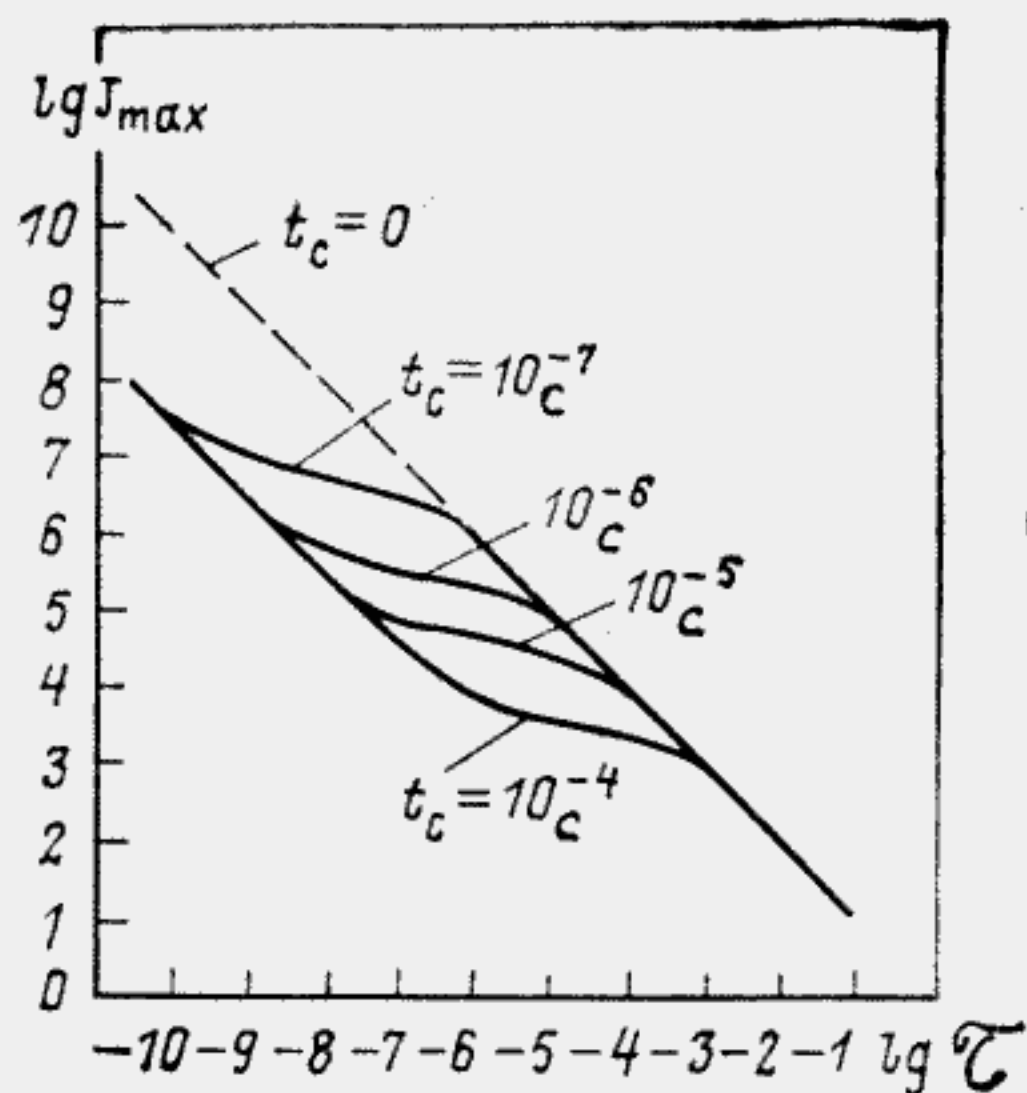


Рис. 1.47

туда считанного импульса от значения постоянной времени ЗЭЛТ, так называемое плато.

Работа ЗЭЛТ при сравнительно малых значениях тока считывающего луча может оказаться нестабильной. Для повышения стабильности амплитуды считанного импульса необходимо, чтобы значение I_c удовлетворяло соотношению (1.78).

В частности, при $I_c = 10^{-7}$ А и $\Delta t_c = 10^{-6}$ с рабочая точка находится на участке плато, $J_{max} = 7,8 \cdot 10^5$ А.

Находим пиковое значение тока считанного импульса при $U_{min} \approx 0,1$ В:

$$i(\theta)_{max} = J_{max} U_{min} C \approx 7,8 \cdot 10^5 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{-13} = 7,8 \cdot 10^{-9} \text{ А.}$$

Как следует из расчетов, токи считанных сигналов составляют наноамперы.

Длительность считанного импульса равна сумме длительностей сигналов, соответствующих распределениям R_6 и R в (1.78).

Значения параметров λ и δ должны обеспечивать максимальное значение U_{min} , а следовательно, максимальное значение $u(\beta)$. Вместе с тем указанные параметры должны обеспечивать минимальное значение характеристик потенциального барьера β_6 и γ_6 .

Из рассмотрения рассчитанных зависимостей $u(\lambda, \delta)$, представленных графически на рис. 1.14, следует, что для достижения максимального потенциала зарядной дорожки u необходимо задавать значения λ и δ возможно большими. Однако в соответствии с выражениями (1.43) и (1.44) при $\lambda = \delta \geq 100$ этот потенциал практически не увеличивается.

Из рис. 1.14 видно, что оптимальным является соотношение $\delta = 10\lambda$.

Из рис. 1.28 следует, что минимальное значение γ_6 достигается, когда зависимость $u(g)$ имеет наибольшую крутизну спада, или, что равносильно, при наибольшем значении $E_n(\beta=0)$.

Результаты расчетов, представленные графически на рис. 1.11—1.13 и 1.17—1.19, показывают, что указанные значения (при прочих равных условиях) возрастают с уменьшением δ . Однако увеличение крутизны зависимости $u(g)$ с уменьшением δ происходит медленнее, чем уменьшение значения u . Поэтому представляется целесообразным принять диапазон значений $\delta \approx 10\lambda \geq 10 \div 100$.

Оптимальным для работы ЗЭЛТ с накоплением зарядов является

режим, при котором на время подготовки, записи и считывания на коллектор трубки задают потенциалы $U_{к.п} = 0$; $U_{к.з} = +(1-3)$ кВ; $U_{к.с} = +(10 \div 200)$ В соответственно. Такой режим работы ЗЭЛТ условно обозначают знаками полярности потенциала коллектора при подготовке, записи и считывании: 0, +, +.

По результатам расчетов, приведенных выше, изготовлена запоминающая электронно-лучевая трубка СОЗУ2 [41]. В отличие от значений параметров $l=1$ мм и $d=10$ мм, полученных при расчете, по технологическим соображениям в СОЗУ2 принято $l=3$ мм, $d=30$ мм, что несущественно увеличивает потенциал зарядной дорожки и требует увеличения U_k потенциала коллектора при считывании в 3 раза по сравнению с расчетным. С учетом того, что коллектор выполнен в виде проводящего покрытия цилиндрической колбы ЗЭЛТ, а не в виде плоской сетки, значение U_k следует увеличить приблизительно на 10% по сравнению с полученным. В результате корректировки расчета имеем для типового режима работы СОЗУ2 при больших скоростях записи $U_{к.с} = 100$ В.

Эмитирующее покрытие мишени выполнено из смеси окиси магния и люминофора, характеризующейся коэффициентом вторичной эмиссии $\sigma \approx 10$, что превышает значение $\sigma=4$, принятое в расчете. Это позволило получить амплитуду считанного импульса, в 2 раза превышающую расчетную.

Для работы при больших скоростях записи сигнальная система отклонения электронного луча трубки выполнена в виде проходной полосковой линии с волновым сопротивлением 75 Ом, что обеспечило согласование с коаксиальным кабелем детектора 75 Ом, например типа РК75-9-13. Проходная сигнальная отклоняющая система записывающего луча позволяет осуществлять последовательное каскадирование нескольких ЗЭЛТ для одновременной регистрации различных участков однократного сигнала.

Глава вторая

ЗАПОМИНАЮЩИЕ ЭЛТ С МИКРОКАНАЛЬНЫМИ ПЛАСТИНАМИ

2.1. Принцип работы трубки

В последнее время появились два типа ЗЭЛТ, которые позволяют производить запись с большими скоростями.

В трубках первого типа используются мишени, выполненные в виде матрицы полупроводниковых диодов, которые при облучении электронами записывающего луча усиливают наносимые (записываемые) заряды более чем в 2000 раз [32].

В ЗЭЛТ второго типа используются мишени, выполненные в виде микроканальных пластин, усиливающих ток луча подобно электронному

умножителю. Микроканальная пластина (МКП) является плоскопараллельной. Перпендикулярно плоскостям расположено множество сквозных отверстий цилиндрической формы.

Микроканальные пластины изготовляют из диэлектрика, имеющего конечное сопротивление. С торцевых сторон на пластину наносят проводящие покрытия (рис. 2.1).

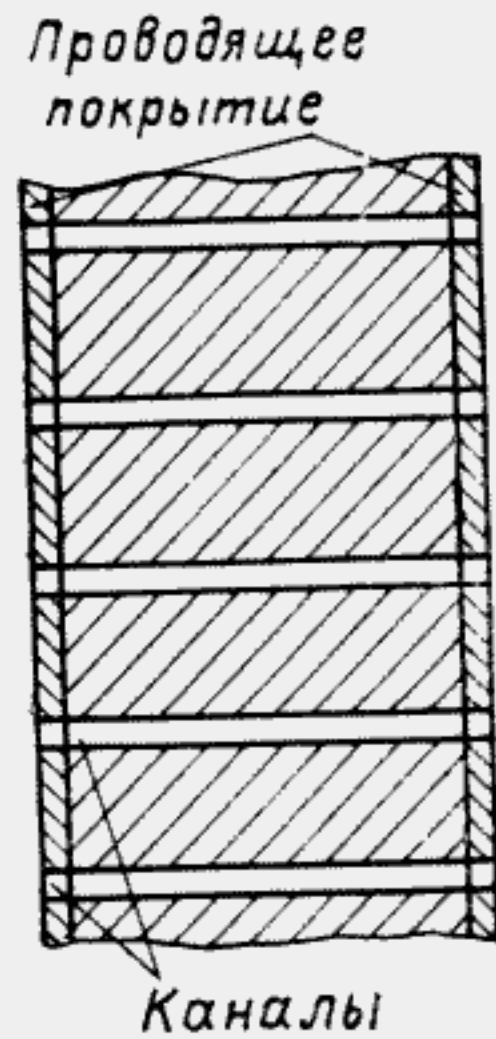


Рис. 2.1

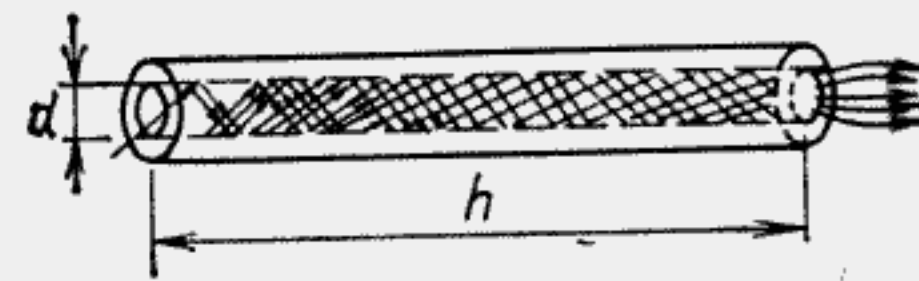


Рис. 2.2

При подаче разности потенциалов на проводящие покрытия между ними протекает ток, создавая падение напряжения по толщине пластины. Материал, из которого изготовляют МКП, характеризуется коэффициентом вторичной электронной эмиссии $\sigma > 1$.

Каждый из каналов МКП можно рассматривать как некоторый электронный умножитель с распределенными диодами (рис. 2.2). Коэффициент усиления тока таких умножителей примерно 10^5 .

Поскольку диоды подобного электронного умножителя, образованные внутренней поверхностью цилиндрических каналов, имеют конечное сопротивление, то во время умножения электронного потока на диодах накапливаются положительные заряды, снижающие коэффициент умножения. Накопившиеся заряды постепенно растекаются с постоянной времени, определяемой сопротивлением материала МКП.

МКП обычно изготовляют из специально обработанного стекла, имеющего удельное объемное сопротивление $10^{10} - 10^{12}$ Ом/мм. Заряд на внутренней поверхности канала сохраняется в среднем несколько десятков миллисекунд. Это свойство МКП было предложено использовать для запоминания информации в электронно-лучевых трубках.

Запоминающая ЭЛТ с микроканальными пластинами содержит два электронных прожектора (записывающий и считывающий), так же как ЗЭЛТ с диэлектрической мишенью.

Записывающий и считывающий прожекторы расположены по одну сторону от МКП, по другую от МКП на расстоянии 2—3 мм укреплен

люминесцентный экран с сигнальной пластиной, выполненной в виде алюминиевого покрытия. Выходные импульсы считывают с нагрузочного резистора, включенного в цепь сигнальной пластины. Одновременно с электрическим считыванием сигнала, записанного на МКП, имеется возможность непосредственного наблюдения процессов записи и считывания на люминесцентном экране ЗЭЛТ. Амплитуда полезного считанного сиг-

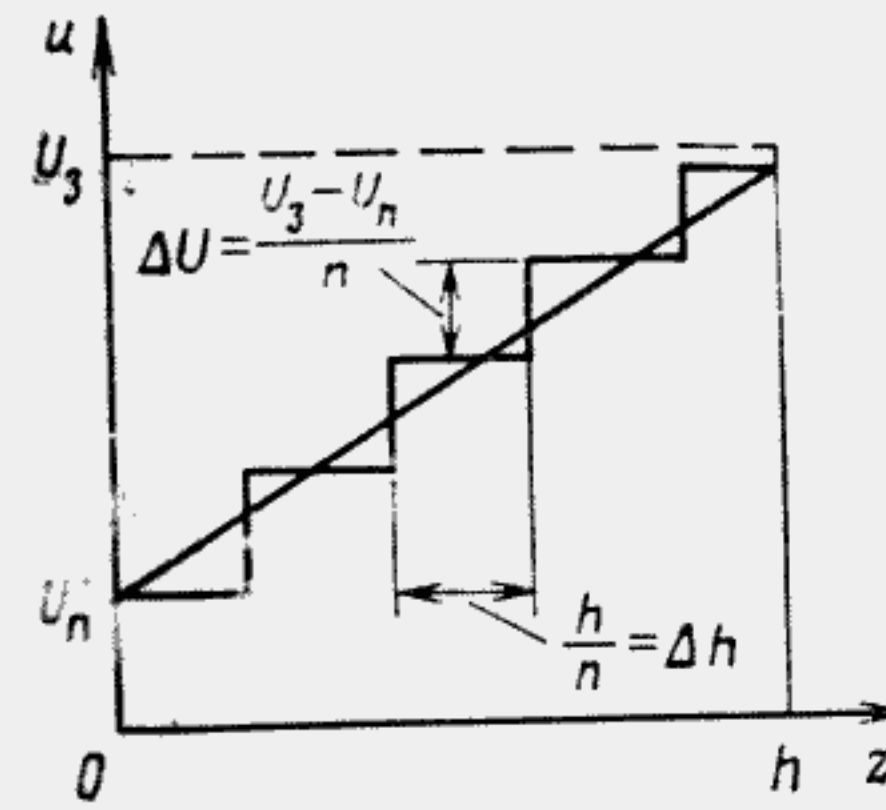


Рис. 2.3

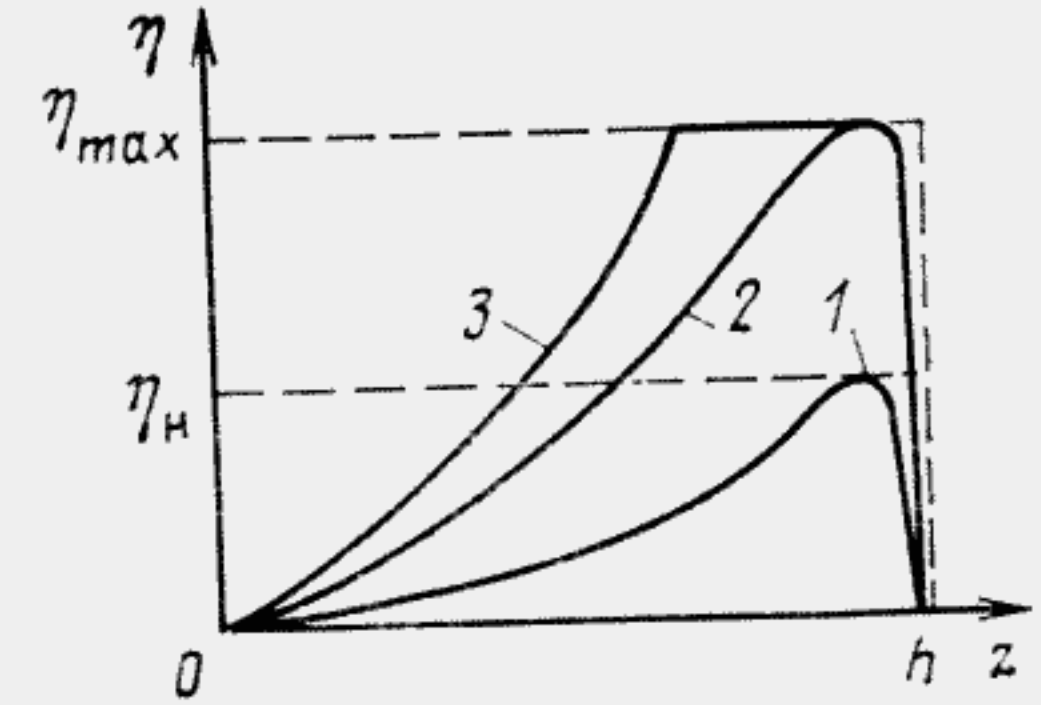


Рис. 2.4

нала приблизительно на порядок больше, чем в ЗЭЛТ с диэлектрической мишенью. Время хранения сигнала 70 ... 80 мс.

Большая амплитуда полезного считанного сигнала позволяет уменьшить длительность развертки записи до значений менее 1 нс.

Применение МКП в ЗЭЛТ позволяет обойтись без стадии подготовки и без высоковольтной коммутации напряжения коллектора на стадиях записи и считывания, что упрощает построение аппаратуры с ЗЭЛТ [51].

При подаче разности потенциалов на проводящие покрытия МКП, которые используются в качестве электродов (см. рис. 2.1), вдоль каждого из каналов устанавливается напряжение, определяемое прямой линией (рис. 2.3). На рис. 2.3 приняты следующие обозначения: U_n — потенциал переднего (входного) электрода МКП, U_3 — потенциал заднего (выходного) электрода МКП. Для упрощения можно представить канал умножения тока МКП состоящим из большого числа малых по длине диодов, на каждый из которых подан постоянный потенциал подобно умножителю с дискретными диодами. В этом случае падение напряжения в канале можно представить в виде ступенчатой линии (рис. 2.3).

Очевидно, что заряд, накапливаемый при работе МКП на каждом из диодов, определяется выражением

$$q_m = i_{m-1} (\sigma_d - 1) \Delta t,$$

где i_{m-1} — значение тока между соседними диодами; Δt — время накопления заряда (время, в течение которого луч находится на данном канале умножения).

Так как перепады напряжения между соседними диодами доста-

точные для полного отбора вторичных электронов, то в приведенном выражении в начальный момент времени $\sigma_d = \sigma$. При этом ток через данный динод

$$i_m = i_{m-1}\sigma.$$

Если на первый динод попадает ток луча ЭЛТ i_L , тогда ток и заряд любого из динодов, определится соответственно как

$$i_m = i_L \sigma^{m-1}, \quad q_m = q_L (\sigma - 1)^{m-1}, \quad (2.1)$$

где $q_L = i_L \Delta t$.

Рассмотрим два предельных случая накопления зарядов в канале МКП при неподвижном луче в предположении, что утечкой зарядов можно пренебречь.

1. Потенциал предпоследнего динода или крайнего участка в конце канала не успевает за время Δt приобрести потенциал, равный потенциалу выходного электрода МКП. В этом случае работа всего канала происходит при полном отборе вторичных электронов с коэффициентом вторичной эмиссии, равным σ .

После выключения луча по длине канала установится распределение плотности зарядов, показанное на рис. 2.4 (зависимость 1) с максимальным значением η_n в конце канала. Значение η_n меньше значения η_{max} , которое соответствует потенциалу ΔU (см. рис. 2.3) и определение (2.1).

В течение времени накопления зарядов из канала МКП выходит максимальное количество электронов, которые попадают в отбирающее поле коллектора и образуют максимальный ток, определяемый выражением (2.1). Это линейный режим усиления тока.

2. При большом токе луча и(или) длительном высвечивании лучом одной точки процесс накопления зарядов в канале будет продолжаться до тех пор, пока на предпоследнем диноде накопленная плотность заряда не станет $\eta_n = \eta_{max}$ (зависимость 2 на рис. 2.4). При дальнейшей засветке той же точки каждый из динодов заряжается до потенциала, соответствующего η_{max} (зависимость 3 на рис. 2.4). В канале образуется так называемая потенциальная пробка, которая с течением времени распространяется в направлении к переднему электроду МКП до тех пор, пока канал по всей длине не накопит плотность зарядов η_{max} и не примет значение потенциала, приблизительно равное потенциалу заднего электрода МКП. Распространение потенциальной «пробки» в направлении к входному электроду МКП определяет движение фронта зарядной волны или фронта волны напряжения по каналу. Так как потенциал в канале не может превысить потенциал выходного электрода, то при накоплении в канале плотности зарядов η_{max} ток, выходящий из МКП на коллектор, начинает уменьшаться и значение его становится тем меньше, чем большую длину канала занимает потенциальная пробка. Это явление имеет место потому, что при достижении рассматриваемым динодом потенциала $U_{вых}$ его $\sigma_d = 1$ и выходной ток МКП опре-

деляется значением тока с предыдущего динода. Когда канал полностью заряжается, выходной ток МКП равен току луча.

На рис. 2.5 показана характерная зависимость выходного тока МКП при длительном высвечивании неподвижным лучом одной и той же точки, где обозначено: t_1 — момент включения луча; t_2 — момент достижения плотности заряда η_{max} на выходе канала; t_3 — момент достижения зарядной волной входного электрода МКП; t_4 — момент выключения луча ЭЛТ.

Наличие или отсутствие записанной информации на каком-нибудь участке МКП определяется разностью токов с двух участков: током с участка (группы каналов), на котором не произведена запись, и с участка, на котором произведена запись. Если во время записи канал по всей длине зарядился до значения η_{max} , то выходной ток равен $i_c = i_{max} - i_L$. В остальных случаях ток меньше.

