

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ФОРМИРОВАТЕЛИ ВРЕМЕННОЙ МЕТКИ

A.C. КОВТЮХ

Цель работы - изучение методики временной привязки сигналов с детекторов ионизирующих излучений и построение формирователей временной метки методами “привязки по фронту”, “пересечения нуля” и “следящего порога”.

1. ВВЕДЕНИЕ

Временные интервалы между сигналами детекторов несут важную физическую информацию (о периоде полураспада ядер, времени жизни возбужденных состояний, скорости частиц и т.д.). Методами *временного анализа* можно изучать динамику физических процессов, восстанавливать пространственную картину явлений, отделять полезные события от фоновых и т.д.

Возможности применения методов временного анализа для решения физических задач связаны, прежде всего, с точностью определения моментов регистрации частиц (квантов), т.е. с *временным разрешением экспериментальных установок*. Временное разрешение ограничивается как флюктуациями длительности процессов преобразования в детекторе энергии излучения в импульс тока, так и флюктуациями задержки появления сигналов на выходе электронной аппаратуры. Последние обусловлены ограниченной чувствительностью электронных приборов, влиянием шумов, флюктуациями формы импульсов и другими факторами.

Временное разрешение установок с ионизационными камерами составляет $\sim 0.1 \div 1$ мкс, с пропорциональными счетчиками $\sim 20 \div 50$ нс, с полупроводниковыми детекторами $\sim 2 \div 10$ нс, со сцинтилляционными и черенковскими детекторами $\sim 0.2 \div 5$ нс, с микроканальными пластинами ~ 0.1 нс и с искровыми камерами ~ 10 пс.

В зависимости от задач эксперимента сигналы, снимаемые с детекторов излучений, могут различаться по амплитуде на несколько порядков величины. Кроме того, для детекторов различных типов они существенно различаются по форме. Наконец, даже для

детекторов одного типа параметры сигналов зависят от материала детектора, его конструкции и других факторов. Например, длительность фронта импульсов от сцинтилляционного детектора зависит, в основном, от типа применяемого ФЭУ, а длительность среза импульсов - от типа сцинтиллятора и параметров формирующих RC-цепей, задаваемых обычно условием достижения максимального отношения “сигнал/шум” на выходе системы “детектор-предусилитель”.

Поэтому, если не принять специальных мер, указанный разброс параметров сигналов по амплитуде и форме неизбежно приводит к большим погрешностям в измерениях временных интервалов между ними. Практически для обеспечения нормальной работы временного анализатора необходимо подавать на его вход стандартные по амплитуде, длительности и форме (обычно прямоугольные) импульсы.

В общем случае эта задача решается с помощью дискриминаторов и формирователей, причем во временных анализаторах используются специальные устройства - *формирователи временной метки* (ФВМ). Поскольку ФВМ должны иметь малое время переключения (меньше длительности фронта входных импульсов), они называются также *быстрыми дискриминаторами*. Сначала мы рассмотрим характеристики простейших дискриминаторов и формирователей, а затем - методы построения ФВМ для временного анализа.

2. ДИСКРИМИНАЦИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСОВ

Дискриминаторами называются электронные приборы, выходное напряжение которых может принимать одно из двух значений (логические “0” или “1”) в зависимости от уровня напряжения на входе. Обычно уровень напряжения на выходе дискриминатора низкий (“0”) если амплитуда входного импульса меньше порогового значения U_{Π} ; если же она превышает U_{Π} - дискриминатор переключается и на выходе его появляется высокий уровень напряжения (“1”). Встречаются и такие дискриминаторы, для которых превышение входного сигнала над пороговым уровнем приводит не к увеличению, а к уменьшению выходного напряжения (от “1” до “0”). Уровни логических “0” и “1” несколько размыты, но не перекрываются и отделены друг от друга достаточно большим интервалом.

Дискриминаторы подразделяются на активные и пассивные. В *активных дискриминаторах* имеется положительная обратная связь,

которая обеспечивает развитие в них регенеративного (лавинного) процесса при превышении порогового уровня на входе. В *пассивных дискриминаторах* положительной обратной связи нет.

Для более надежной работы активных дискриминаторов фактор положительной обратной связи (BK_0) задается несколько большим единицы. Поэтому $K = K_0 / (1 - BK_0) < 0$ и, в отличие от пассивных дискриминаторов, порог их включения ($U_{\Pi 1}$) отличается от порога выключения ($U_{\Pi 2}$): $U_{\Pi 1} < U_{\Pi 2}$. Величина $U_{\Gamma} = U_{\Pi 2} - U_{\Pi 1}$ называется *гистерезисом* схемы. Величина $U_{\Pi 0} = U_{\Gamma} + \delta U_{\Pi 2}$ ($\delta U_{\Pi 2}$ - нестабильность порога выключения) определяет *чувствительность* дискриминатора - минимальный возможный для данного прибора порог дискриминации импульсов.

Активные дискриминаторы имеют более определенные и стабильные пороги, а также большую точность временной привязки выходного импульса к входному, но уступают пассивным дискриминаторам в быстродействии.

Формирователями называются электронные приборы, на выходе которых появляется импульс стандартной амплитуды и формы (обычно прямоугольный) при поступлении на их вход импульса произвольной формы с амплитудой выше пороговой.