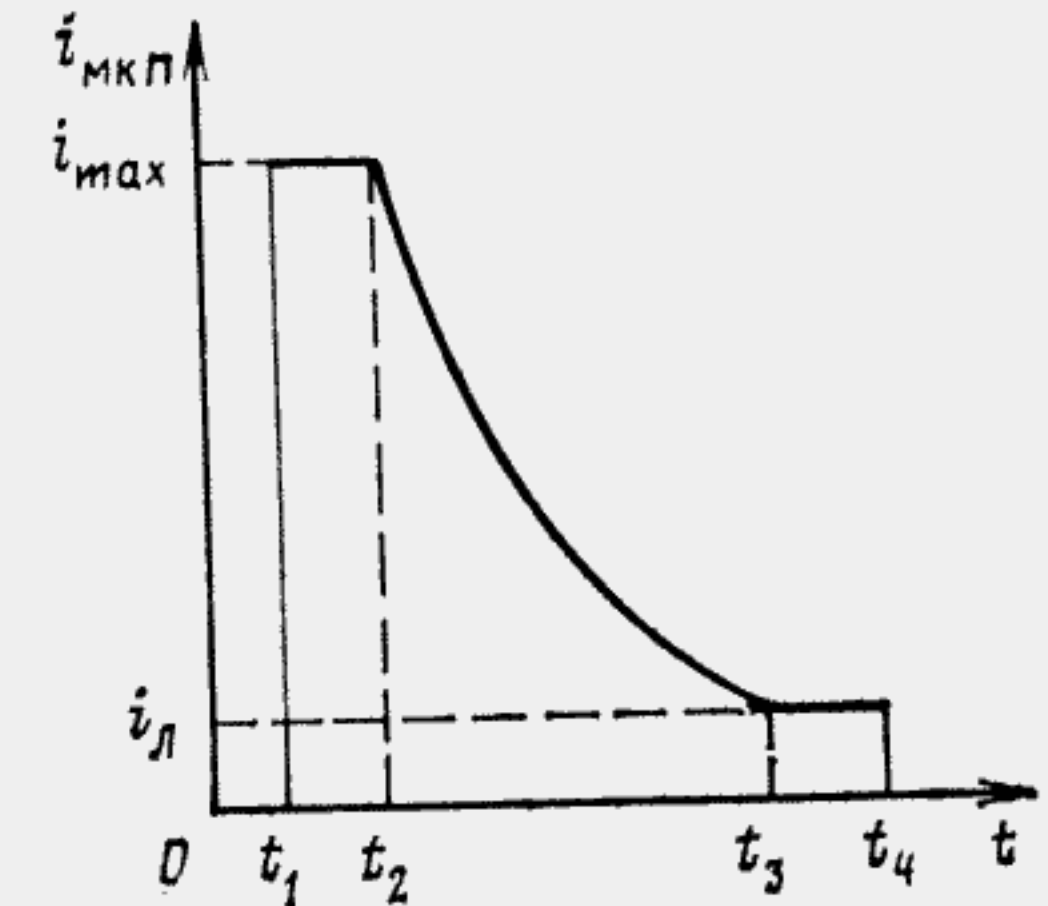


Рис. 2.5

На рис. 2.6 приведена эквивалентная электрическая схема канала МКП, составленная в соответствии с указанными выше допущениями, на котором обозначено: R_1, R_2, R_3, R_4 — резисторы, имитирующие сопротивления утечки материала МКП; C — емкости между участками поверхности канала, на которых происходит накопление зарядов; K — ключи, замыкание которых эквивалентно попаданию луча в канал; $R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{in}$ — внутренние сопротивления умножителя, зависящие от значения тока данного динода, σ и разности потенциалов между динодами. На каждый из динодов приходит различный ток, поэтому с увеличением m значение R_{im} уменьшается в соответствии с (1.8).

В исходном состоянии, до момента включения луча ЭЛТ, ключи K разомкнуты. Делителем напряжения, состоящим из резисторов $R_1, R_2,$

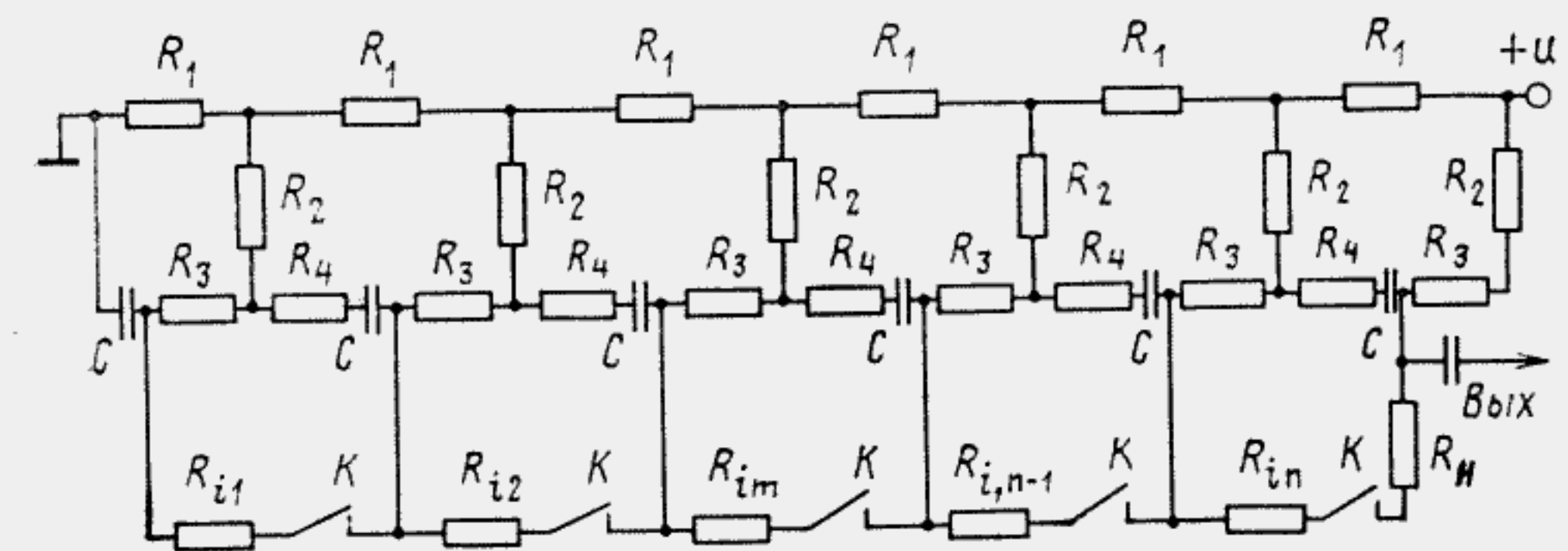


Рис. 2.6

R_3, R_4 , на конденсаторы C подаются одинаковые разности потенциалов ΔU .

При попадании луча в канал ключи K одновременно замыкаются и происходит перезаряд конденсаторов C . Принцип работы подобных эквивалентных схем рассмотрен в [4]. При замыкании ключей K заряд правой пластины данного конденсатора C передается на правую пластину предыдущего конденсатора с постоянной времени, определяемой значением сопротивления $R_{i,n-1}$. Когда потенциал правой пластины предыдущего конденсатора установится равным значению u , он передается последующему конденсатору и т. д. Тем самым создается движение зарядной волны.

В рассматриваемой эквивалентной схеме учтено влияние сопротивлений утечки стенок канала МКП. Когда ключи размыкаются, конденсаторы C разряжаются до исходного состояния с постоянной времени, определяемой значениями C, R_1, R_2, R_3, R_4 .

В цепь выходного электрода МКП включено нагрузочное сопротивление R_H . При замыкании ключей в начальный момент времени через сопротивление R_H протекает максимальный ток, который по мере зарядки конденсаторов уменьшается.

Количество условных дискретных диодов в канале умножения можно оценить по средней длине свободного пробега электрона между двумя последовательными соударениями с поверхностью канала. Длина свободного пробега Δh зависит от приложенного напряжения U , длины канала h и его диаметра d .

Конструктивным параметром канала умножения является калибр, представляющий собой отношение длины канала к его диаметру:

$$k = h/d.$$

С увеличением h количество соударений по длине h увеличивается, с увеличением d — уменьшается.

2.2. Распределение потенциалов внутри канального умножителя

При полной зарядке канала вся цилиндрическая поверхность заряжена до значения потенциала заднего электрода МКП. Предположим, что канал представляет собой полый цилиндр, одно основание и боковая поверхность которого имеют потенциал $U_{\text{ВЫХ}}$, а другое основание — потенциал $U_{\text{ВХ}}$. Зная распределение потенциалов внутри такого цилиндра, можно оценить расстояние z от основания, на котором перестает сказываться влияние потенциала оснований. Так как сквозной канал не имеет оснований, можно считать, что потенциал в начале и конце канала определяется потенциалом электродов МКП [43]:

$$u(r, z) = U_{\text{ВЫХ}} - 2(U_{\text{ВЫХ}} - U_{\text{ВХ}}) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\text{sh} \frac{\alpha_k}{R} z J_0 \left(\frac{\alpha_k}{R} r \right)}{\text{sh} \frac{\alpha_k}{R} h \alpha_k J_1(\alpha_k)}, \quad (2.2)$$

где $R = d/2$; J_0, J_1 — функции Бесселя нулевого и первого порядков соответственно; α_k — положительные корни уравнения $J_0(\alpha) = 0$.

Из этого выражения следует, что при больших значениях калибра канала ($k > 10$) второе слагаемое практически равно нулю, потенциал внутри канала имеет значение $U_{\text{ВЫХ}}$ и не зависит от значения $0 \leq r \leq R$ — переменного радиуса внутри канала. Лишь при значениях z близких к значению h потенциал внутри канала принимает значение $U_{\text{ВХ}}$. Легко убедиться, что влияние потенциала входного электрода на распределение потенциалов внутри канала перестает сказываться на расстоянии 2—3 диаметров канала. Для более точных расчетов, принимая $h < R$, можно получить распределение потенциалов внутри кольца, что имеет место на входном и выходном электродах в торцах канала МКП.

Рассмотрим случай неполной зарядки поверхности канала. Примем на входном электроде МКП $z = 0$, тогда по длине канала в направлении оси z распределение плотности заряда имеет переменное значение, определяемое выражением (2.1).

Считанный сигнал при движении электронного луча по передней поверхности МКП определяется разностью токов электронов, выходящих из каналов, в которых на мишени заряд при записи не нанесен (т. е. луч записи не пересекал данные каналы), и электронов, выходящих из каналов, в которых при записи нанесен заряд (т. е. луч записи пересекал эти каналы). Для определения степени «закрытия» канала потенциальной пробкой необходимо знать значение потенциала, образовавшегося в канале при записи за счет нанесения зарядов. Так как во время записи происходит нанесение зарядов за малое время при полном отборе вторичных электронов, то зная параметры МКП (коэффициент умножения σ , ток луча и др.), сравнительно просто определить количественно распределение плотности заряда по оси z . Распределение потенциалов можно найти, решив уравнения Лапласа:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2} = 0.$$

Сделаем допущения. Искомое распределение потенциалов будем определять на расстоянии z от торцов канала, равном 2—3 диаметрам канала, чтобы пренебречь краевыми эффектами; перенесем начало координат в точку $z = h$ (см. рис. 2.4) и мысленно продолжим канал в направлении $z > 0$ с симметричным распределением заряда относительно плоскости $z = 0$; примем потенциал наружного радиуса канала равным нулю.

Таким образом, рассмотрим диэлектрический цилиндр с наружным радиусом T и внутренним радиусом R (рис. 2.7).

В цилиндрических координатах уравнения Лапласа принимают вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0; \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2} = 0.$$

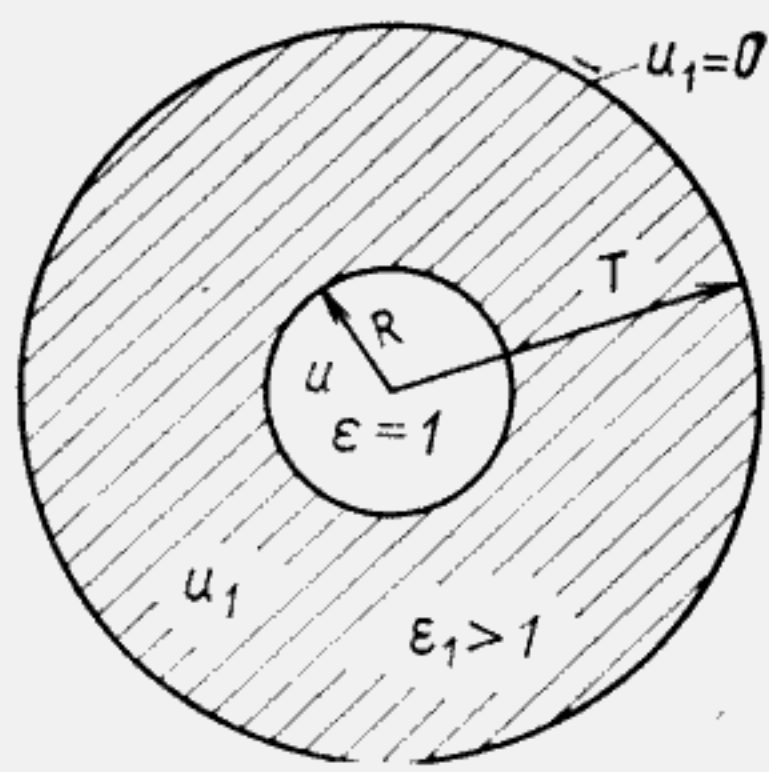


Рис. 2.7

Граничные условия:

1. Потенциал внешней поверхности канала равен нулю ($u_1=0$) при $r=T$.

2. Исходя из условия неразрывности потенциала на границе областей

$$u_1 = u \text{ при } r = R.$$

3. Исходя из симметрии цилиндра напряженность поля в радиальном направлении на оси цилиндра равна нулю:

$$\frac{du}{dr} = 0 \text{ при } r = 0.$$

4. Изменение нормальной (по радиусу) составляющей вектора электрического смещения на границе раздела диэлектрика и вакуума равно плотности нанесенного извне поверхностного заряда на этой границе:

$$\epsilon_0 \left(\epsilon_1 \frac{\partial u_1}{\partial r} - \epsilon \frac{\partial u}{\partial r} \right) = -\eta(z) \text{ при } r = R.$$

Для решения уравнений Лапласа используем примененный выше метод преобразований Фурье. Уравнения примут вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \omega^2 \tilde{u} = 0; \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial r} \right) - \omega^2 \tilde{u}_1 = 0.$$

С учетом принятых допущений и граничных условий решения уравнений в частотной области дают выражения для распределения потенциалов микроканального умножителя

$$\tilde{u}_1 = \frac{\tilde{\eta}}{\epsilon_0 \omega} \frac{I_0(\omega R) [I_0(\omega T) K_0(\omega r) - K_0(\omega T) I_0(\omega r)]}{(\epsilon_1 - \epsilon) I_0(\omega R) K_0(\omega T) I_1(\omega R) + I_0(\omega T) [\epsilon_1 I_0(\omega R) K_1(\omega R) + \epsilon K_0(\omega R) I_1(\omega R)]}; \quad (2.3)$$

$$\tilde{u} = \frac{\tilde{\eta}}{\epsilon_0 \omega} \frac{[I_0(\omega T) K_0(\omega R) - I_0(\omega R) K_0(\omega T)] I_0(\omega r)}{(\epsilon_1 - \epsilon) I_0(\omega R) K_0(\omega T) I_1(\omega R) + I_0(\omega T) \times [\epsilon_1 I_0(\omega R) K_1(\omega R) + \epsilon K_0(\omega R) I_1(\omega R)]}, \quad (2.4)$$

где $I_0(x)$ и $K_0(x)$ — модифицированные цилиндрические функции Бесселя первого и второго порядков соответственно;

$$I_1(x) = I_0'(x) \text{ и } K_1(x) = -K_0'(x).$$

Вычислив обратное преобразование Фурье (на ЭВМ), получим распределение потенциалов $u(r, z)$ внутри канала умножения и $u_1(r, z)$ внутри материала МКП. При наличии заряда в нескольких близлежащих каналах МКП распределение потенциала внутри какого-либо выбранного канала определяют методом суперпозиции с учетом распределения потенциала u_1 .

МАСШТАБНО-ВРЕМЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАПОМИНАЮЩИХ ЭЛТ

3.1. Общий принцип работы масштабно-временных преобразователей

Масштабно-временные преобразователи с ЭЗЛТ с диэлектрической мишенью строят в основном в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3.1.

В рассматриваемой обобщенной структурной схеме масштабного преобразователя трубка работает с накоплением зарядов в режиме 0, +, +.

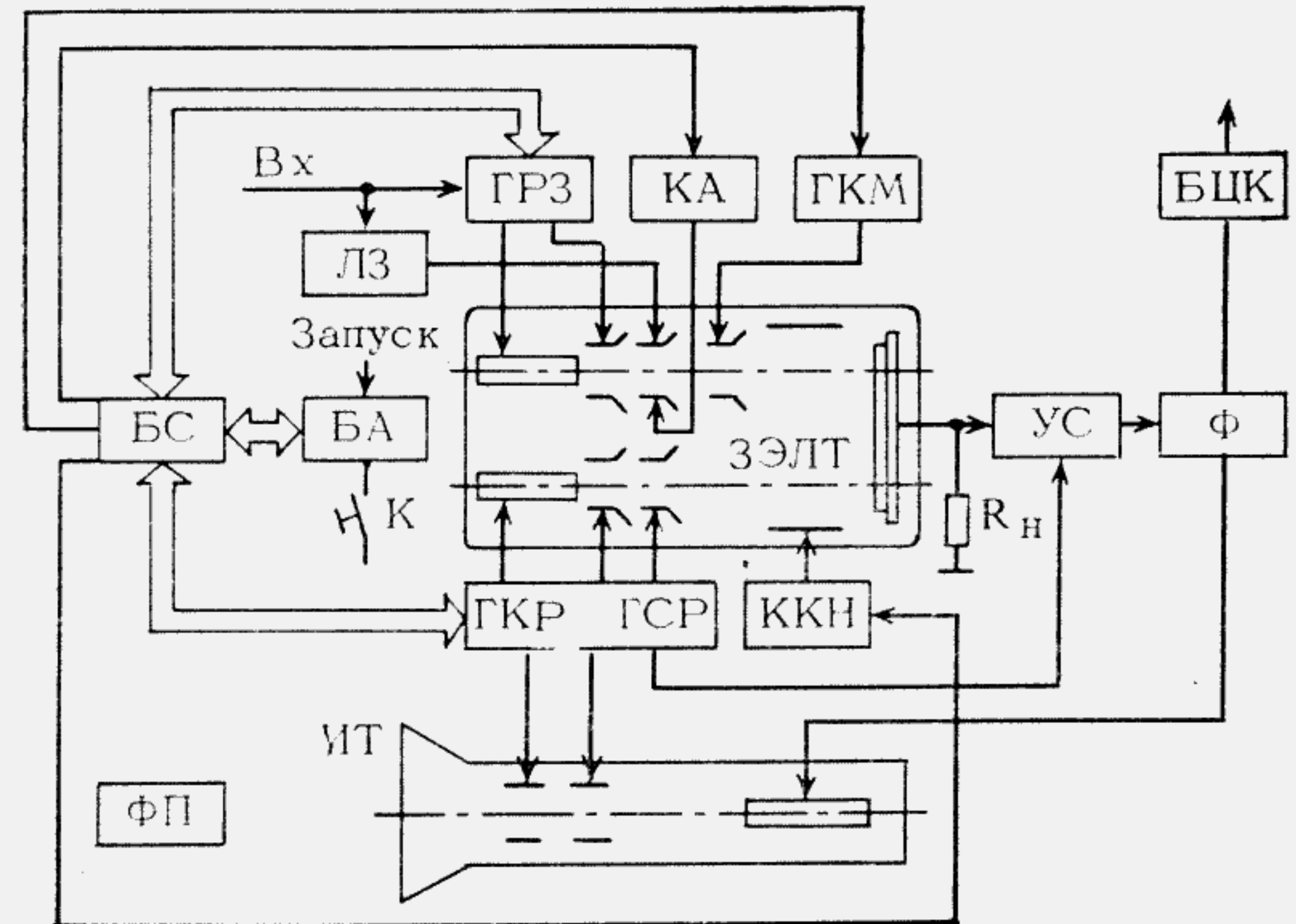


Рис. 3.1

После поступления внешнего сигнала или при нажатии кнопки (К) блок автоматики (БА) запускает блок синхронизации (БС).

Первым синхроимпульсом запускается генератор кадровой (ГКР) и строчной (ГСП) разверток, который вырабатывает напряжения разверток и подсвета луча и подает их на соответствующие электроды пушки подготовки и считывания ЭЗЛТ. Сигнал кадровой развертки формируется один раз. Одновременно запускается коммутатор коллекторного напряжения (ККН), который устанавливает на коллекторе трубки напряжение, равное или близкое к нулю, например в пределах (0 ± 5) В. Электронный луч сканирует мишень по растру, и таким образом осу-

ществляется подготовка мишени к записи. Сигналы на пушку луча подаются такими, чтобы обеспечить повышенный ток луча и небольшую его расфокусировку.

После окончания прямого хода кадровой развертки в БС поступает сигнал окончания работы ГКР и ГСР и БС переключает ККН, который выключает напряжение подготовки и подает на коллектор напряжение записи, равное, например, 1,5—2 кВ.

С некоторой задержкой, необходимой для установления высокого потенциала на коллекторе, БС дважды запускает генератор развертки записи (ГРЗ). При первом пуске ГРЗ БС запускает также калибратор амплитуды (КА), который подает на сигнальные отклоняющие пластины записывающего луча постоянное напряжение. На мишени трубки, таким образом, записывается уровень для градуировки нуля. При втором запуске ГРЗ одновременно запускается генератор калибровочных меток ГKM, который подает на калибровочные отклоняющие пластины записывающего луча синусоидальное напряжение с частотой, стабилизированной кварцем. При этом на мишени ЗЭЛТ записывается калибровочная кривая в виде синусоиды. Таким образом, в результате калибровочных пусков на мишени ЗЭЛТ записываются зарядные дорожки, как изображено на рис. 3.2 сплошными линиями: нулевая линия — *н. л.* и метки времени — *м. в.*

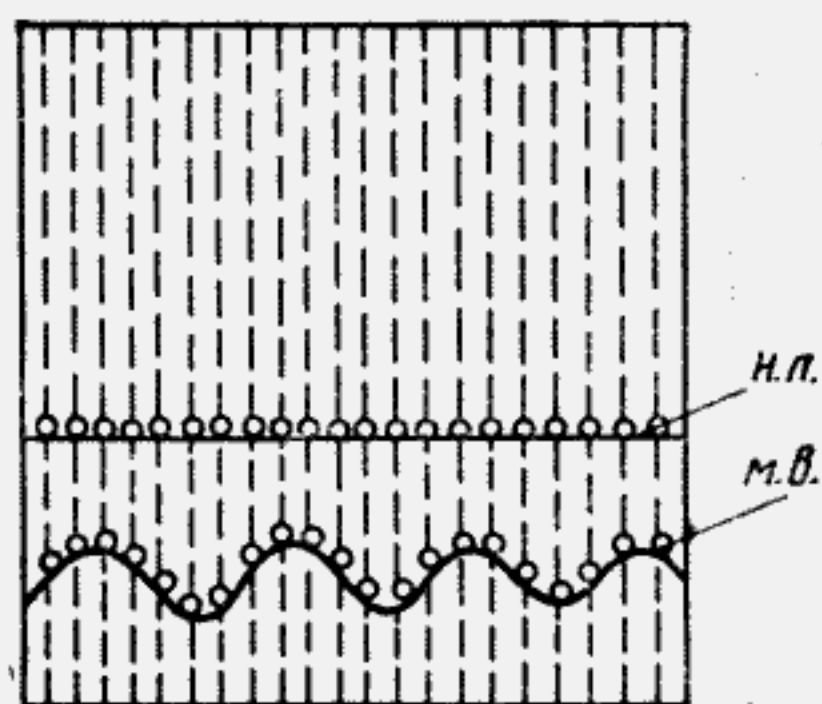


Рис. 3.2

После двух циклов развертки записи на БС поступает сигнал с ГРЗ, по которому БС вырабатывает команду на снятие высокого напряжения с коллектора ЗЭЛТ коммутатором коллекторного напряжения (ККН). Затем БС подает команду на ККН, который подает на коллектор напряжение считывания, после чего БС однократно запускает ГКР и ГСР, откуда на пушку и отклоняющие пластины считывающего луча ЗЭЛТ подаются соответствующие сигналы.

Одновременно с блока ГКР, ГСР напряжения кадровой и строчной разверток подаются на соответствующие пластины индикаторной трубки (ИТ), луч которой в исходном состоянии заперт.

Во время считывания электронный луч сканирует мишень ЗЭЛТ по растру. При пересечении движущимся лучом зарядной дорожки формируется токовый импульс, форма которого представлена на рис. 3.3, а. Этот импульс выделяется на сопротивлении нагрузки R_n и подается на вход усилителя считывания (УС). Далее считанный сигнал усиливается и дифференцируется (рис. 3.3, б). УС в исходном состоянии заперт и открывается сигналом с ГСР на время прямого хода строки считывания.

На выходе формирователя Φ формируется последовательность импульсов с фазово-импульсной модуляцией (ФИМ), представленная на рис. 3.4, где интервалы времени τ_1 и τ_2 эквивалентны мгновенным значениям записанных сигналов для градуировки синусоиды τ_1 и нулевого уровня τ_2 .

На выходе формирователя Φ формируется последовательность импульсов с фазово-импульсной модуляцией (ФИМ), представленная на рис. 3.4, где интервалы времени τ_1 и τ_2 эквивалентны мгновенным значениям записанных сигналов для градуировки синусоиды τ_1 и нулевого уровня τ_2 .

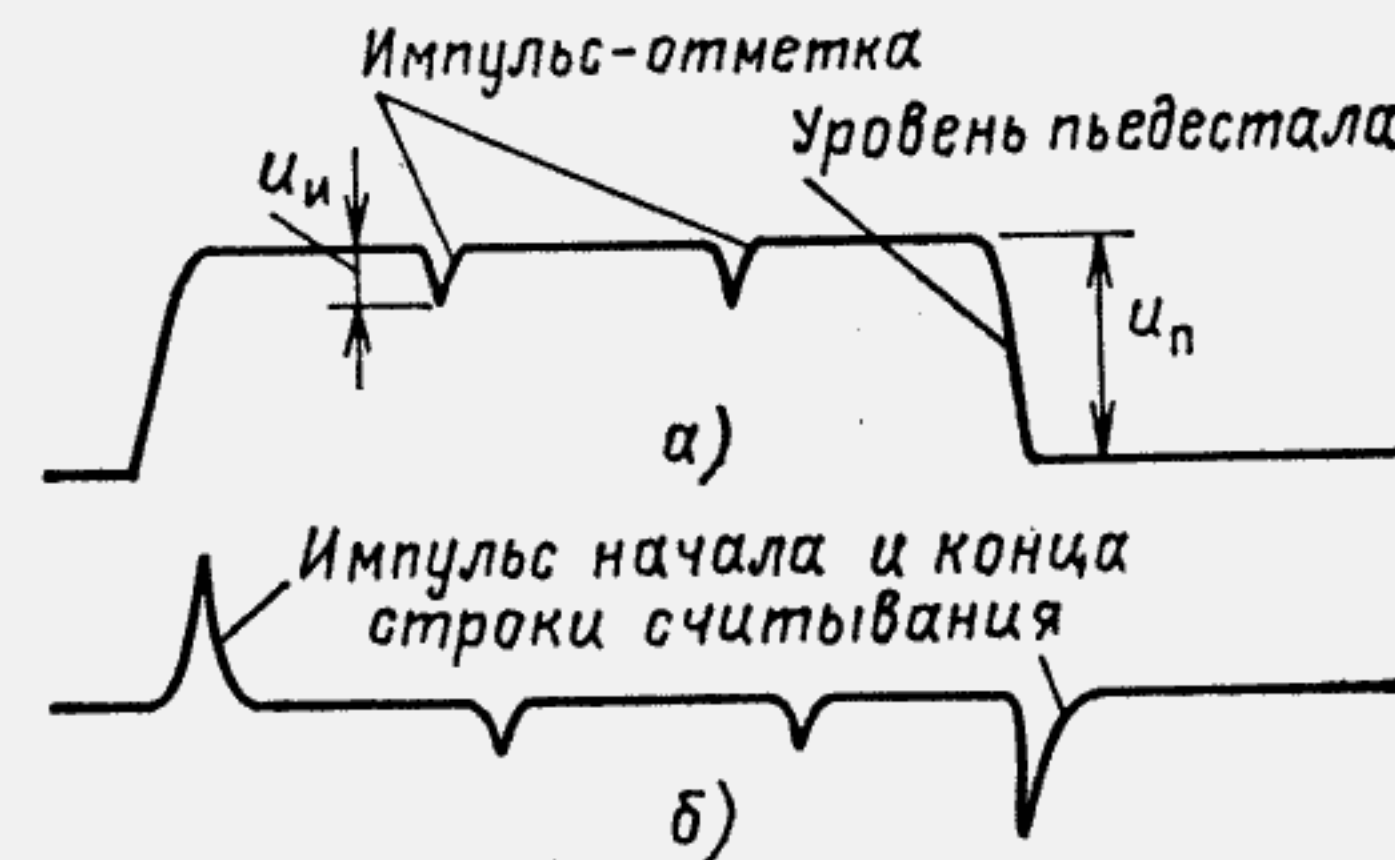


Рис. 3.3

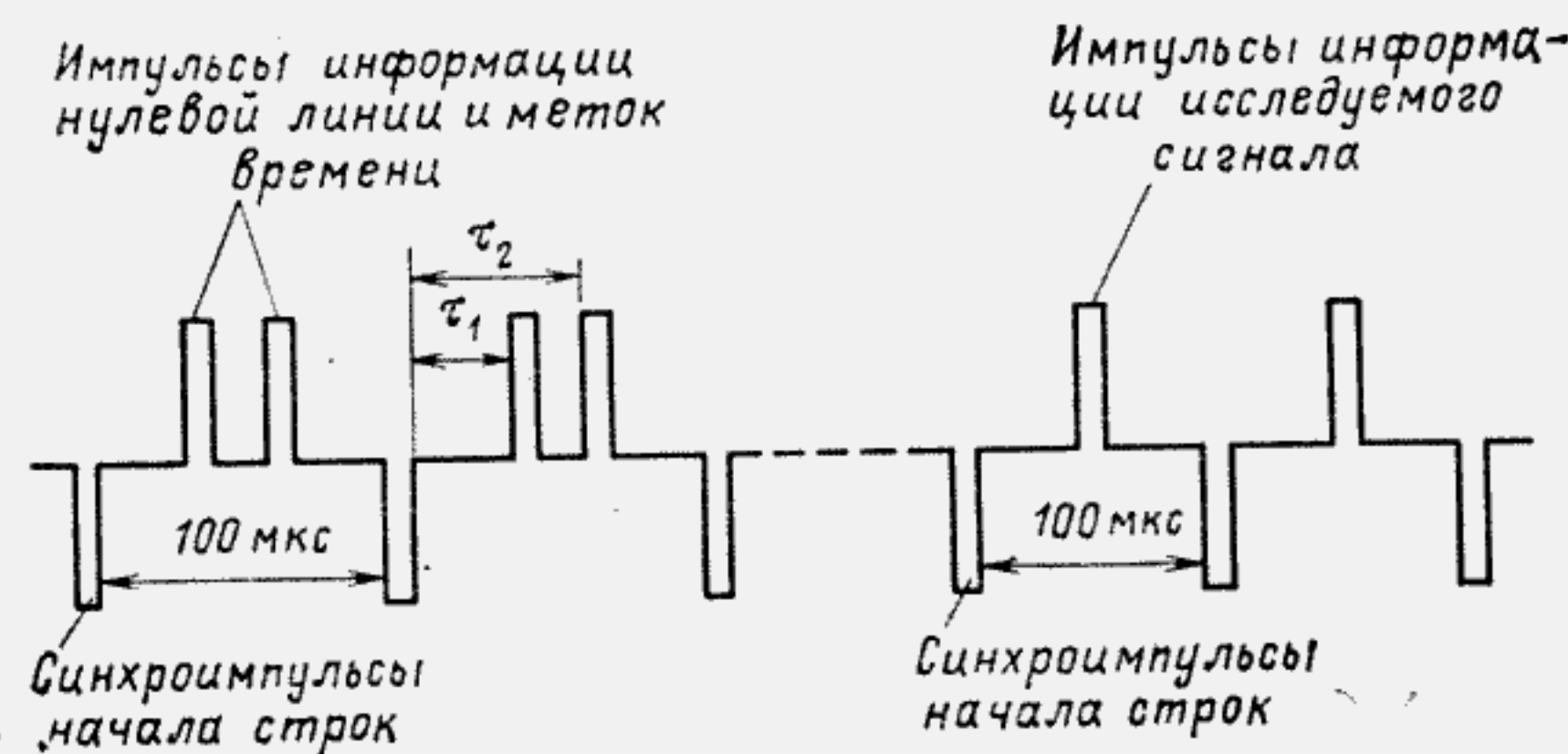


Рис. 3.4

С выхода Φ последовательность импульсов, представленная на рис. 3.4, подается для подсвета луча ИТ. При этом на экране трубки высвечиваются точечные осциллограммы сигналов градуировки (рис. 3.2), которые фотографируются фотоприставкой ФП (рис. 3.5, а—г).

После окончания считывания калибровочных записей БС повторяет операции подготовки, как указано выше (рис. 3.5, д).

После окончания стадии подготовки по командам БС на коллектор ЗЭЛТ подается напряжение записи и масштабно-временной преобразователь переводится в ждущий режим. В ждущем режиме устройство находится до прихода на его вход исследуемого сигнала.

Исследуемый (преобразуемый) сигнал запускает ГРЗ, через линию задержки (ЛЗ) подается на сигнальные отклоняющие пластины записывающего луча.

вающего луча ЗЭЛТ и записывается на мишени в виде линии зарядного рельефа в координатах XU (рис. 3.5, *е*). По окончании прямого хода с ГРЗ поступает сигнал, по которому БС производит переключения блоков ККН, ГКР, ГСР, необходимые для выполнения операции считывания (рис. 3.5, *ж*).

В результате работы схемы с экрана ИТ при помощи ФП фотографируется точечная осциллограмма (рис. 3.5, *з*).

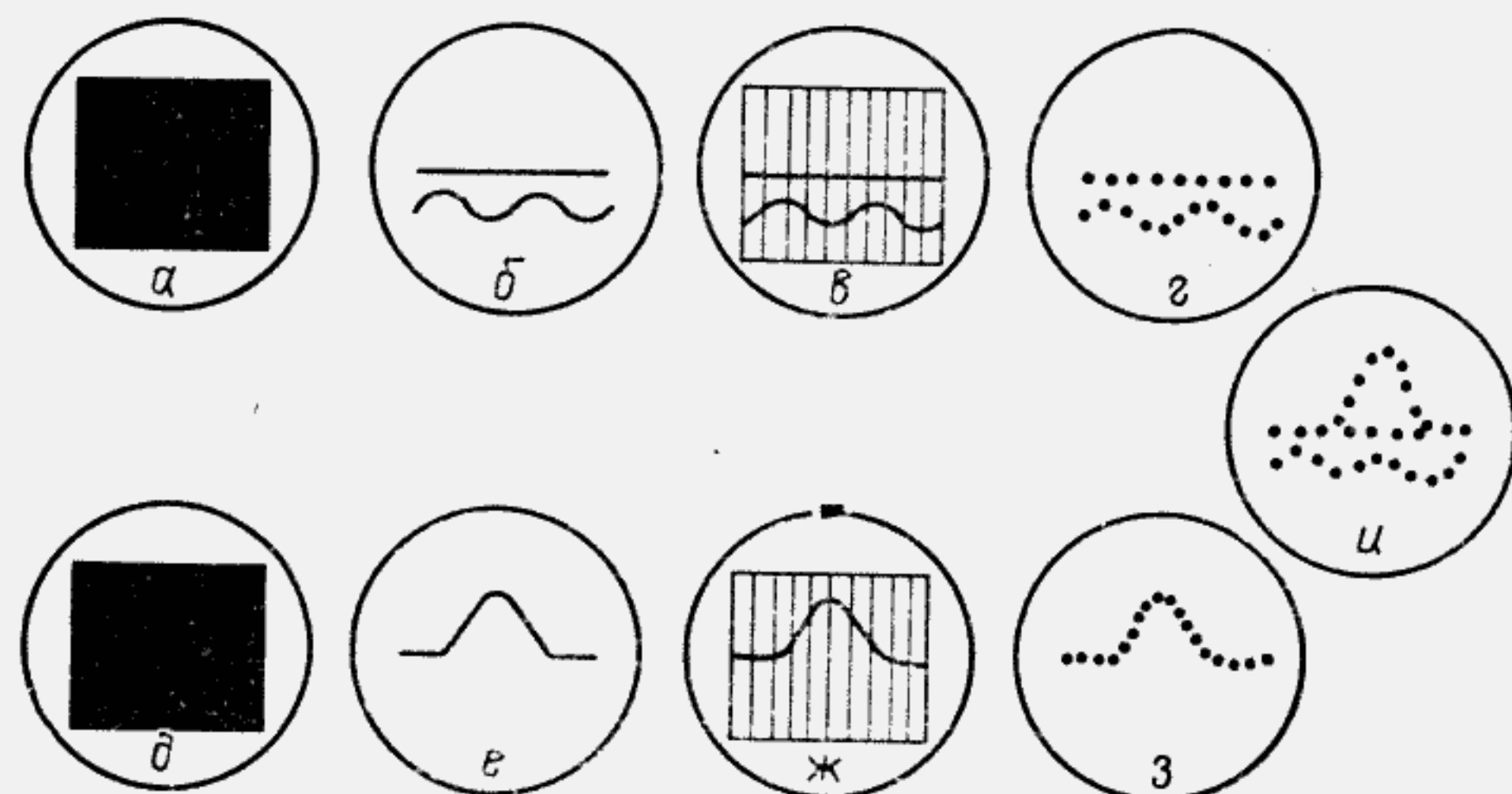


Рис. 3.5

Так как ФП находится в открытом состоянии в течение всего цикла работы масштабного преобразователя, описанного выше, то на фотопленке ФП фокусируется совмещенная осциллограмма, содержащая линии калибровки (рис. 3.5, *г*) и форму исследуемого сигнала (рис. 3.5, *з*), как изображено на рис. 3.5, *и*.

С выхода Ф последовательность сигналов с ФИМ может быть подана на блок цифрового кодирования БЦК и далее для обработки в соответствии с назначением масштабного преобразователя.

3.2. Масштабно-временное преобразование с повышенной скоростью записи сигнала

Помехи, образующиеся при движении считывающего луча по мишени, характеризуются низкочастотным спектром, что объясняется зернистостью поверхности мишени. Появление помех вызвано тем, что значения коэффициента вторичной эмиссии с ребер и граней зерен поверхности мишени в общем случае различны и между зернами могут образовываться ловушки для вторичных электронов, выход из которых затруднен.

На острых ребрах зерен возникают напряженности поля, превышающие значения напряженности поля на гранях и других участках поверхностного слоя мишени. Поэтому на ребрах и остриях зерен изме-

нение во времени нанесенных при подготовке заряда и потенциала происходит быстрее, чем на остальных участках мишени.

Уменьшение помех при считывании достигается уменьшением шероховатости поверхности мишени и сокращением времени между подготовкой и считыванием [33].

Известно, что гладкая полированная поверхность диэлектрика имеет меньшее поверхностное сопротивление утечки, чем шероховатая поверхность. На гладкой мишени накопленный при записи заряд «расплывается» сравнительно быстро, значение накопленного заряда падает, область его расширяется, что приводит к деформации считанного импульса. Поэтому в запоминающих трубках не применяют гладких мишеней. Если в качестве потенциалонесущей поверхности мишени используют стекло, то его специально делают шероховатым.

Как показал опыт разработки и изготовления ЗЭЛТ, таких как, например, СОЗУ2 и др., хорошие характеристики обеспечивают структуры мишеней, полученные осаждением на стеклянную основу люминофора с последующим напылением на него тонкого слоя окиси магния. Однако и в этом случае помехи, образующиеся из-за зернистости мишени, ограничивают скорость записи.

Помехи считывания целесообразно уменьшить за счет сокращения времени выдержки между окончанием подготовки и началом считывания.

Так как момент появления преобразуемого сигнала на входе масштабного преобразователя является случайным, то представляется необходимым не ограничивать стадию подготовки одним кадром, как описано выше, а осуществлять ее в течение нескольких кадров вплоть до появления преобразуемого сигнала. Запись этого сигнала необходимо произвести при высоком импульсном потенциале коллектора, а считывание продолжить тем же растром, которым проводилась до этого подготовка. Длительная подготовка мишени при малом токе луча приводит к образованию шумов во время считывания, меньших, чем аналогичные шумы при большом токе луча. Объясняется это тем, что во время подготовки с большим током луча в пространстве между зернами мишени образуются повышенные скопления вторичных электронов, образующих объемный отрицательный потенциал, значительно превышающий по абсолютному значению потенциалы других участков мишени. В результате участки мишени с повышенным значением отрицательного объемного потенциала по окончании подготовки приобретают потенциал более отрицательный, чем все остальные участки. Это равносильно тому, что мишень имеет различные по значению σ_d на различных участках.

Для уменьшения количества вторичных электронов, скапливающихся в пространстве между зернами поверхности мишени, необходимо уменьшать ток луча при подготовке. Целесообразно задавать ток луча при подготовке равный току луча при считывании [33].

Масштабно-временное преобразование с непрерывной подготовкой мишени основано на использовании ЗЭЛТ в режиме работы 0, +, +, поэтому приведенная выше методика расчета такого режима справедлива и в этом случае.

Структурная схема масштабного-временного преобразователя с непрерывной подготовкой представлена на рис. 3.6. Блоки, обеспечивающие градуировку устройства — амплитудную и временную, на этой схеме не представлены. Градуировка устройства происходит аналогично схеме на рис. 3.1.

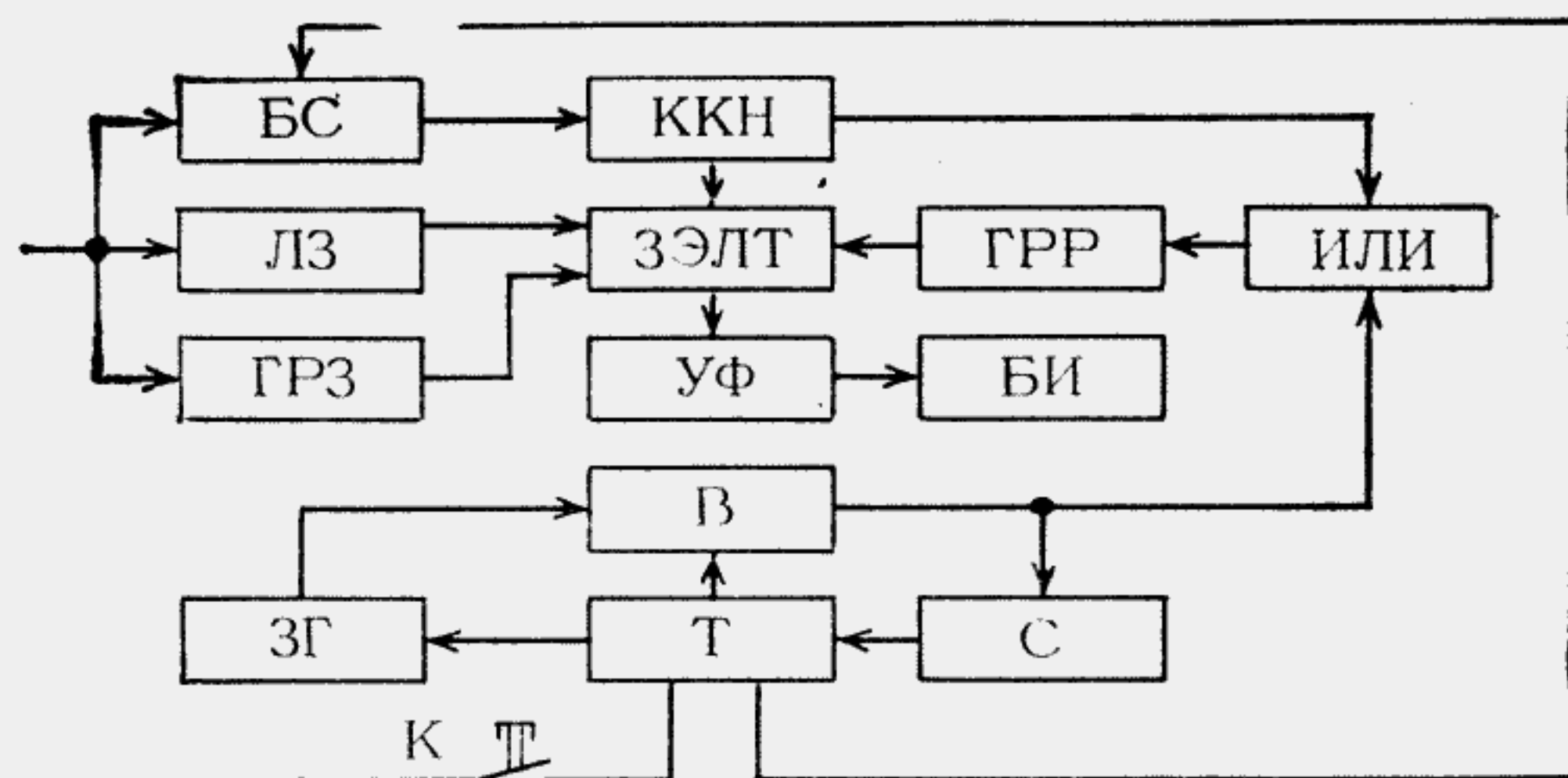


Рис. 3.6

Подготовка мишени осуществляется автоматически после нажатия кнопки *К*. При этом запускается триггер *Т* и клапан *В* начинает пропускать импульсы от задающего генератора (*ЗГ*) через логический элемент *ИЛИ* на генератор растровой развертки (*ГРР*) ЗЭЛТ и на вход счетчика *С*.

Выходным сигналом счетчика *С* триггер *Т* устанавливается в исходное состояние, запрещая прохождение импульсов задающего генератора (*ЗГ*) через клапан *В* на вход генератора растровой развертки (*ГРР*). Число разрядов счетчика *С* должно соответствовать требуемому количеству циклов растровой развертки при подготовке. Счетчик *С* может быть предварительно переключен в состояние, при котором клапан *В* постоянно открыт и *ГРР* работает непрерывно. При этом блок синхронизации *БС* подает команду на коммутатор коллекторного напряжения (*ККН*), которым к коллектору ЗЭЛТ подключается напряжение, соответствующее стадии подготовки.

Запись входного сигнала осуществляется автоматически. Входной сигнал однократно запускает генератор развертки записи (*ГРЗ*) и через линию задержки (*ЛЗ*) подается на сигнальные отклоняющие пластины ЗЭЛТ. Одновременно входной сигнал через блок синхронизации *БС* по-

ступает на коммутатор коллекторного напряжения, который вырабатывает положительный импульс напряжения. Этот импульс подается на коллектор ЗЭЛТ с небольшим опережением по отношению к моменту срабатывания *ГРЗ* и оканчивается после окончания прямого хода развертки записи. При этом происходит нанесение зарядного рельефа на мишени ЗЭЛТ в соответствии с амплитудно-временной характеристикой входного сигнала.

Переключение масштабного-временного преобразователя на считывание осуществляется автоматически после снятия высокого напряжения с коллектора ЗЭЛТ коммутатором коллекторного напряжения (*ККН*). В зависимости от предустановки счетчика *С* генератор растровой развертки (*ГРР*) запускается однократно либо работает непрерывно. В обоих случаях с *ККН* на коллектор ЗЭЛТ подается напряжение, соответствующее считыванию.

При непрерывном запуске *ГРР* запись может быть произведена в период между окончанием одного кадра подготовки и началом другого, либо во время прямого хода кадровой развертки в середине раstra.

Если запись сигнала произошла после окончания очередного кадра, но до момента начала первой строки раstra сканирующего луча, то вся осциллограмма записанного сигнала будет считана последовательно строка за строкой начиная с первой строки. Однако описанное маловероятно, так как момент прихода регистрируемого сигнала случаен.

Если запись сигнала произошла в промежутке времени между началом и окончанием одного кадра сканирования, то считывание записанного сигнала происходит одним из трех способов:

окончанием кадра, начиная с той части осциллограммы записанного сигнала (с той части мишени), по которой начинает сканировать очередная строка считывания после окончания записи; при этом начальная часть сигнала считывается началом следующего кадра. В последующих устройствах нумерация и счет строк позволяют сочлениить две части кадра в нужной последовательности;

после записи считывающий луч блокируют на время окончания кадра сканирования и деблокируют в момент начала следующего кадра сканирования;

после записи кадрная развертка раstra прерывается, генератор развертки переключается в исходное состояние и считывание происходит начиная с первой строки раstra.

Так как длительность записи и соответственно длительность высоковольтного импульса на коллекторе при записи на несколько порядков меньше длительности прямого хода строчной развертки раstra, то можно не блокировать луч подготовки и считывания на время записи. В этом случае на мишени запишется точка на строке считывания с высоким потенциалом, которая будет считана. Таким образом в последовательность считанных сигналов вводится «метка», по которой можно производить «сшивку» двух кадров считывания.

Считанные сигналы с ЗЭЛТ поступают на усилитель-формирователь (УФ), в котором выделяются импульсы-отметки, и подаются, например, на блок индикации (БИ), воспроизводящий дискретную форму однократного исследуемого сигнала в виде точечной осциллограммы в преобразованном масштабе времени.

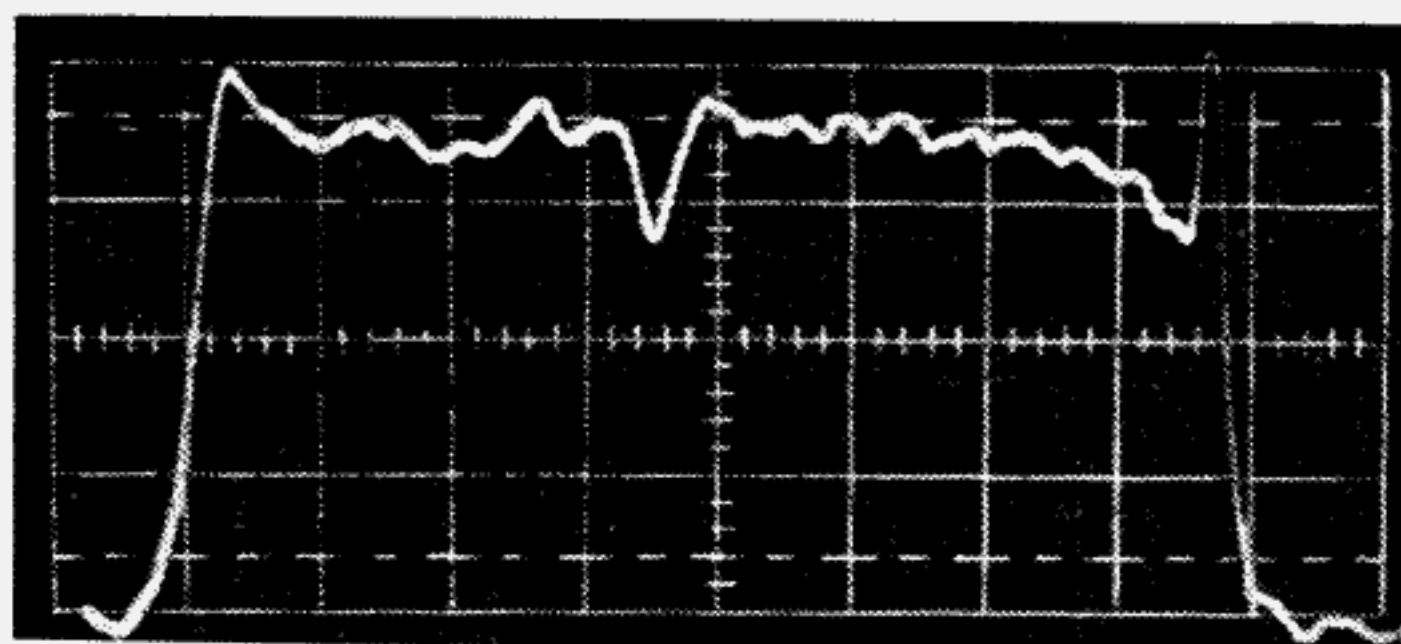


Рис. 3.7

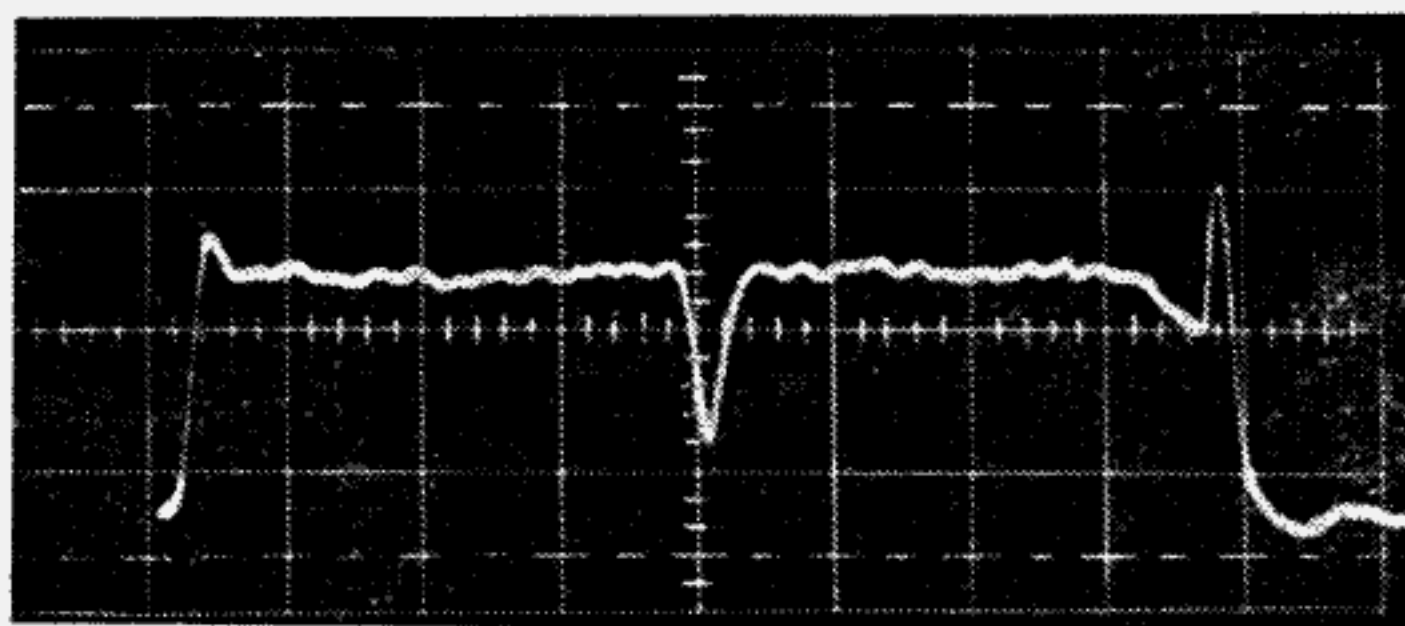


Рис. 3.8

На рис. 3.7 и 3.8 приведены осциллограммы считанных сигналов, полученные при работе схемы, изображенной на рис. 3.6.

Осциллограмма, приведенная на рис. 3.7, характеризует работу масштабно-временного преобразователя при однократной подготовке мишени большим током луча с последующей выдержкой между окончанием операции подготовки и началом операции считывания, равной нескольким десятым долям секунды, что соответствует времени пребывания аппаратуры в ждущем режиме перед регистрацией исследуемого сигнала. На уровне пьедестала отчетливо видна помеха, характерная для мишени ЗЭЛТ. Эта помеха лежит приблизительно в том же частотном диапазоне, что и считанный импульс.

Осциллограмма, приведенная на рис. 3.8, получена при непрерывной длительной подготовке в течение нескольких циклов раstra с небольшой паузой между окончанием подготовки и началом считывания (менее 10 мс). При этом значение тока луча подготовки в первом случае больше, чем во втором ($I_{п1} > I_{п2} = I_c$).

Из второй осциллограммы видно, что при непрерывной подготовке мишени уровень шумов на пьедестале меньше, чем в первом случае, и спектр шума становится более высокочастотным, что облегчает выделение сигнала.

Подробная схема масштабно-временного преобразователя, обеспечивающего преобразование при повышенной скорости записи, приведена в [41].

3.3. Масштабно-временное преобразование последовательности импульсных сигналов

Описанное устройство масштабно-временного преобразования (см. рис. 3.6) обеспечивает также регистрацию последовательности импульсных сигналов. Однако минимальное время, необходимое для преобразования одного сигнала, составляет не менее двух периодов кадровой развертки этапов подготовки и считывания. При этом подготовка осуществляется однократным растром.

На рис. 3.9, а приведена эпюра напряжений $U_{к.п}$, $U_{к.з}$, $U_{к.с}$ подаваемых на коллектор для подготовки, записи и считывания соответственно (верхняя кривая), и напряжений, подаваемых для деблокировки

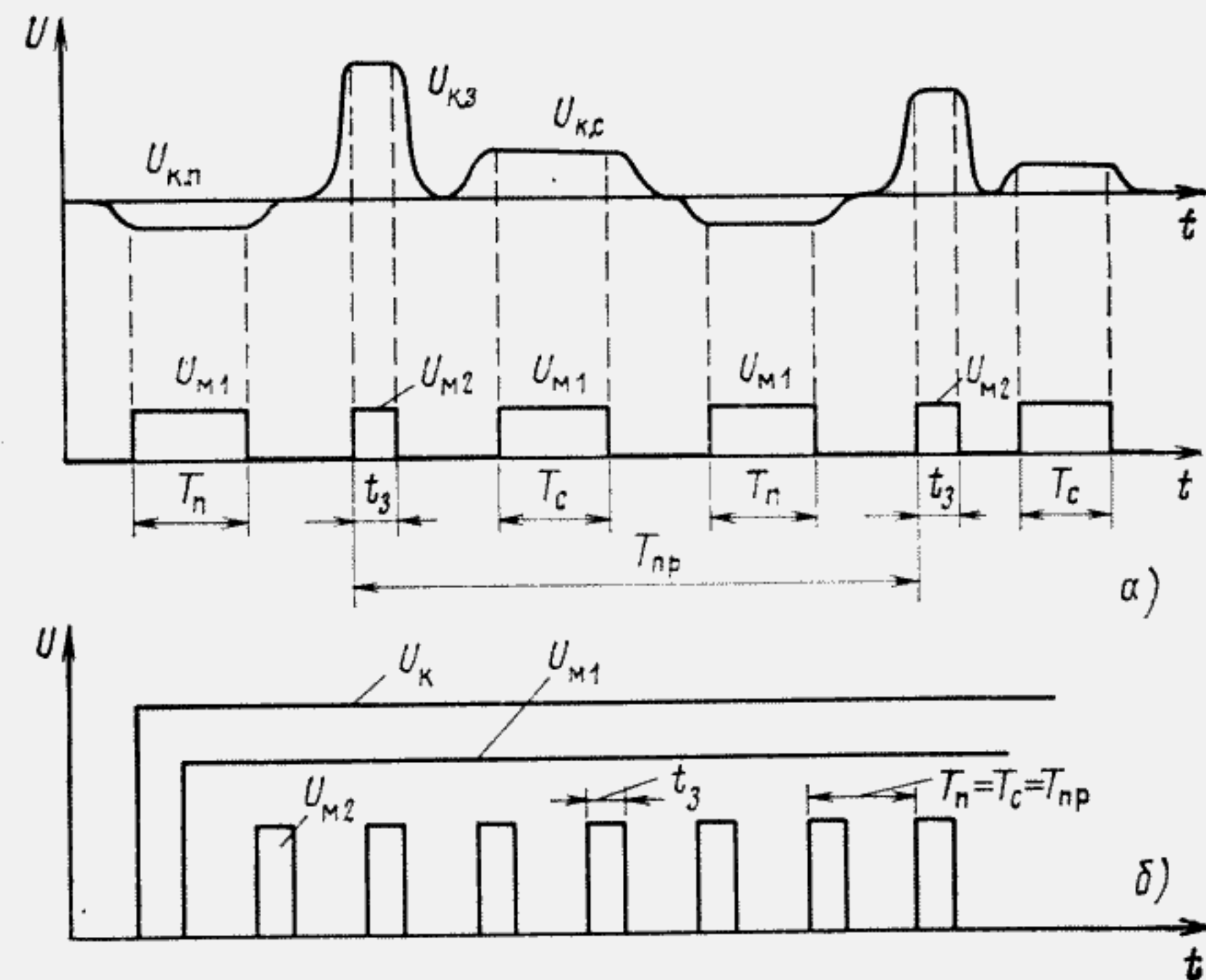


Рис. 3.9

лучей записи (t_3) и подготовки и считывания ($T_{п}$, $T_{с}$) для случая, если запись осуществляется в период между подготовкой и считыванием. В этом случае имеем минимальный период преобразования $T_{пр} \geq T_{п} + T_{с} \approx (2 \div 3) T_{с}$.

Для уменьшения значения $T_{пр}$ необходимо уменьшать длительность времени установления напряжений на коллекторе и, самое главное, совмещать во времени этапы подготовки и считывания.

Однако совместить этапы подготовки и считывания рассмотренными выше способами нельзя, так как при этом на коллектор должны быть поданы напряжения, отличающиеся между собой по значению и полярности. Проведение этапов подготовки и считывания при одинаковом напряжении на коллекторе (или на коллекторной сетке) не обеспечивает необходимой разрешающей способности ЗЭЛТ, так как при этом отсутствует необходимая разность потенциалов между поверхностью мишени и коллектором на этапе считывания, способствующая уходу вторичных электронов на коллектор, а около записанной зарядной дорожки отсутствует потенциальный барьер.

Предположим, что в ЗЭЛТ каким-либо образом поддерживается требуемая для ускорения вторичных электронов разность потенциалов между поверхностью мишени и коллектором и запись осуществляется нанесением на мишень положительных зарядов. При этом для считывания достаточно наличия у поверхности мишени одних вторичных электронов, т. е. электронов с малыми энергиями. В описанных ранее случаях считывание осуществляется только вторичными электронами, а луч первичных электронов используется для нанесения зарядов на мишень (например, при записи) и как некоторый «источник вторичных электронов» (например, при считывании).

Если в рассматриваемую ЗЭЛТ ввести медленные электроны в виде пучка, то будет происходить считывание в условиях, практически не отличающихся от описанных выше. Энергия электронов определяется общим ускоряющим потенциалом, значение которого меньше первого критического потенциала $U_{кр1}$ (см. рис. 1.1).

Таким образом, если в ЗЭЛТ одна из двух пушек будет формировать пучок электронов с указанной сравнительно малой энергией, то его можно использовать в качестве считывающего луча.

Как известно, мишень, облучаемая электронами с ускоряющим потенциалом, значение которого меньше $U_{кр1}$, приобретает потенциал, близкий к ускоряющему потенциалу пушки, т. е. близкий к потенциалу катода пушки. Поэтому если непрерывно сканировать мишень пучком медленных электронов, то на ее поверхности будет поддерживаться отрицательный потенциал, не превышающий значения $U_{кр1}$.

Из сказанного следует, что луч медленных электронов может поддерживать отрицательный потенциал мишени, осуществляя подготовку, и одновременно производить считывание, при этом на коллекторе или на коллекторной сетке можно иметь постоянный потенциал, равный или близкий к нулю.

Запись в такой ЗЭЛТ должна осуществляться лучом, энергия электронов которого у поверхности мишени определяется сравнительно высоким потенциалом, при котором $\sigma = \sigma_{max}$, т. е. потенциалом, лежащим

в пределах между первым и вторым критическими потенциалами (см. рис. 1.1).

Для создания равномерного ускоряющего поля между мишенью и коллектором в ЗЭЛТ целесообразно использовать плоскую коллекторную сетку.

Поскольку при переходе от подготовки к считыванию не требуется производить каких-либо коммутаций, в том числе коммутаций коллекторного напряжения, то очевидно, что этапы подготовки и считывания не отличаются друг от друга и их можно совместить в одну операцию.

Схема ЗЭЛТ для рассматриваемого случая имеет вид, изображенный на рис. 3.1. Принцип ее работы сводится к следующему. Луч пушки, энергия электронов которого определяется потенциалом, меньшим первого критического потенциала (луч первой пушки), сканирует мишень непрерывно кадр за кадром. При этом на коллектор подают постоянный потенциал U_k (см. рис. 3.9, б), который может быть равен нулю. Первая пушка излучает электроны, когда к модулятору пушки приложено напряжение $U_{м1}$, как условно показано на рис. 3.9, б. Луч пушки можно блокировать на время обратного хода кадровой развертки.

В области мишени электроны луча первой пушки имеют энергию, определяемую потенциалом, меньшим первого критического. При этом полный коэффициент вторичной эмиссии мишени $\sigma < 1$, а мишень при сканировании приобретает отрицательный потенциал, который со временем «растекается» и компенсируется за счет рекомбинации с дырками и положительными ионами. Уменьшение отрицательного заряда мишени восполняется электронами луча первой пушки, поэтому на поверхности мишени постоянно поддерживается отрицательный потенциал. При этом электронный луч почти полностью отражается от мишени, т. е. имеет место эффект так называемого электронного зеркала.

Запись осуществляется лучом второй пушки без выключения первого луча, при этом потенциал коллектора может не меняться. Энергия электронов второго луча у поверхности мишени значительно больше энергии электронов первого луча и определяется ускоряющим потенциалом, соответствующим значению, при котором полный коэффициент вторичной эмиссии $\sigma = \sigma_{max} > 1$. Вторичные электроны, образованные при записи, практически полностью отбираются коллектором, так как между мишенью и коллектором имеет место ускоряющая разность потенциалов и на мишени образуется положительный потенциал относительно потенциала остальной ее поверхности. При указанном соотношении потенциалов мишени, коллектора и записанной дорожки около дорожки образуется потенциальный барьер в соответствии с описанным в § 1.6.

По окончании записи электронный луч второй пушки выключается и начинается считывание, так как первый луч непрерывно сканирует мишень по растрю. Пересекая записанную дорожку, первый электронный луч компенсирует положительные заряды, доведя потенциал мише-

ни в этих местах до установившегося на поверхности мишени отрицательного потенциала. Тем самым в нагрузочном сопротивлении ЗЭЛТ выделяются отрицательные считанные импульсы.

Считывание может осуществляться аналогично описанному в § 3.2.

Таким образом, в рассматриваемом случае сокращение периода преобразования сигнала происходит за счет совмещения во времени подготовки и считывания и исключения времени переходных процессов при коммутации потенциала коллектора.

Совмещение во времени подготовки мишени и считывания сигнала обеспечивает минимально возможный период преобразования $T_{пр} = T_c$ (рис. 3.9, б), который определяется заданным значением коэффициента масштабно-временного преобразования $K_M = T_c/t_3$ и характеризуется максимальной пропускной информационной способностью [34]. Однако достигаемые при этом скорость записи и разрешающая способность несколько ниже, чем в преобразователе, описанном в § 3.2.

Два последних рассмотренных способа масштабно-временного преобразования лежат в основе преобразования длительных импульсных последовательностей, которые имеют полосу частот, соответствующую импульсным сигналам микро- и наносекундной длительности.

Для решения задачи сужения спектра непрерывных сообщений весь поток сообщения разбивается на отдельные участки определенной длительности Δt . Затем каждый отрезок сигнала длительностью Δt записывается по отдельности масштабно-временным преобразователем и по окончании записи считывается каждый в отдельности с пониженной скоростью. Графически это условно изображено на рис. 3.10, где t_{31} — время записи первого отрезка непрерывного сообщения; T_{c1} — время считывания первого отрезка сообщения; t_{32} , t_{33} и т. д. — время записи последующих отрезков непрерывного сообщения; T_{c2} , T_{c3} и т. д. — соответственно время считывания.

Принцип указанного преобразования заключается в том, что пока производится считывание первого отрезка сообщения, в течение времени T_{c1} производится запись последующих отрезков сообщения t_{32} , t_{33} и т. д., каждого из них на отдельном преобразователе, что соответствует

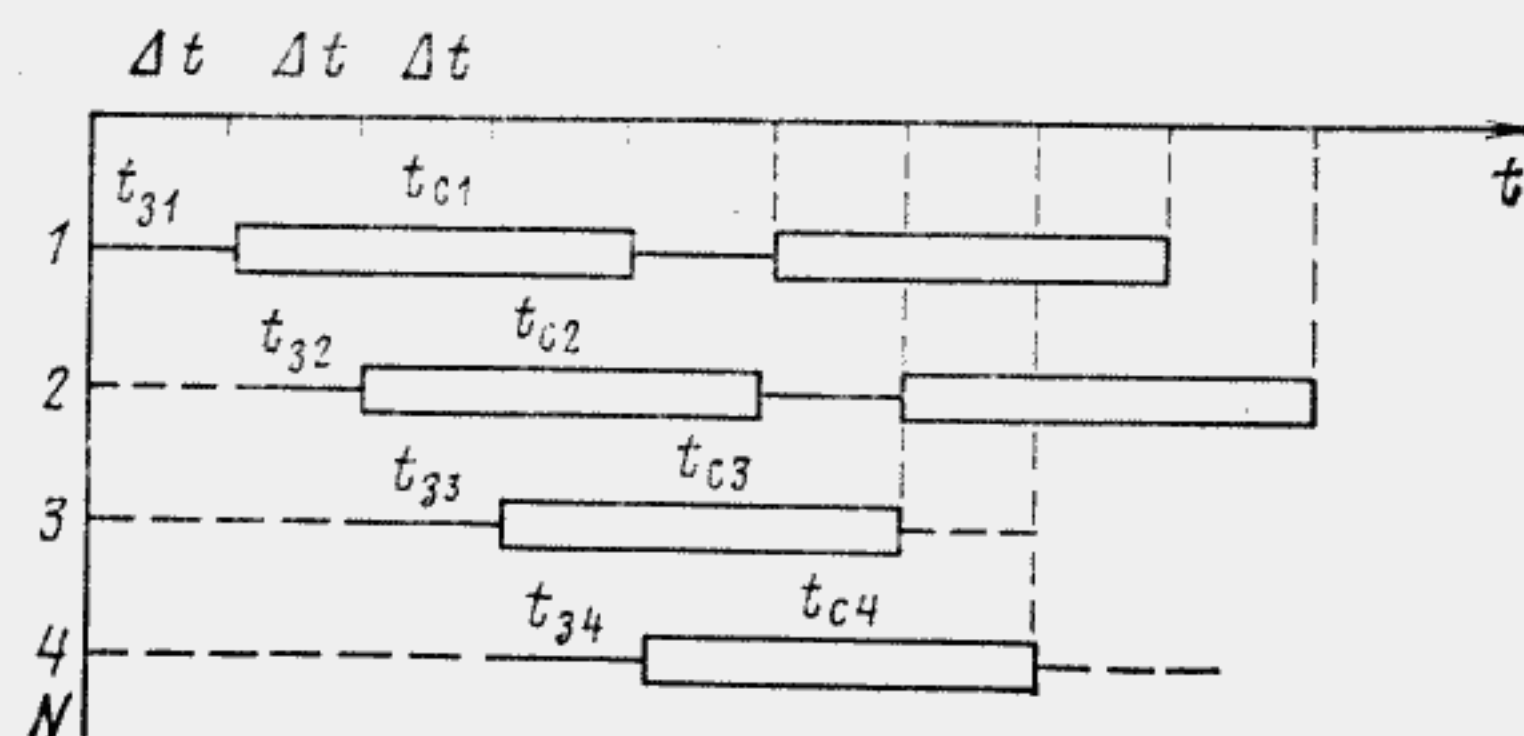


Рис. 3.10

номерам по оси N (рис. 3.10). Таким образом исходное широкополосное сообщение разбивается на ряд более узкополосных сообщений, передача которых осуществляется одновременно по отдельным линиям передачи. Происходит геометрическое разделение каналов.

Относительно узкополосные сообщения по отдельным линиям связи могут быть переданы на большое расстояние, обработаны и синтезированы в сообщении в реальном масштабе времени. При этом необходимо осуществить обратное масштабно-временное преобразование, при котором

$$K_M = t_3/T_c < 1.$$

Более подробно данный способ МВП рассмотрен в [35].

3.4. Компенсация амплитудной и временной погрешности масштабно-временных преобразователей

Компенсация амплитудной и временной погрешности масштабно-временных преобразователей основана на градуировке амплитудной и временной шкал преобразователя непосредственно до или после преобразования. Такой принцип удобен тем, что:

позволяет рассматривать некоторые случайные погрешности как систематические. Например, ряд составляющих случайной погрешности для типа преобразователя является систематической погрешностью для каждого данного экземпляра;

позволяет учесть погрешность, обусловленную реакцией преобразователя на изменение внешних влияющих факторов, например температуры и влажности окружающей среды и др., а также изменение характеристик составляющих элементов преобразователя в зависимости от времени, так называемое старение;

не предполагает детального изучения метрологических характеристик составных узлов преобразователя, которое, вообще говоря, является трудоемкой задачей.

Кроме того, при этом уменьшается динамическая погрешность масштабно-временного преобразования, обусловленная большим значением производной dy/dx сигнала в координатах мишени ЗЭЛТ.

Масштабно-временной преобразователь является типичным представителем приборов того класса, которые позволяют осуществить все указанные выше компенсации погрешностей электрическим способом внутри самого прибора или с использованием ЭВМ при его работе [50].

Поскольку мера измерения погрешности формы сигналов до сих пор полностью не определена, то ниже рассмотрим, как это принято, отдельно амплитудную и временную погрешности масштабно-временного преобразования.

Основной составляющей систематической погрешности экземпляра масштабно-временного преобразователя является погрешность, обусловленная различием чувствительности по отклонению луча для различных

участков мишени ЗЭЛТ. Чувствительность в различных участках мишени имеет не только разное значение, но и направление, т. е. может быть представлена векторной величиной, что обуславливает наличие геометрических искажений.

Принцип градуировки основан на определении вектора чувствительности для каждой точки мишени, выражаемого в виде поправочных коэффициентов, которые алгебраически суммируются со значением счи-

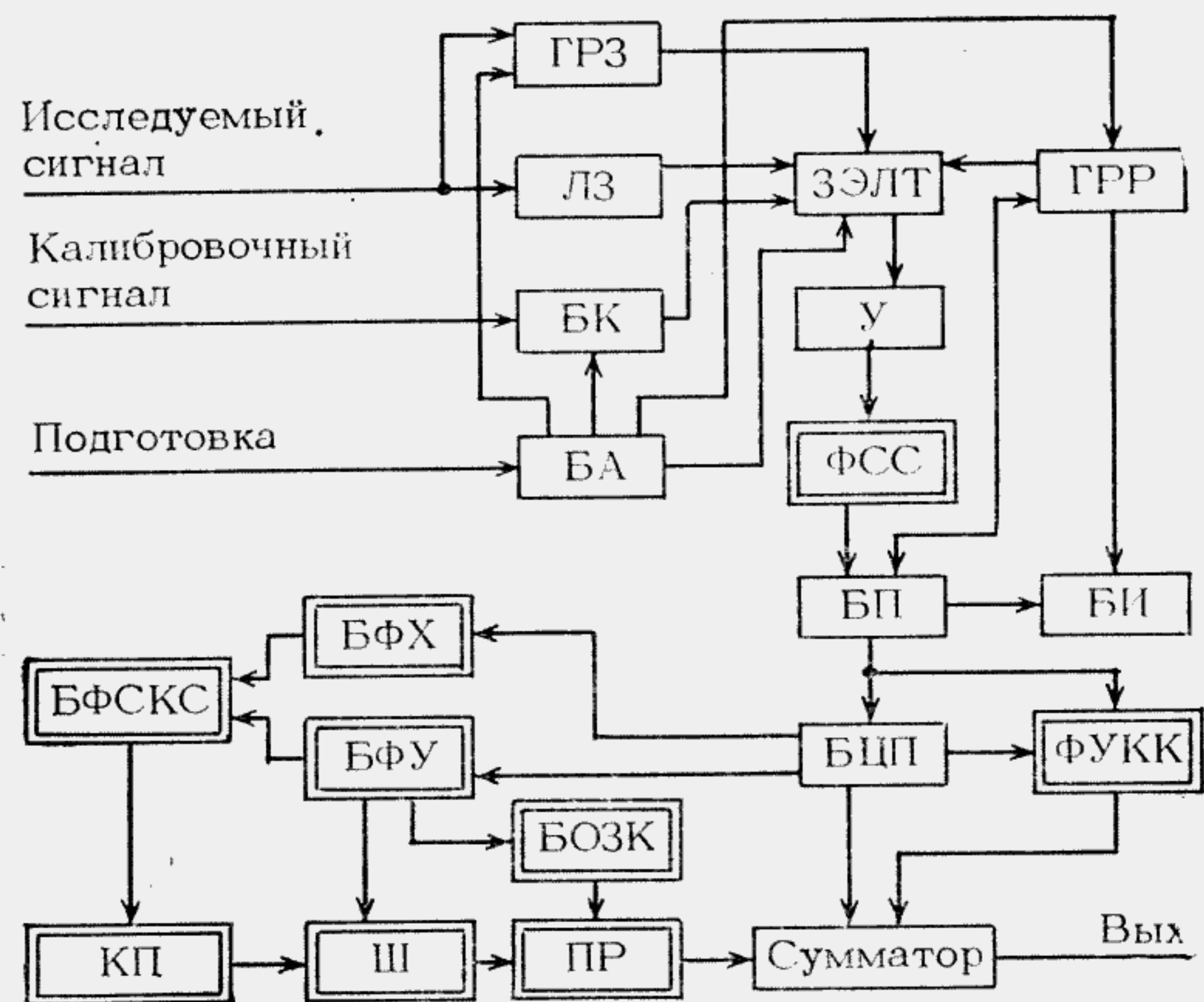


Рис. 3.11

танной ординаты преобразуемого сигнала. Достигается это использованием в схемах, изображенных на рис. 3.1 и 3.6, специальной корректирующей схемы, которую можно рассматривать как специализированный процессор.

На рис. 3.11 представлена функциональная схема масштабнo-временного преобразователя с компенсацией амплитудной погрешности. Блоки, обеспечивающие повышение точности преобразования, изображены двойной линией.

После окончания подготовки масштабнo-временной преобразователь переходит в ждущий режим. Исследуемый сигнал запускает генератор развертки записи (ГРЗ) и через линию задержки (ЛЗ) поступает на

сигнальную отклоняющую систему ЗЭЛТ. При этом происходит запись сигнала. По окончании записи блок автоматики (БА) запускает генератор растровой развертки (ГРР) и происходит считывание записанного сигнала поперечно-строчным растром аналогично описанному выше.

Считанные импульсы через усилитель считывания поступают на формирователь считанного сигнала (ФСС).

Сформированные импульсы-отметки вместе с синхроимпульсами начала строк считывающего раstra ГРР поступают в блок памяти (БП) в виде последовательности импульсов, модулированных по фазе, и на БИ. Эти импульсы из БП передаются в блок аналого-цифрового преобразования (БЦП), в котором они преобразуются в цифровой код, пересылаемый в сумматор.

Из БЦП импульсы начала развертки считывания и считанные импульсы-отметки поступают в блок формирования X-координаты (БФХ) и блок формирования Y-координаты (БФУ), в которых формируются координаты x и y считанного импульса отметки. Координата x представлена порядковым номером строки в растре считывания, а координата y определяется длительностью прямого хода строки до пересечения его с записанным потенциальным рельефом на мишени ЗЭЛТ. По этим координатам формируются сигналы коррекции в блоке формирования сигнала коррекции считывания (БФСКС). Каждый из этих сигналов жестко привязан к определенному сегменту мишени ЗЭЛТ.

С помощью коммутационного поля КП и шифратора Ш каждому сигналу коррекции ставится в соответствие свой заранее известный корректирующий коэффициент, который суммируется с исходным кодом в сумматоре.

Корректирующие коэффициенты для данного экземпляра ЗЭЛТ масштабнo-временного преобразователя определяются предварительно и уточняются непосредственно перед преобразованием сигнала. Определение корректирующего коэффициента заключается в том, что на мишени ЗЭЛТ записывается ряд опорных уровней напряжения, количество которых определяется необходимой точностью компенсации (коррекции), в частности, количеством строк, которые вместе со столбцами образуют сетки сегментов. Записанные уровни затем считывают, измеряют, находят разность между измеренными и опорными значениями, причем сравнение производят на всех строках растровой развертки, укладываемых на данном сегменте. Корректирующий коэффициент определяется как среднее арифметическое указанных разностных значений для каждого сегмента.

В нижней половине мишени знак корректирующего коэффициента будет отрицательным. В этом случае блок определения знака коэффициента (БОЗК) формирует сигнал «минус», и корректирующий коэффициент поступает в сумматор через преобразователь (ПР), где он преобразуется в дополнительный обратный код, что равносильно вычитанию кода корректирующего коэффициента из находящегося в суммато-

ре. Таким образом, на выходе сумматора образуется скорректированный код ординаты считанного сигнала.

Как показали эксперименты [36], рабочее поле мишени ЗЭЛТ достаточно разделить на 80 сегментов — 8 сегментов по оси Y и 10 — по оси X . Такая дискретизация мишени ЗЭЛТ вполне достаточна, так как обеспечивает равенство корректирующих коэффициентов в пределах каждого сегмента. Уменьшение шагов дискретизации сверх указанных значений приводит к значительному увеличению количества рабочих элементов в блоках преобразователя без существенного увеличения точности градуировки.

При преобразовании относительно крутых участков сигнала появляется динамическая погрешность, ее значение зависит от крутизны преобразуемого сигнала, что особенно проявляется при преобразовании сигналов с крутизной более 60° и приводит к расширению считанного импульса. Очевидно, что расширение считанного импульса различно при различной крутизне записанных сигналов на мишени ЗЭЛТ.

Динамическая погрешность в определении ординаты фронта сигнала может в несколько раз превышать погрешность в определении ординаты относительно плоской части сигнала.

При преобразовании крутых сигналов (с крутизной более 60°) для максимальных значений $t_{изм} \approx 70$ мкс погрешность в измерении может достигать 5%, при меньших $t_{изм}$ погрешность может быть еще большей. Чтобы обеспечить амплитудную погрешность преобразования сигнала не хуже 2% как на плоских, так и на крутых участках сигнала, необходимо скомпенсировать динамическую погрешность.

На рис. 3.12 показано расположение считанных импульсов от плоской и наклонной частей преобразуемого сигнала относительно импульса синхронизации. При этом две строки совмещены. Погрешность соответственно составляет $t_{ист} - t'_{изм}$ и $t_{ист} - t''_{изм}$.

Для уменьшения этой погрешности необходимо к измеренному интервалу $t_{изм}$ прибавить интервал времени, равный примерно половине интервала Δt (рис. 3.12). Осуществляется это следующим образом.

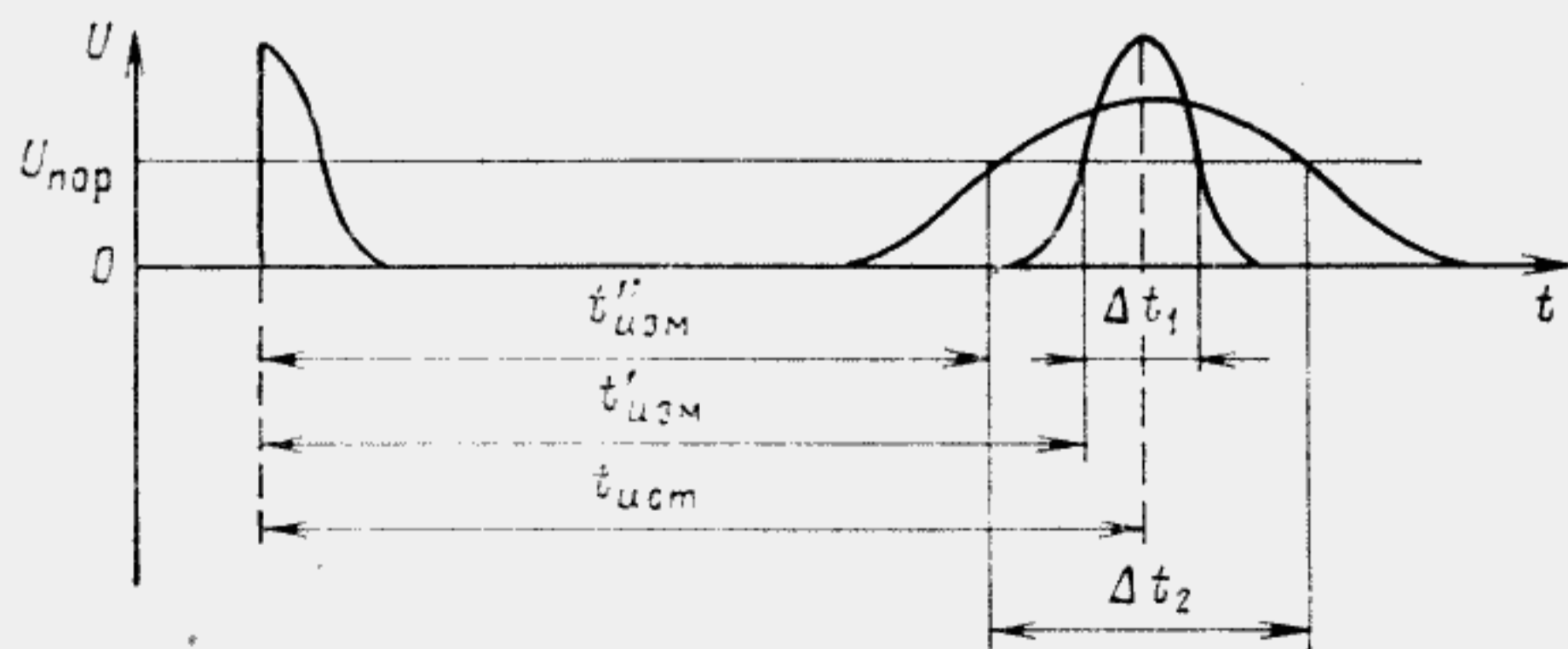


Рис. 3.12

Считанные импульсы, поступившие с усилителя считывания Y в формирователь считанного сигнала ФСС (см. рис. 3.11), преобразуются таким образом, что положение фронта сформированного (преобразованного в ФСС) импульса на временной оси определяется моментом пересечения фронта считанного импульса с уровнем порогового напряжения $U_{пор}$, а положение спада — моментом пересечения спада считанного импульса с этим уровнем. При этом длительность сформированного импульса равна Δt (рис. 3.12). Уровень дискриминации должен превышать уровень шумов приблизительно в 5 раз. Далее в процессе преобразования, рассмотренного выше, участвует сформированный сигнал.

Из блока памяти сформированный сигнал поступает на формирователь углового корректирующего коэффициента (ФУКК), который представляет собой преобразователь «временной интервал — код». В зависимости от длительности сформированных считанных импульсов, что соответствует разным углам наклона записанного на мишени ЗЭЛТ сигнала и считывающей строки, на выходе ФУКК появляется соответствующее значение двоичного кода.

Для определения центра потенциального рельефа при пересечении его считывающей строкой ($t_{ист}$ на рис. 3.12) и компенсации таким образом динамической угловой погрешности, этот код делят пополам и прибавляют половину его к коду основного интервала, определяемого интервалом времени между импульсом начала строк и передним фронтом считанного импульса.

Рассмотренная коррекция выполняется автоматически и позволяет получить амплитудную погрешность преобразования менее 2%.

Временное положение ординаты сигнала определяют по синусоидальным меткам времени подсчетом числа периодов и его частей, делении периода на равные интервалы. Однако при этом не учитывается погрешность из-за нелинейности генератора развертки записи. Нелинейность кадровой развертки при длительностях прямого хода 1—10 мс составляет десятые доли процента. Однако нелинейность развертки записи приводит к систематической временной погрешности в несколько процентов. В ряде случаев такая погрешность оказывается неприемлемой.

Рассматриваемый способ компенсации временной погрешности основан на определении положения ординаты считанного сигнала не в единицах длины мишени, а в единицах реального времени, чем уменьшается влияние нелинейности развертки записи по оси X мишени. Для определения временного положения ординаты считанного сигнала относительно момента начала кадровой развертки на этом интервале подсчитывается число полных периодов калибрационной синусоиды (зон) и доля периода (доля зоны), в котором находится рассматриваемая ордината (рис. 3.13). За опорные «реперные» точки приняты точки пересечения синусоиды с нулевой линией, определяющие период синусоиды. Частота генератора синусоидальных колебаний стабилизирована кварцем, нестабильность частоты не превышает $10^{-4}\%$.

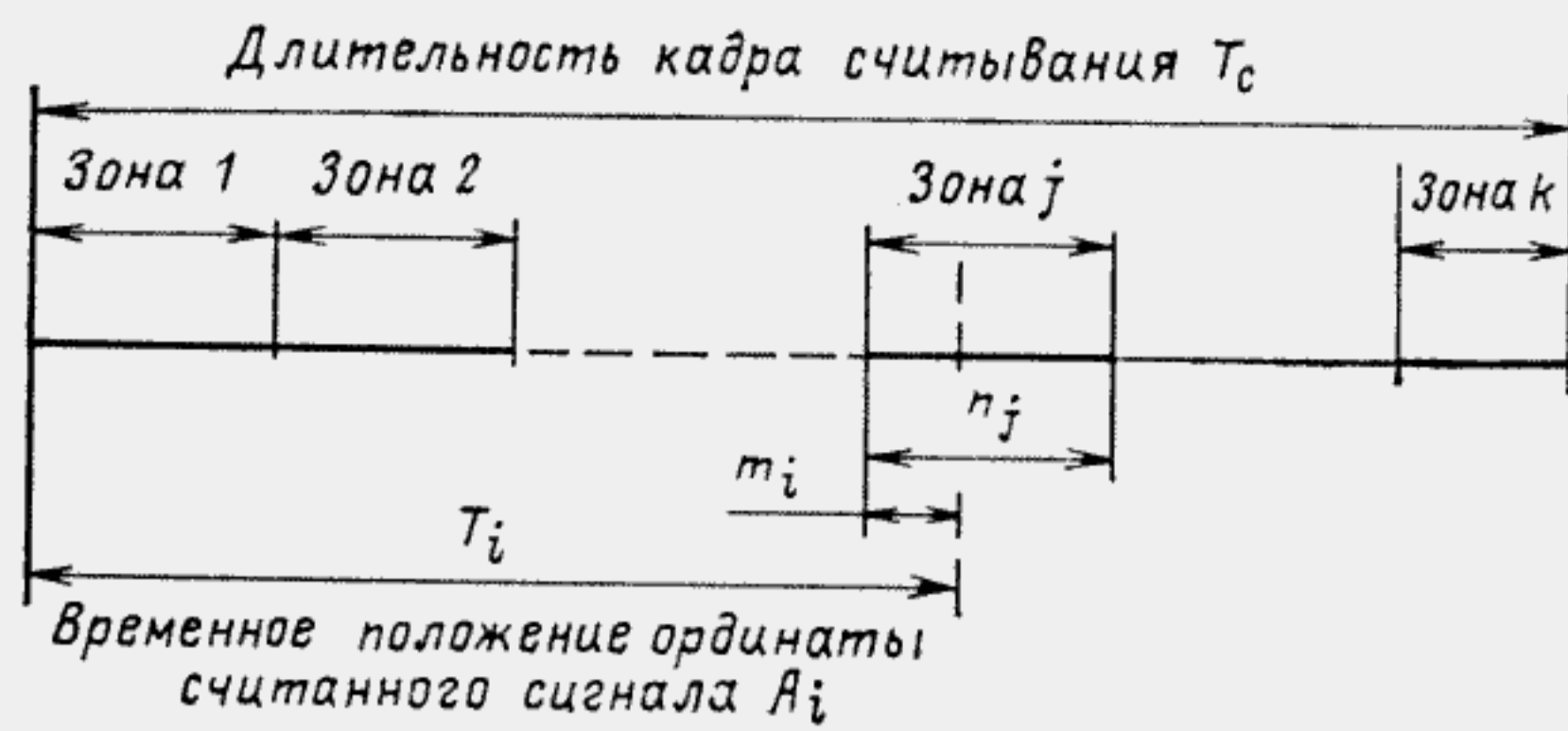


Рис. 3.13

На рис. 3.14 приведена упрощенная функциональная схема масштабно-временного преобразователя с компенсацией временной погрешности. Блоки и устройства, используемые для определения временного положения ординаты преобразуемого сигнала, изображены двойной линией; широкой соединительной стрелкой между блоками условно показаны шины с несколькими линиями передачи сигналов. Преобразователь содержит генератор кадровый и генератор строчной развертки, соответственно ГКР и ГСР, а также специальный генератор подсвета всей длительности кадра ГП дополнительно к подсвету на время прямого хода строчной развертки (соответствующий генератор включен в состав ГСР). Остальные обозначения аналогичны рис. 3.11.

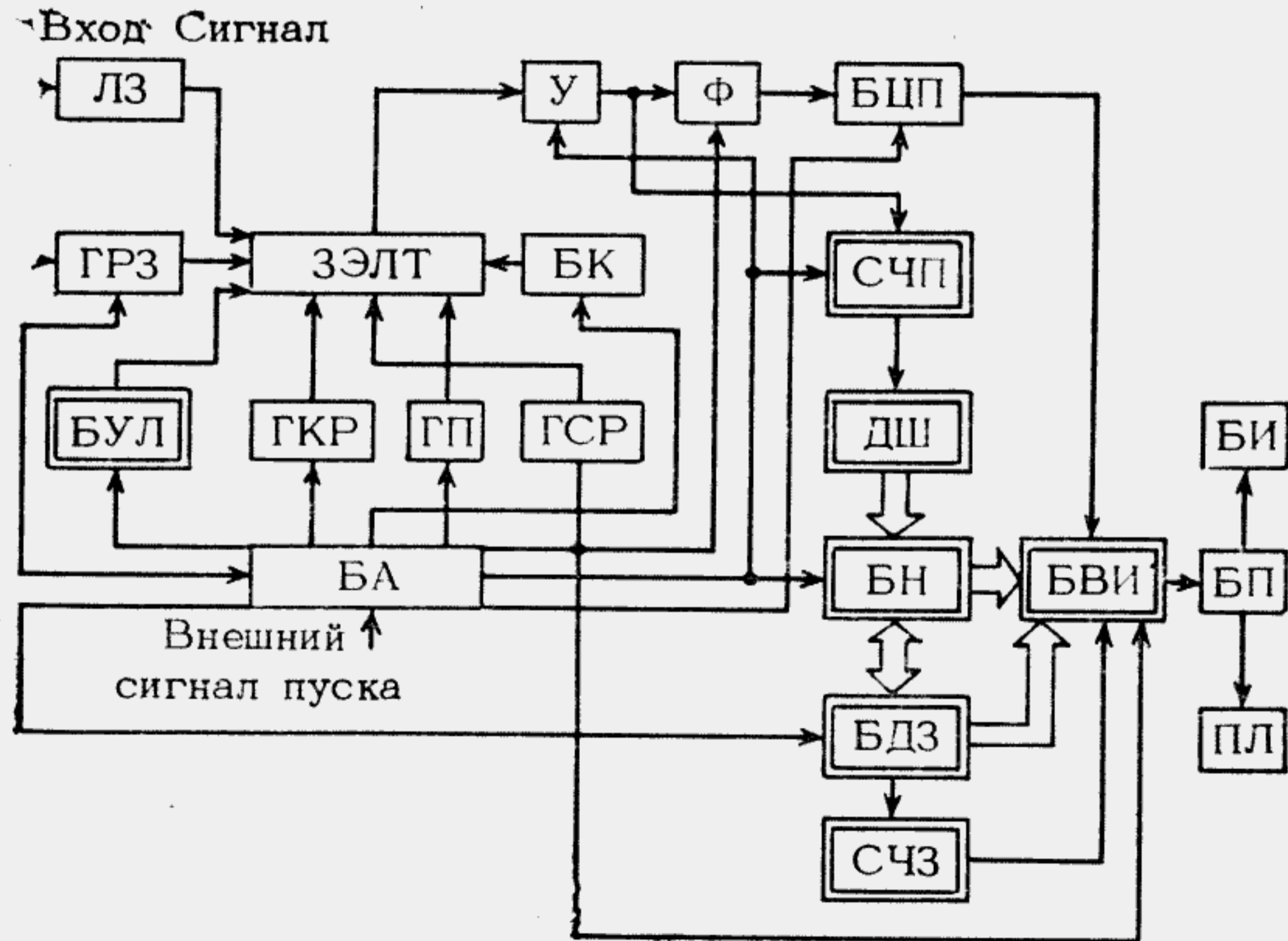


Рис. 3.14

Вначале производится амплитудная градуировка путем записи и считывания калибровочных уровней, как описано выше. Цифровые значения этих уровней из блока аналого-цифрового преобразования (БЦП) через блок вывода информации (БВИ) передаются в БП. Счетчик числа периодов синусоиды (СЧП) заблокирован сигналом БА, и импульсы на выходе СЧП отсутствуют.

Затем производится градуировка временной шкалы. После записи калибровочной синусоиды БА вырабатывает сигнал, по которому блок управления лучом трубки (БУЛ) устанавливает на пластинах ЗЭЛТ такое смещение, что исходное положение считывающего луча, управляемого генератором кадровой развертки, совпадает с исходным положением записывающего луча в плоскости мишени ЗЭЛТ.

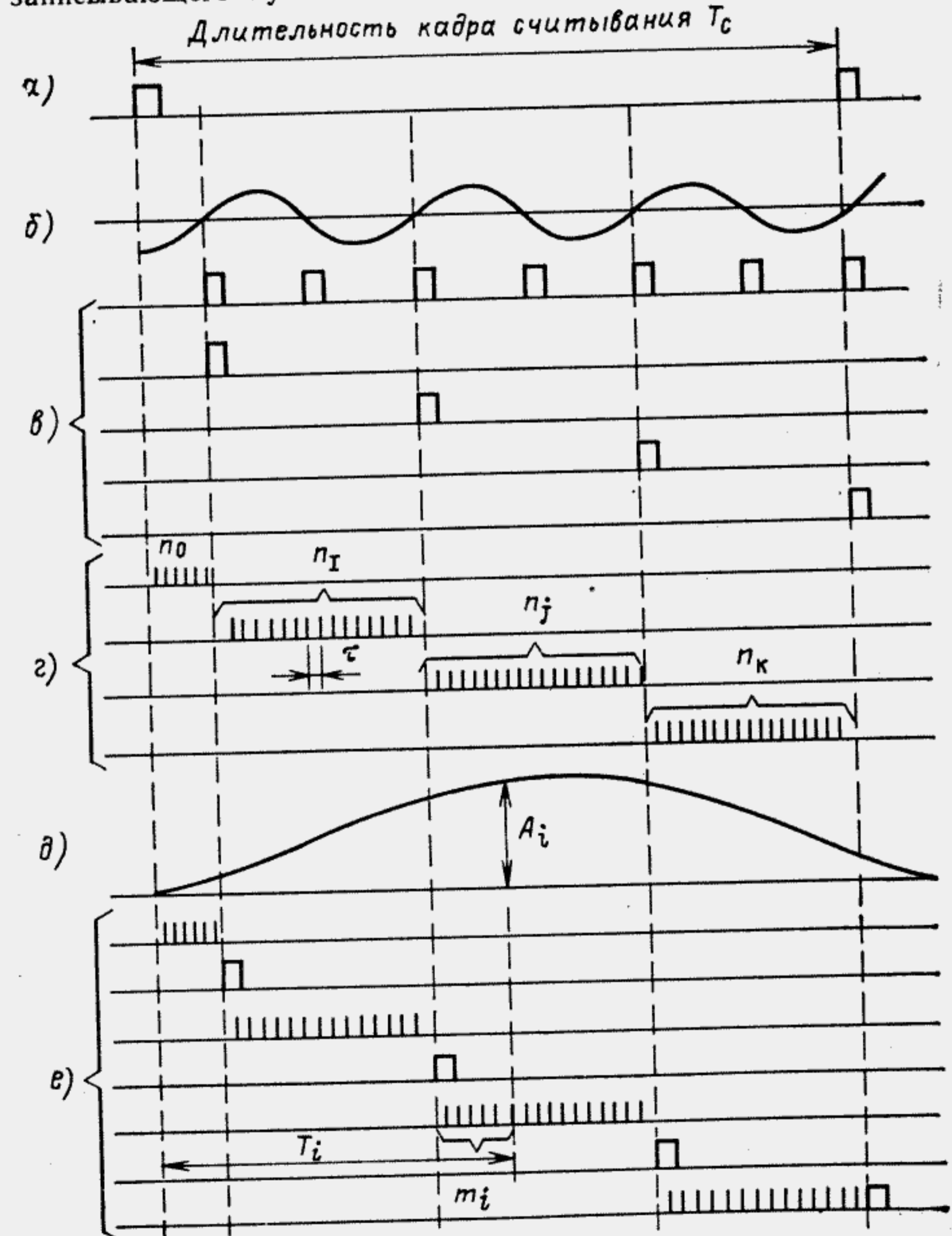


Рис. 3.15

Далее сигнал с БА блокирует ГСР, запускает ГКР и генератор подсвета (ГП) и происходит считывание записанной ранее синусоиды лучом, движущимся вдоль нулевой линии синусоиды. При этом считанные импульсы возникают в местах пересечения синусоиды и нулевой линии, т. е. в точках полупериодов (рис. 3.15, а, б). Сигналом с БА открывается вход СЧП и блокируется прохождение сигналов на формирователь Ф.

Считанные импульсы с усилителя У поступают на вход СЧП, который на своем выходе формирует импульсы, соответствующие периоду синусоиды (рис. 3.15, в).

Дешифратор ДШ построен по комбинационной схеме и имеет $K+1$ выход, где K — максимальное число периодов калибрационной синусоиды, укладываемых в длительность развертки записи.

Блок нормирования (БН) содержит счетчик, генератор импульсов стабильной частоты, элемент И и регистры в соответствии с числом периодов синусоиды.

С помощью ДШ и БН определяют длительность каждого из считанных периодов синусоиды путем заполнения их счетными импульсами, вырабатываемыми в БН, осуществляя тем самым преобразование временного интервала в цифровой код (рис. 3.15).

Информация о периодах калибрационной синусоиды хранится в регистрах БН до окончания преобразования исследуемого сигнала. Длительность j -го периода синусоиды в преобразованном масштабе времени равна $T_j = nj\tau$, где τ — период повторения импульсов генератора в БН. В общем случае $T_1 \neq T_2 \neq T_3 \neq T_k$.

Длительность периода калибрационной синусоиды известна априорно с высокой точностью. Приравняв длительность этого периода в реальном масштабе времени t_p к длительности периода в преобразованном масштабе времени T_j , можно определить значение нормировочного коэффициента (вес кванта задающего генератора в БН) для каждого из периодов калибрационной синусоиды:

$$\tau_{pj} = t_p/nj.$$

По окончании считывания синусоиды масштабно-временной преобразователь подготавливается к записи исследуемого сигнала.

После записи исследуемого сигнала БА вырабатывает серию управляющих сигналов: сигнал запуска ГКР и ГСР; сигнал блокировки ГП, сигнал блокировки СЧП, сигнал деблокировки блока деления кадра на зоны (БДЗ).

С запуском ГКР и ГСР происходит считывание записанного сигнала поперечно-строчным растром. Считанные импульсы через У и формирователь Ф поступают в БЦП и далее в блок вывода информации (БВИ). Одновременно с запуском ГКР и ГСР начинает функционировать БДЗ, осуществляет деление длительности кадра на зоны в соответствии с периодами калибрационной синусоиды. С приходом импульса начала кад-

ра из БА счетчик БН начинает счет. С поступлением на счетчик БН числа импульсов, равного n_0 (см. рис. 3.15, г), на выходе первого из блоков сравнения БДЗ появится импульс. Этот импульс устанавливает счетчик в нулевое состояние, который затем вновь начинает счет и его содержимое сравнивается с другим блоком сравнения БДЗ. Как только число импульсов достигнет значения n_1 , на выходе этого блока сравнения появится импульс, соответствующий концу первой зоны. Счетчик СЧЗ подсчитывает число зон.

Таким образом, в БВИ с началом считывания исследуемого сигнала, записанного на мишени ЗЭЛТ, постоянно поступает информация: с СЧЗ — номер зоны N_z , в которой в данный момент происходит считывание; с БН — значение нормировочного коэффициента, представленного в виде числа n_j , для этой зоны; с БДЗ — текущее значение результатов счета импульсов в данной зоне в виде числа m_i (рис. 3.15, е); с БЦП — значение ординаты преобразуемого сигнала A_i (рис. 3.15, д). Вся указанная информация вводится БП по командам с БА с частотой следования сигналов строчной развертки, т. е. каждому значению ординаты исследуемого сигнала ставится в соответствие ее временное положение [38].

Далее из блока памяти информация может быть выведена на БИ для визуального контроля, на ленточный перфоратор ПЛ или непосредственно в ЭВМ.

Структура цифровой информации, записываемой на ленточном перфораторе как одно слово, представлена в табличном виде

$$\left| \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline A_i & N_z & n_j & m_i \\ \hline \end{array} \right|,$$

где A — цифровой эквивалент i -й выборки преобразуемого сигнала; $i=1, 2, 3, \dots, N$; N — число строк считывания; N_z — номер зоны кадра считывания; n_j — нормировочный коэффициент j -й зоны; $j=1, 2, 3, \dots, K$; K — число периодов, калибрационной синусоиды на мишени трубки в пределах считывающего раstra; m_i — цифровой эквивалент текущего значения времени внутри зоны с номером N_z .

Как показано в [38], погрешность в определении временного положения ординаты после коррекции составляет примерно 0,2 %.

3.5. Цифровая система для регистрации наносекундных процессов

В [42] описана система для цифровой регистрации быстропротекающих процессов на основе ЗЭЛТ R6288A, разработанная фирмой Sandia (США). Система обеспечивает регистрацию двух однократных процессов длительностью не менее 500 нс при разрешающей способности по амплитуде 1/256 и времени 1/512. В системе использована мини-ЭВМ типа PDP 8/1, выполняющая амплитудную и временную градуировку тракта преобразования и коррекцию результатов измерений.

Автоматическая амплитудная градуировка, выполняемая непосредственно перед регистрацией исследуемого процесса, обеспечивает погрешность около 2% предела шкалы. Калибровка занимает менее 1 мин и включает следующие операции: определение размерности данных; компенсацию нелинейности разверток и коэффициента усиления тракта вертикального отклонения; устранение рассогласования по углу между отклоняющими системами.

В процессе градуировки шкалы по амплитуде на вертикальную систему отклонения поочередно подаются семь уровней напряжений постоянного тока: 30, 20, 10, 0, -10, -20, -30 В. На мишени ЗЭЛТ с идеально линейными развертками этим семи уровням будут соответствовать семь прямых линий с постоянным шагом и вертикальная чувствительность (В/счетный импульс) будет одинаковой по всей мишени. В реальных устройствах линии, соответствующие этим уровням, как это показано на рис. 3.16, могут иметь некоторый наклон и небольшую не-

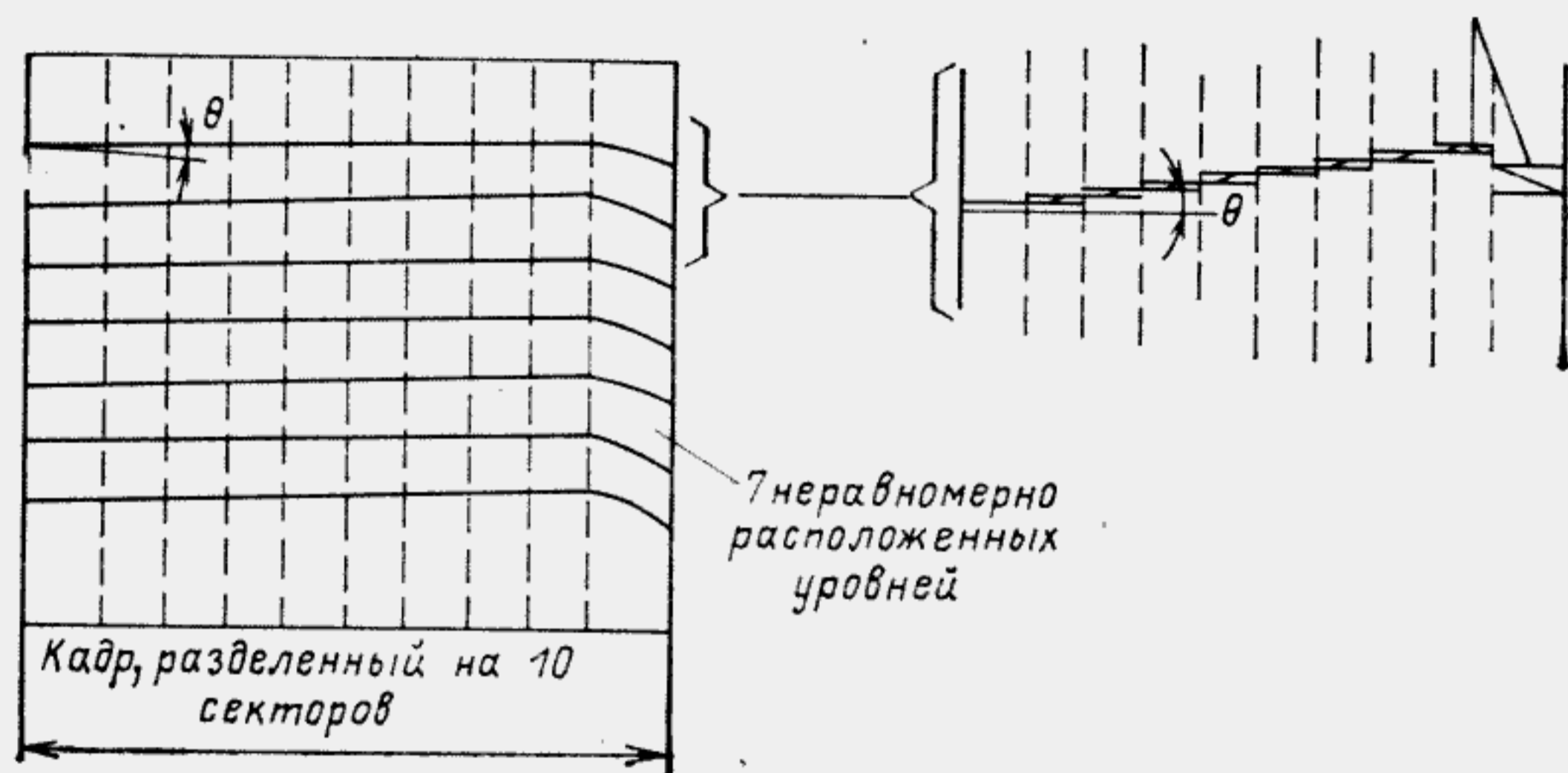


Рис. 3.16

линейность, а также непостоянный шаг. Для компенсации этих искажений ЭВМ системы вычисляет корректирующие коэффициенты. При определении этих коэффициентов делят линию на 10 участков, находят средний уровень по 50 отсчетам по каждому участку и запоминают 10 средних значений по каждому из семи участков. Коэффициентами корректировки амплитуды, соответствующими 80 различным участкам мишени ЗЭЛТ, являются 70 чисел, хранимых для каждого канала системы. Для обеспечения правильного воспроизведения регистрируемого процесса на экране ХУ-индикатора ЭВМ воспроизводит семь градуировочных уровней путем выполнения линейной интерполяции между 10 усредненными числами, хранимыми в ее памяти по каждому уровню [42].

Временная градуировка осуществляется путем записи на мишени ЗЭЛТ синусоидального колебания. ЭВМ определяет точки пересечения синусоиды с нулевым уровнем, вычисленным по результатам амплитудной градуировки. Затем ЭВМ выполняет временную коррекцию для каждого считанного периода синусоиды.

Если в процессе масштабно-временного преобразования исследуемого сигнала или градуировки появляются данные о наличии ложных точек или пропадании истинных точек, соответствующих выборкам сигнала, причиной которых является недостаточная амплитуда считанных импульсов-отметок или же «шумящий» участок мишени ЗЭЛТ, то ЭВМ выявляет эти точки и заменяет их расчетными. Когда в ЭВМ вводятся недостоверные данные, то по программе выполняется линейная интерполяция между ближайшими достоверными точками.

3.6. Цифровой преобразователь R7912

Цифровой преобразователь R7912, разработанный фирмой Tektronix США, является быстродействующим масштабно-временным преобразователем однократных электрических сигналов на основе ЗЭЛТ. Скорость записи на мишени ЗЭЛТ обеспечивает регистрацию однократных сигналов при минимальной длительности развертки записи 5 нс с разрешением 420 линий на ширину считывающего раstra и отношении сигнал-шум около 10. Сигнальный тракт преобразования имеет полосу пропускания не менее 1 ГГц и чувствительность, обеспечивающую отклонение сигнала на все рабочее поле мишени (около 320 линий) при амплитуде 32 В. С использованием предусилителя при отклонении сигнала с амплитудой 80 мВ на все рабочее поле мишени обеспечивается полоса пропускания 500 МГц.

Указанные параметры прибора получены при использовании ЗЭЛТ с кремниевой мишенью.

Пушка записи ЗЭЛТ управляется с помощью электронных блоков осциллографов. В приборе используется блок развертки записи и блок усилителя, являющиеся базовыми в осциллографах серии 7000 фирмы Tektronix.

Схемы считывающей части преобразователя разработаны с учетом двух режимов работы. В одном режиме пушка считывания сканирует мишень в соответствии с телевизионным форматом, т. е. 525 строк в кадре при частоте кадров 60 Гц. Сигналы, считанные с мишени, после предварительного усиления используются для модуляции по яркости обычного телевизионного монитора, в результате чего на его экране получают большие яркие осциллограммы исследуемых сигналов. Разрешающая способность преобразователя в этом режиме свыше 420 линий по горизонтали и 320 линий по вертикали. Эквивалентная скорость записи, приведенная к рабочему полю монитора, составляет 30 деление/нс.

В другом режиме работы преобразователя R7912 использована иная система сканирования мишени ЗЭЛТ. Записанный на мишени исследуемый сигнал при считывании дискретизируется по оси времени (горизонтали) и квантуется по оси амплитуд (вертикали). Данные образуют матрицу из 512×512 значений, что согласуется с разрешающей

способностью трубки. Мишень сканируется по вертикали и горизонтали ступенчатым образом. На 512 вертикальных ступенек приходится одна горизонтальная.

По числу шагов по вертикали и по горизонтали, которые были сделаны при обнаружении информационной точки, автоматически вычисляются ее координаты.

Рассмотренные выше режимы считывания информации обеспечиваются генераторами X- и Y-разверток. Для определения номера каждой ступеньки используется счетчик. Адрес по горизонтали вводится в устройство памяти в начале вертикальной развертки, затем формируется сигнал вертикальной развертки и на каждой ее ступени проверяется наличие видеосигнала считанного импульса-отметки, с тем чтобы установить, не был ли обнаружен участок мишени с записью. При обнаружении такого участка вертикальная развертка задерживается на 1,6 мкс для ввода соответствующего вертикального адреса в устройство памяти. После этого развертка продолжается и указанные операции повторяются до тех пор, пока не будет произведено считывание со всей мишени, а исследуемый сигнал преобразован в цифровую форму и введен в устройство памяти.

Для кодирования 512 уровней используется 9 разрядов двоичного кода. Признак записи вертикального или горизонтального адреса кодируется одним разрядом. Емкость устройства памяти, выполненного на МОП-структурах, составляет 4096 слов, что обеспечивает преобразование и регистрацию одновременно двух сигналов, записанных на мишени ЗЭЛТ. Особенностью преобразователя R7912 является формирование матрицы масштабных коэффициентов, которые могут быть воспроизведены вместе с исследуемым сигналом. Ее наличие позволяет с использованием ЭВМ устранять нелинейности преобразования.

Преобразователь R7912 может работать в автоматическом режиме по командам ЭВМ PDP-11/05.

На основе преобразователя R7912 фирмой Tektronix разработан преобразователь 7912 AD с использованием микропроцессоров, программируемых блоков усиления и развертки.

3.7. Масштабно-временной преобразователь ССТП2

Устройство предназначено для преобразования коротких однократных сигналов или их последовательностей в цифровой код с последующей передачей и обработкой информации в ЭВМ. В ССТП2 используется быстродействующая ЗЭЛТ СОЗУ2 со скоростью записи до 15 тыс. км/с и полосой пропускания не менее 500 МГц [41].

Основные технические характеристики

Полоса пропускания тракта записи, ГГц	0—0,5
Максимальная амплитуда преобразуемого сигнала, В	100
Длительность развертки записи	10; 20; 30; 50; 75; 100; 150; 250 нс; 0,5; 1; 2; 3; 4; 6; 8; 10; 12 мкс

Максимальный коэффициент преобразования масштаба времени K_M	10 ⁷
Число дискретных значений преобразованного сигнала, не менее	100
Число двоичных разрядов регистра амплитуд	8
Частота дискретизации, кГц	1,6 или 8
Входное сопротивление, Ом	75
Погрешность устройств калибровки (с доверительной вероятностью 0,95), %:	
по амплитуде	0,5
по времени	0,1
Погрешность преобразования сигналов калибровки (с доверительной вероятностью 0,95), %:	
по амплитуде	3
по времени	1
Потребляемая мощность, В·А	360
Диапазон рабочих температур	От минус 5 до 30°С

Масштабно-временное преобразование состоит из пяти циклов: четырех градуировочных (вспомогательных) и одного рабочего (основного). Каждый цикл включает в себя три последовательные стадии: подготовку, запись и считывание. Преобразователь ССТП2 содержит устройства амплитудной и временной градуировки, обеспечивающих сквозную градуировку тракта преобразования и тракта воспроизведения (обработки) непосредственно перед регистрацией исследуемого сигнала.

Амплитудная градуировка осуществляется путем последовательной записи на мишени ЗЭЛТ трех горизонтальных линий (линии 1; 0,5; 0), соответствующих трем уровням напряжения постоянного тока (например, 30, 0, —30 В), заданным с погрешностью не хуже 0,5 %.

Временная градуировка осуществляется синусоидальным напряжением, стабилизированным по частоте кварцем с погрешностью не хуже 0,1 %.

Каждый градуировочный цикл оканчивается считыванием. Таким образом, при регистрации информации на неподвижном носителе, например на экране индикаторной трубки, производится наложение пяти кадров: три кадра соответствуют трем градуировочным уровням, четвертый кадр воспроизводит синусоидальную градуировочную кривую и пятый кадр воспроизводит собственно регистрируемый сигнал. На рис. 3.17, а приведена осциллограмма входного сигнала, на рис. 3.17, б, в — пример регистрации [41].

При регистрации информации на подвижном носителе каждый из пяти циклов представлен отдельным кадром, следующих друг за другом. Чтобы иметь возможность их «сшивки» и совместной обработки, ССТП2 вырабатывает специальный маркер, находящийся в начале каждого кадра и состоящий из девяти заранее заданных одинаковых чисел.

В преобразователе предусмотрен режим градуировки внешним сигналом, что позволяет при необходимости записывать и считывать сетку горизонтальных линий, а также определять и учитывать дифференци-

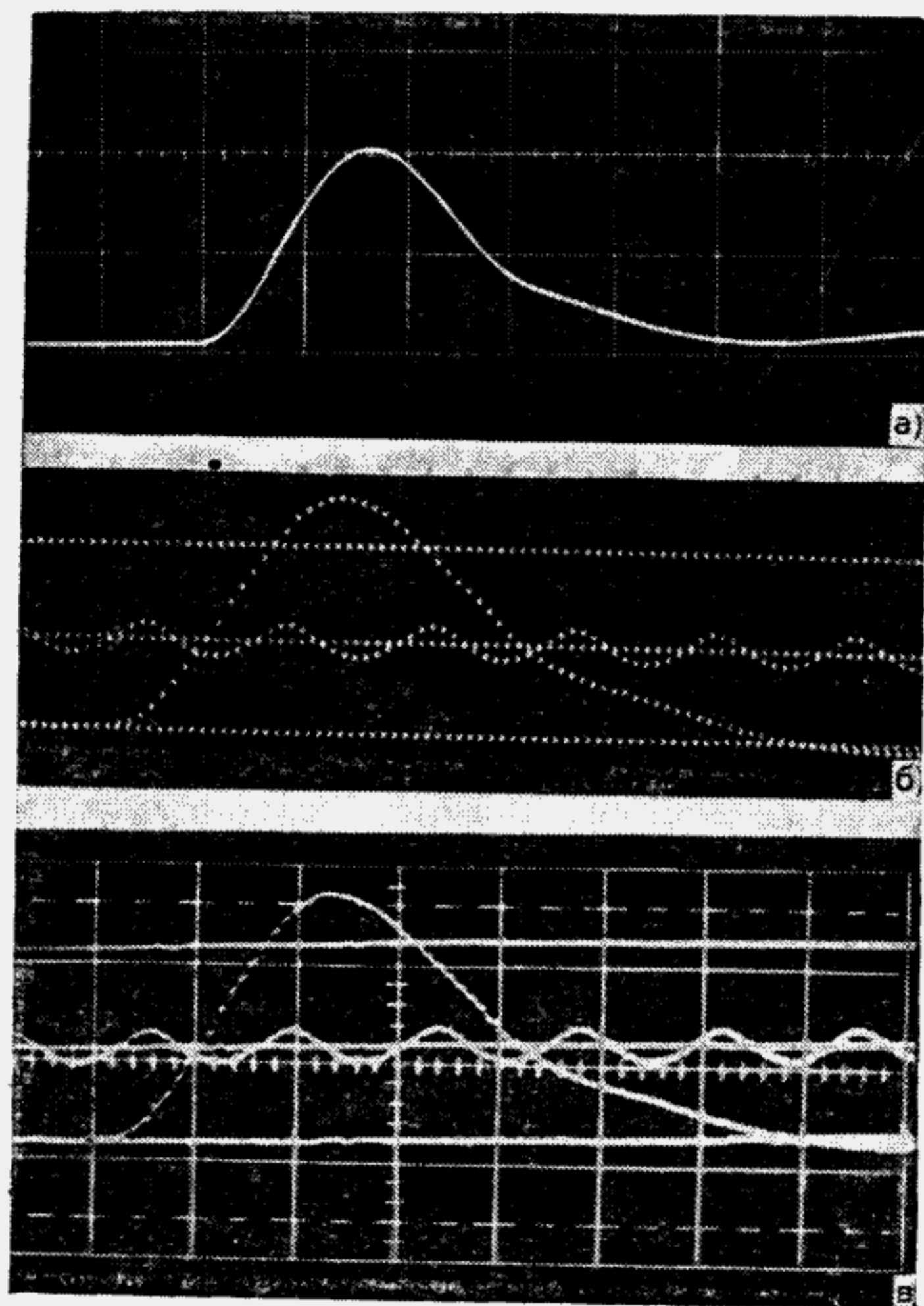


Рис. 3.17

альную чувствительность амплитудного преобразования по рабочему полю мишени ЗЭЛТ.

Работа всех устройств, входящих в состав ССТП2, синхронизируется внутренним или внешним генератором, например, от системы телеметрии и ЭВМ с использованием блока программного управления СМБУ2. В преобразователе предусмотрено дистанционное управление, возможно подключение индикаторной ЭЛТ.

Простейшую измерительную систему на основе использования масштабно-временного преобразователя можно представить себе, добавив к нему индикаторную ЭЛТ для воспроизведения сигнала в виде точечной осциллограммы в соответствии с рис. 3.1, при этом индикаторная ЭЛТ может быть отнесена от собственно МВП на некоторое расстояние, достигающее нескольких километров. Таким образом, указанную систему можно рассматривать как некоторый дистанционный осциллограф. Пример регистрации информации такой системой на основе ССТП2 представлен на рис. 3.17 б.

Выходной цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), входящий в состав ССТП2, позволяет использовать относительно низкочастотный осциллограф (с полосой пропускания 0—0,1 МГц) для наблюдения однократных процессов наносекундного диапазона. Наиболее эффективным в этом случае является использование запоминающего осциллографа с видимым изображением, например типа С8-13. Пример регистрации информации указанной системой представлен на рис. 3.17 в.

Этот вариант аналоговой системы целесообразно использовать в лабораторных условиях и при оперативной проверке работоспособности масштабно-временного преобразователя.

В обоих приведенных вариантах информация регистрируется на фотопленку.

На рис. 3.17, а приведена осциллограмма регистрируемого сигнала в реальном масштабе времени до его преобразования. Из сравнения осциллограмм, приведенных на рис. 3.17, можно сделать вывод об относительно малых искажениях преобразования аппаратурой ССТП2.

К настоящему времени разработано несколько типов масштабно-временных преобразователей, основные технические характеристики их приведены в приложении.

3.8. Комплексы аппаратуры автоматизированной обработки одиночных сигналов микро- и наносекундной длительности

Для создания на базе преобразователя ССТП2 информационно-измерительных систем различных модификаций используют устройства типа СПР, сочетающие в себе функции индикаторного устройства, выполненного на основе газоразрядной матричной панели 128×128 элементов, и интерфейсного устройства связи с внешними промышленными устройствами, в том числе с микро-ЭВМ «Электроника-60». Устройство СПР удобно использовать для предварительного анализа информации перед вводом ее в ЭВМ для обработки или перед выводом ее на внешние устройства.

Высокие точности масштабно-временного преобразования не должны теряться при отображении информации на индикаторном устройстве, когда значения ординат в кодовом представлении превышают число дискретных ячеек индикаторной панели по оси амплитуд. В этом случае масштаб сигнала не соответствует масштабу панели и верхняя часть сигнала не воспроизводится. В устройстве СПР предусмотрены ручной и автоматический выборы масштаба отображения [39—40]. Разработанные устройства СПР4 и СПР5 позволяют сохранить высокие точности и быстродействие процесса отображения информации, получаемой в результате масштабно-временного преобразования случайной последовательности импульсных процессов.

Устройство СПР4 позволяет принимать кодированную информацию в кодовом виде, поступающую с выхода ССТП2 и других цифровых приборов, объединенных в систему СУПИ, напоминающую вариант си-

стемы «Вектор», запоминать эту информацию, представлять ее в графическом виде на плоской матричной панели и выводить информацию на перфоратор ПЛ-150 и цифropечатающее устройство УВЦ2-95.

Устройство СПР5 конструктивно выполнено в одном каркасе со сменными блоками, выполняющими определенные функции.

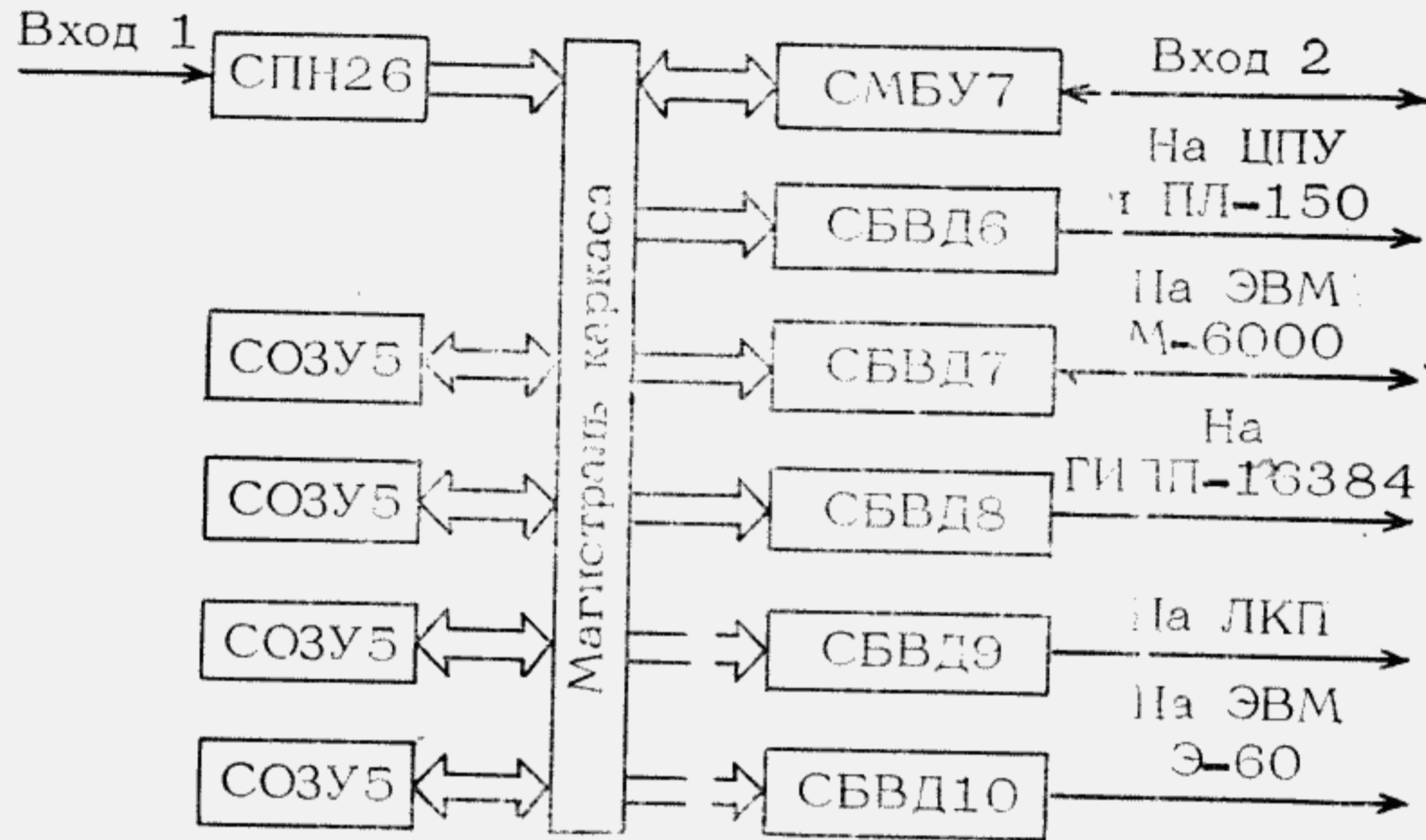


Рис. 3.18

Структурная схема СПР5 приведена на рис. 3.18. Блок СПН26 представляет собой преобразователь временных интервалов в код, блоки СОЗУ5 представляют собой запоминающее устройство, назначение остальных интерфейсных блоков указано на рисунке.

Комплекс предназначен для растяжения во времени и аналого-цифрового преобразования сигналов микро- и наносекундной длительности.

Комплекс аппаратуры может быть использован в лазерных, плазменных, ускорительных и других импульсных установках управляемого термоядерного синтеза для аналоговой и цифровой регистрации и машинной обработки параметров лазерных, электронных пучков, импульсов ионизирующих и светового излучений, получаемых при работе установок.

Комплекс аппаратуры автоматизированной обработки одиночных сигналов микро- и наносекундной длительности предназначен для масштабно-временного преобразования исследуемых сигналов, кодирования преобразованных сигналов и обработки их на ЭВМ.

Основные технические характеристики

Длительность разверток записи	от 10 нс до 12 мкс
Число дискретных значений преобразованного сигнала	100 или 200
Число элементов разложения при индикации на газоразрядной индикаторной панели	128×128
Размер экрана, мм ²	90×90

Предусмотрена возможность представления информации на экране коллективного пользования на основе модулей ИМГ3-01 с общим числом элементов 128×128.

Вывод информации на перфоленду, печать и в электрическом виде для ввода данных в ЭВМ «Электроника-60».

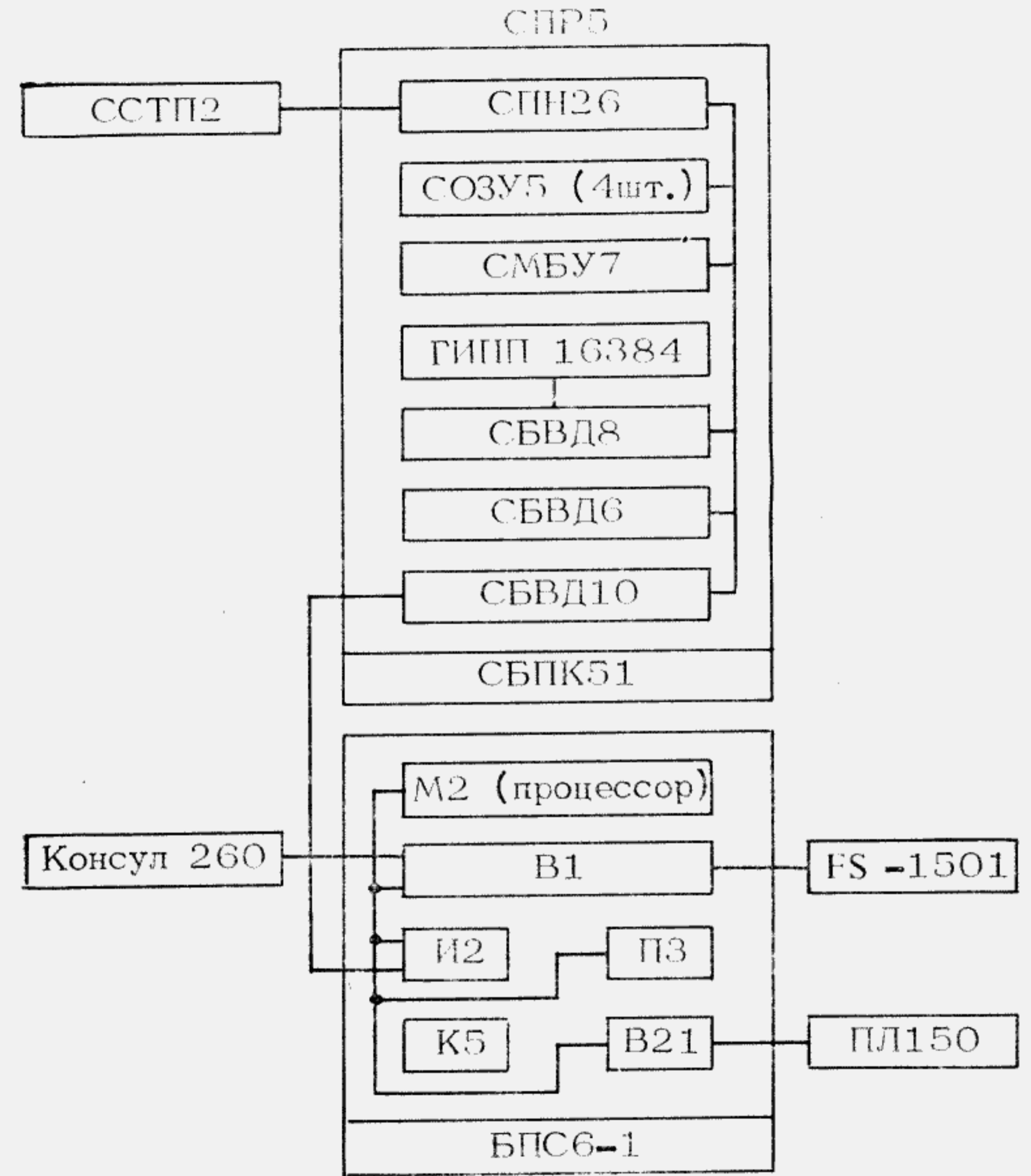


Рис. 3.19

Структурная схема комплекса приведена на рис. 3.19. Программное обеспечение выполнено на языках FORTRAN и QUASIK.

С использованием запоминающих устройств СУПИ9, в которые включены блоки СМБУ7, соединяющие ЗУ в канал стойки, комплекс может быть расширен до 28-канального. Структурная схема 28-канального комплекса приведена на рис. 3.20.

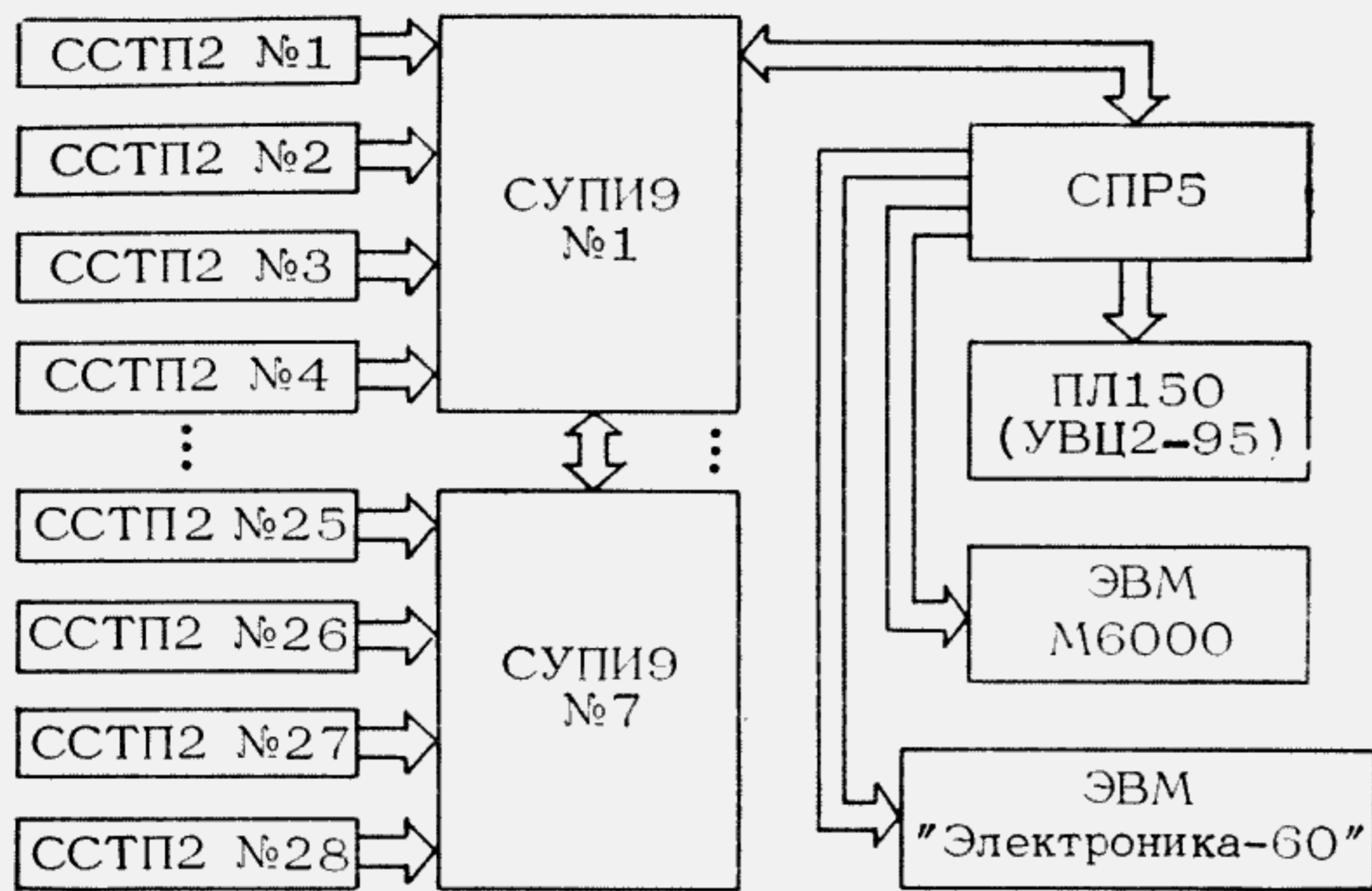


Рис. 3.20

Комплекс может быть использован для тех же задач измерения и управления работой установки получения энергии путем осуществления управляемого термоядерного синтеза.

3.9. Многоканальная быстродействующая телеметрическая система

Благодаря свойству ССТП2 работать от сигналов внешней синхронизации и наличию на выходе специального кода для радиотелеметрической системы, ССТП2 легко сочленяется с радиотелеметрической системой, что позволяет осуществить быстрый вывод результатов измерений на расстояние к месту регистрации и обработки данных.

На рис. 3.21 приведена структурная схема многоканальной телеметрической системы на основе ССТП2 с автоматизированной обработкой данных.

На рисунке обозначено: ССТП2 — масштабно-временной преобразователь; К — коммутатор; Пер — передатчик; Пр — приемник; НМЛ — накопитель на магнитной ленте; АПД — аппаратура передачи данных; ВЦ — вычислительный центр. В этой системе может быть использовано до 32 комплектов масштабно-временных преобразователей ССТП2.

Запись цифровой информации в коде радиотелеметрической системы производится на магнитную ленту с последующим ее воспроизведением на электрохимической бумаге в виде графиков в координатах амплитуда — время. Указанная информация может быть введена в электрическом виде в ЭВМ, например «Электроника-60», ЕС и др., для обработки и получения конечных результатов измерений.

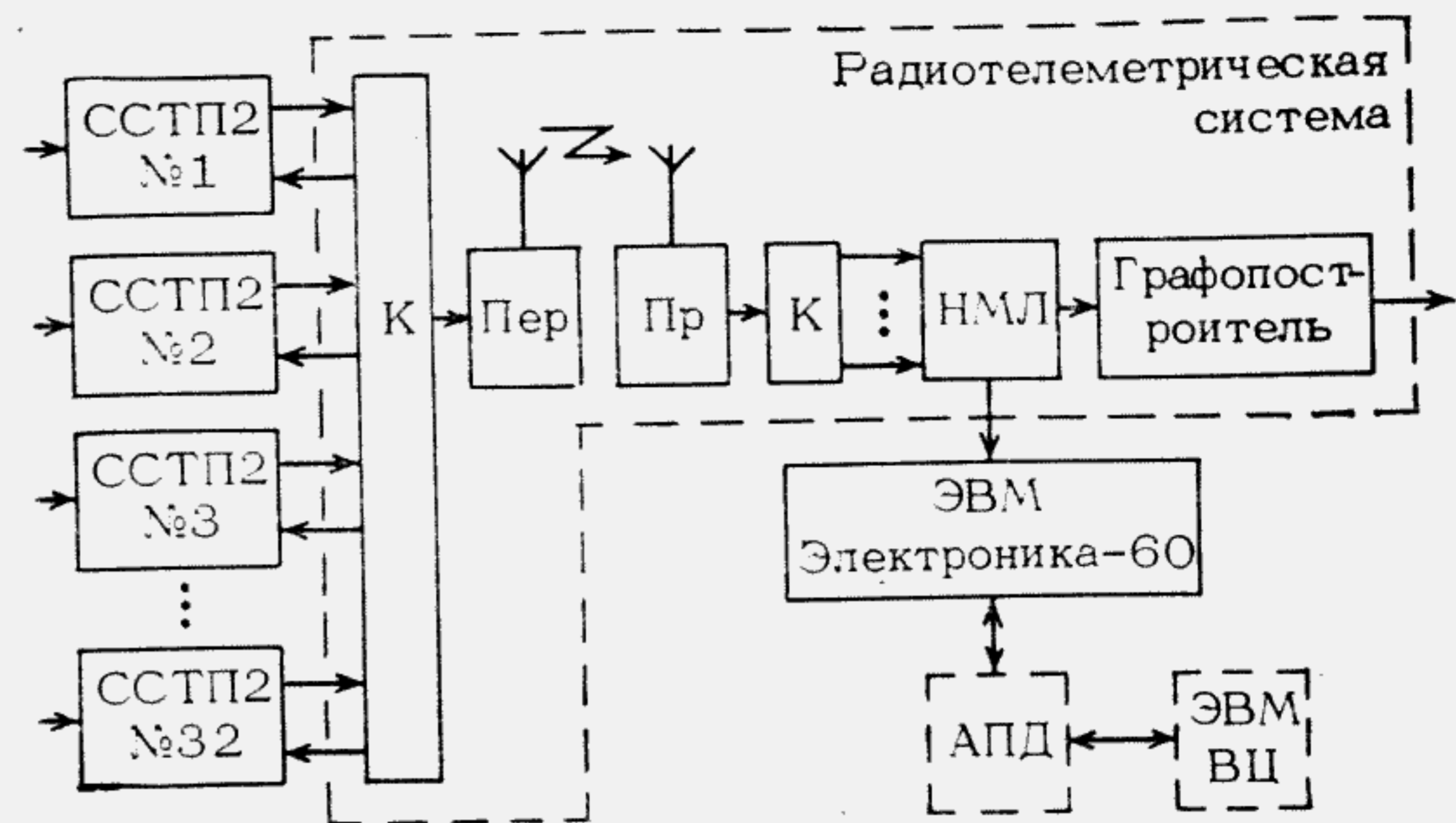
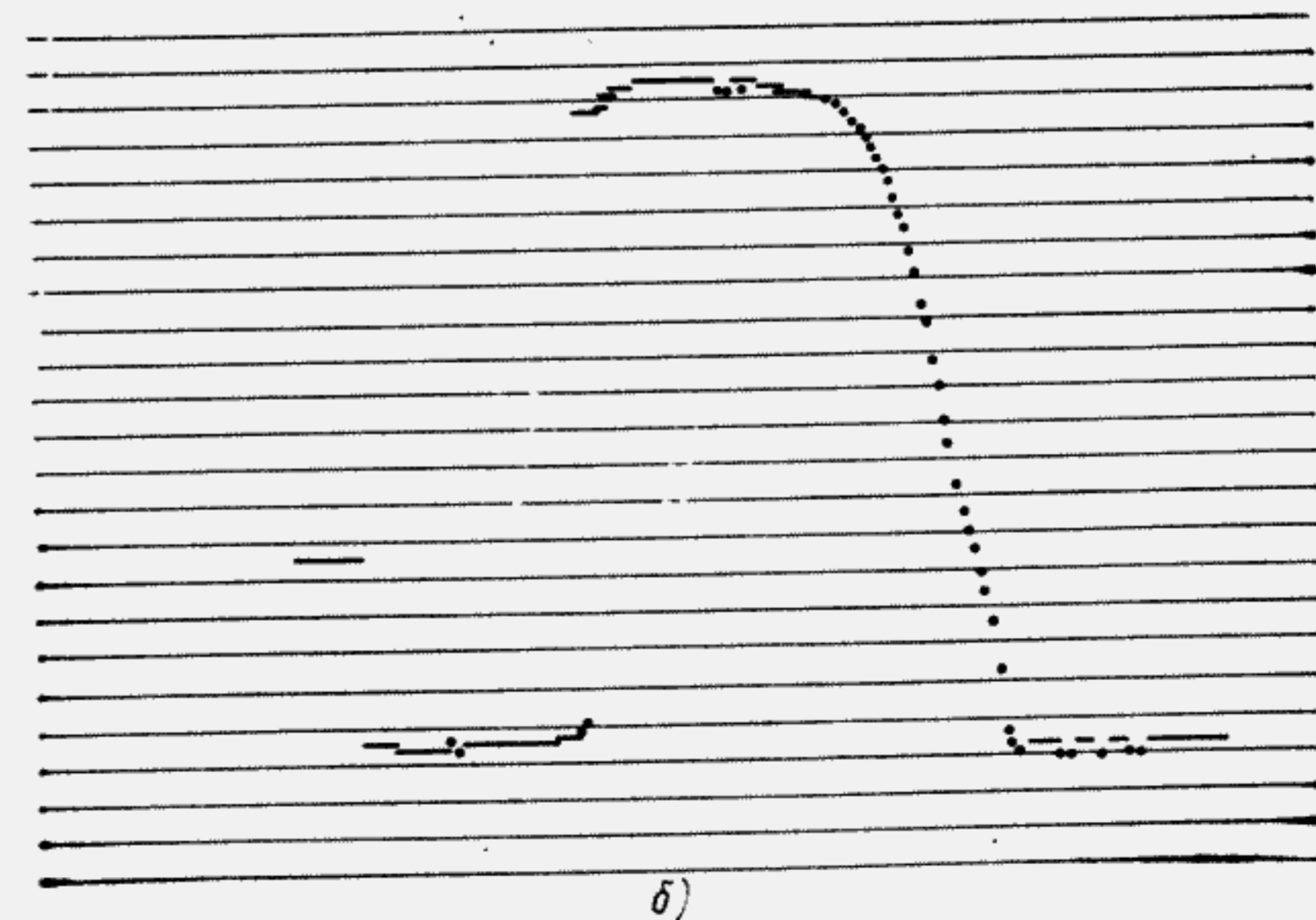
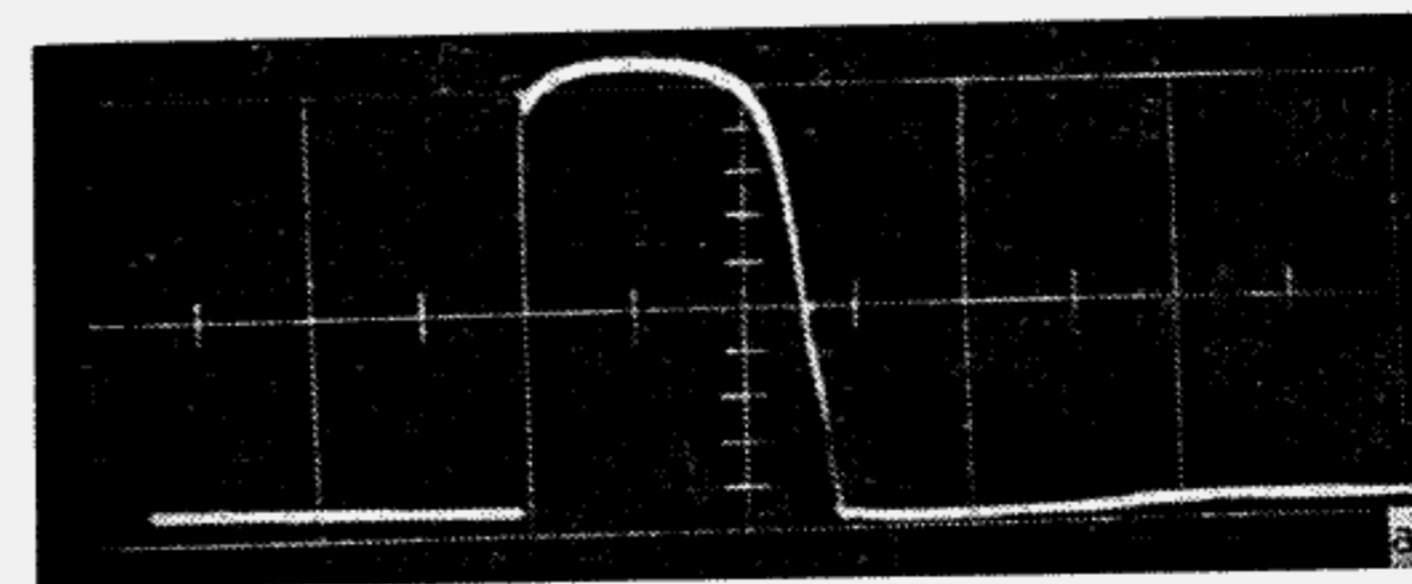


Рис. 3.21



б)

Рис. 3.22

Максимальный интервал времени от момента поступления исследуемых сигналов на входы 32 комплектов ССТП2 до окончания записи всей информации на магнитную ленту составляет не более 380 мс и в ряде случаев является определяющим при решении вопроса о выборе системы сбора, передачи и приема информации.

Так как микро-ЭВМ «Электроника-60» обладает относительно малой информационной мощностью, то для сложных вычислений предусмотрена передача информации на основную ЭВМ вычислительного центра с использованием аппаратуры передачи данных, выпускаемой промышленностью.

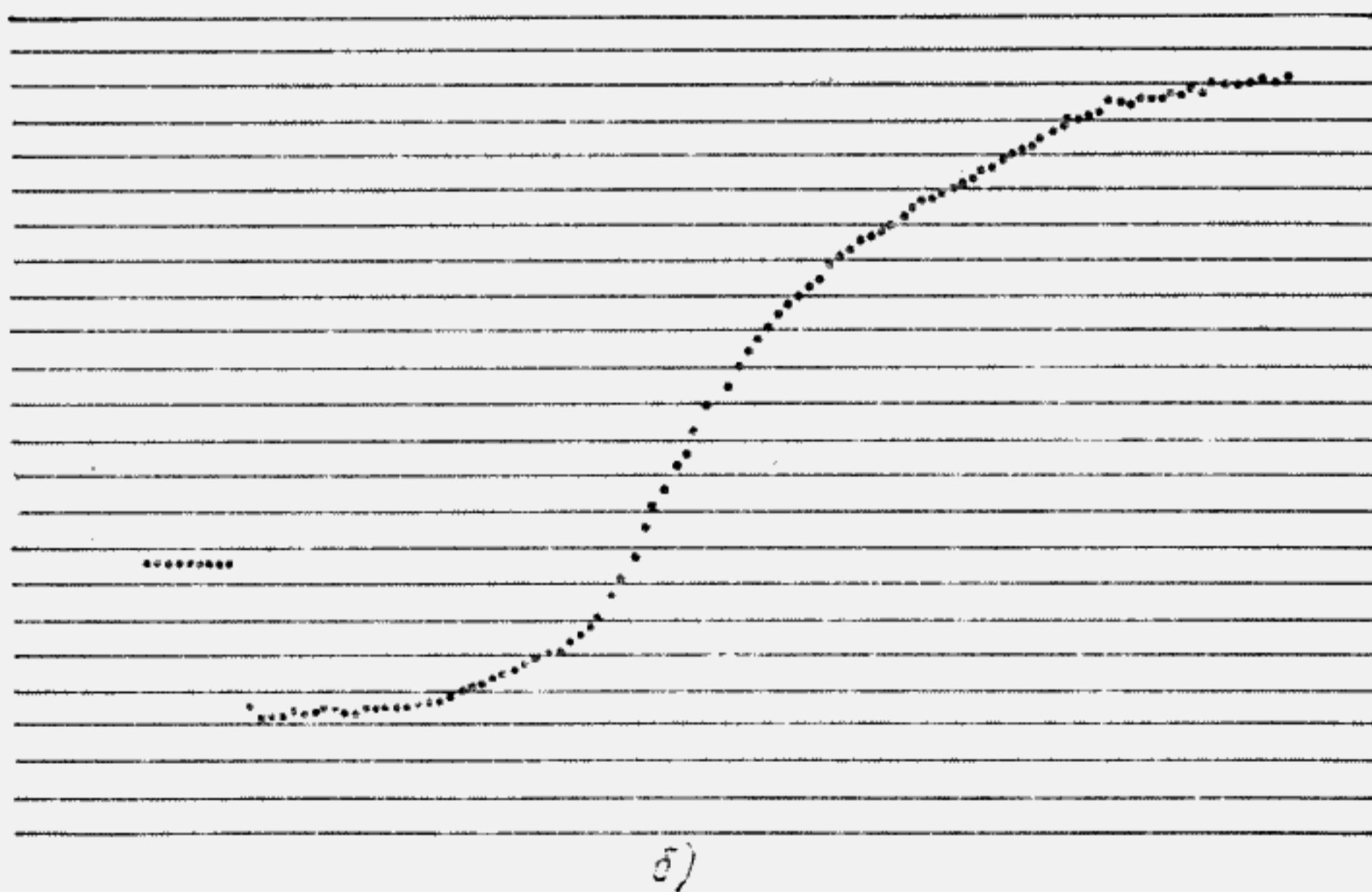
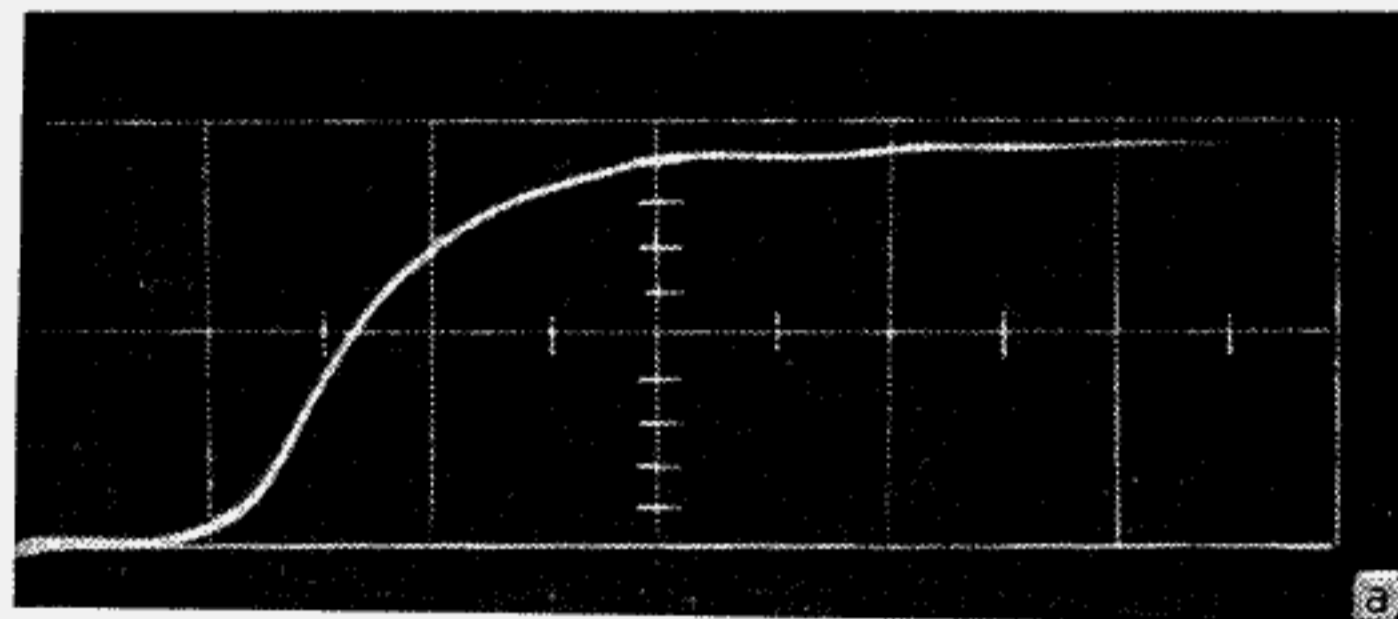


Рис. 3.23

На рис. 3.22 и 3.23 представлены типичные графики исследуемых сигналов, полученных при помощи телеметрической системы, приведенной на рис. 3.21: *а* — осциллограммы сигналов в реальном масштабе времени на входе ССТП2; *б* — графики тех же сигналов в преобразованном масштабе времени, полученных на графопостроителе приемной ча-

сти телеметрической системы; длительность развертки записи преобразователя ССТП2 2 мкс и 15 нс соответственно [41].

На рис. 3.22, *б* и 3.23, *б* виден маркер из девяти точек, используемый для сшивки кадров (см. § 3.7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность масштабно-временного преобразования зависит от свойств применяемой в аппаратуре ЗЭЛТ, от принятых схемных решений управления работой ЗЭЛТ и от способов, применяемых для первичной обработки считанных сигналов. Приведенные методы масштабно-временного преобразования позволяют проводить расчеты параметров считанных импульсов в зависимости от параметров и режимов работы ЗЭЛТ, а также уменьшить искажения и погрешности преобразования.

Показано, как при помощи масштабно-временных преобразователей можно использовать низкочастотные устройства регистрации, телеметрии и обработки для одиночных процессов микро- и наносекундной длительности. Приведенные характеристики отечественных и зарубежных масштабно-временных преобразователей и примеры построения измерительных систем подтверждают возможность автоматизации многоканальных измерений и обработки процессов указанного диапазона длительностей наравне с освоенным более низкочастотным диапазоном.

Основные технические характеристики некоторых масштабно-временных преобразователей с ЗЭЛТ и измерительных систем с их применением

Приложение

Характеристики	МВП							
	ССТП	МНИ	РП	ССТП2	Цифровая система	Р7912	М9-2	
	УПН-92В							
	ЗЭЛТ							
	18ЛО47А	2ЛТК6М					Р6288	ЛН20
Полоса пропускания тракта преобразования Δf , МГц	100	1000	1000	500	40	1000 или 500	100	
Рабочее поле на мишени ЗЭЛТ для преобразуемого сигнала, мм:	60×100 86×142 3,5	$45 \times 100^*$ 94×208 2,4**	$45 \times 100^*$ 94×208 2,4**	36×45 100×125 1,5	—	$9,5 \times 12,7$ 320×420 $100 \cdot 10^{-3}$ $250 \cdot 10^{-6}$	—	
Минимальное значение преобразуемого сигнала регистрации входного сигнала U_{min} , В	38	37**	37**	40	—	—	—	
Динамический диапазон D_d , дБ	$50-10^4$	$40-160$	$20-10^4$	$5-10^4$	$500-2 \times 10^3$	—	60	
Длительность развертки записи T_p , нс	$4 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	110 или 220	10^6	$5-10^6$	$10-10^6$	
Коэффициент трансформации $K_{мтлх}$	$100 (T_p \leq 500 \text{ нс})$	100	100	—	512	$3 \cdot 10^6$	228 или 114	
Число дискретных значений преобразованного сигнала	$200 (T_p \geq 600 \text{ нс})$	7	7	8	8	512 или 525	—	
Число двоичных разрядов регистра амплитуд	—	7	7	8	8	9	8	

Продолжение приложения

Характеристики	МВП							
	ССТП	МНИ	РП	ССТП2	Цифровая система	Р7912	М9-2	
	УПН-92В							
	ЗЭЛТ							
	18ЛО47А	2ЛТК6М					Р6288	ЛН20
Частота дискретизации (считывания), кГц	10	10	10	1,6 или 8	—	—	—	
Число каналов преобразования	2	1	2	1	2	1	1	
Погрешность устройств калибровки преобразователя, %:	—	—	—	$0,5 (p=0,95)$	1	—	—	
по амплитуде	—	—	—	$0,1 (p=0,95)$	0,02	—	0,1	
по времени	5	5***	7***	$3 (p=0,95)$	—	—	3	
Погрешность преобразования, %:	2	2***	2***	$1 (p=0,95)$	—	—	3	
по времени	800	600	550	360	—	250	360	
Потребляемая мощность, В·А	$700 \times 610 \times 680$	$1490 \times 650 \times 700$	$1700 \times 560 \times 700$	$730 \times 480 \times 500$	—	—	$488 \times 200 \times 565$	
Габаритные размеры, мм	120	210	—	110	—	33	30	
Масса, кг	[41]	[6]	[6]	[41]	[42]	[41]	[45]	
Источник	—	—	—	—	—	—	—	

Примечание: p — доверительная вероятность.
 * С учетом записи нулевой линии (физического нуля) и калибровочной синусоиды.
 ** Для среднего значения диаметра луча записи запоминающей трубки 2ЛТК6М.
 *** При условии записи калибровочных уровней и калибровочной синусоиды.