Как правило, дискриминацию и формирование импульсов может осуществлять одно и то же устройство, выполненное на основе операционного усилителя (ОУ) или (в некоторых случаях) - с помощью логических вентилей и триггеров.

Существует два типа формирователей: а) *триггер Шмитта*, в котором прямоугольный выходной импульс начинается на фронте и кончается на срезе входного сигнала - в моменты пересечения некоторого порогового уровня, т.е. длительность выходного импульса примерно пропорциональна и меньше длительности входного; б) *одновибратор*, который имеет собственную постоянную времени и фиксированную длительность выходного импульса.

Дискриминация и формирование импульсов широко используются для решения разнообразных задач физического эксперимента: отсечения шумов и фона, перевода информации из аналоговой в цифровую форму, амплитудного и временного анализа событий, управления экспериментом и т.д. В качестве конкретной задачи рассмотрим методику построения быстрых формирователей временной метки для целей временного анализа.

3. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВРЕМЕННОЙ МЕТКИ

Для любого метода построения ФВМ точность выставления временной метки ухудшается для сигналов малой амплитуды (из-за влияния шумов). Нелинейные искажения сигналов слишком большой амплитуды также приводят к снижению точности временной привязки. Поэтому амплитуда сигналов, поступающих на ФВМ, ограничивается в некотором динамическом диапазоне.

При выборе того или иного метода временной привязки для целей конкретного эксперимента следует учитывать, прежде всего, что порог (чувствительность) ФВМ вносит методическую погрешность в определение момента регистрации частиц в детекторе, которая зависит как от типа детектора, так и от метода построения ФВМ.

Метод “привязки по фронту”.

В этом методе при пересечении фронтом сигнала некоторого стабильного порога U_{Π} вырабатывается короткий прямоугольный импульс временной метки, а сигналы с меньшей амплитудой дискриминируются. Такие ФВМ реализуются с помощью триггера Шмитта. Можно также использовать компаратор, выход которого подключается к быстродействующему одновибратору. Чем ниже порог таких ФВМ, тем точнее временная привязка импульсов, но при этом следует учитывать, что значение U_{Π} должно превышать средне-квадратичный уровень шума $\sigma_{\text{ш}}$ (обычно $U_{\Pi} \geq 3\sigma_{\text{ш}}$).

К достоинствам таких ФВМ относятся простота конструктивных решений и связанные с этим надежность, компактность и экономичность. Пороги их задаются обычно на уровне нескольких Вольт, амплитуда выходных импульсов также составляет несколько Вольт и длительность - десятки нс.

Погрешность такого метода временной привязки тем больше, чем шире амплитудный диапазон входных импульсов. Практически она несколько больше длительности фронта входных импульсов, поскольку дискриминатор срабатывает с некоторым запаздыванием, максимальным для импульсов близких по амплитуде к U_{Π} . С уменьшением порога U_{Π} погрешность временной привязки снижается.

Такие ФВМ используется в тех случаях, когда по условиям эксперимента сигналы с крутым фронтом анализируются в узком амплитудном диапазоне и можно работать с большими превышениями над порогом. Например, в экспериментах с быстродействующими фотоумножителями и пластиковыми сцинтилляторами, работающими в режиме насыщения (для получения чисто временного сигнала).

Для некоторых задач уменьшение погрешности привязки сигналов данным методом достигается путем отбора импульсов достаточно большой амплитуды. При этом сигналы с детектора одновременно поступают на быстрый дискриминатор с низким порогом и медленный дискриминатор с высоким порогом (существенно выше уровня шумов), выходы которых подключаются к схеме совпадений (выход быстрого дискриминатора подключается к ней через линию задержки). Запаздывание момента пересечения сигналом верхнего порога относительно момента пересечения им нижнего порога (поправка к временной метке сигнала) измеряется с помощью время-амплитудного преобразователя.

Метод “привязки по фронту” можно использовать также в тех случаях, когда длительность фронта сигналов T_ϕ существенно меньше флюктуаций задержки срабатывания детектора δT_d . Последнее имеет место в пропорциональных камерах ($T_\phi \sim 1$ нс $\ll \delta T_d \sim 10 \div 50$ нс) и в других газоразрядных детекторах. Оправдано применение этого метода и тогда, когда не требуется достижения очень высокого временного разрешения.

Метод “привязки по фронту” непригоден для сцинтиляционных, черенковских и полупроводниковых детекторов, для которых $\delta T_d \ll T_\phi$, при работе их в спектрометрическом режиме. Так, для сцинтиляционных детекторов $\delta T_d \sim 0.05$ нс, а $T_\phi \sim 3 \div 5$ нс. Реализовать высокое временное разрешение таких детекторов можно только методами, рассмотренными ниже. Они используются для временной привязки подобных по форме сигналов, т.е. таких сигналов, форма которых и, в частности, длительность фронта, не зависит от их амплитуды A (инвариантна): $U(t) = A \cdot f(t)$, где $f(t) = \text{inv}$. Таким свойством обладают сигналы многих детекторов - полупроводниковых, сцинтиляционных, черенковских и др.

Метод “пересечения нуля”.

Временная привязка этим методом осуществляется к вершине или к середине фронта сигналов детектора. Основанные на этом принципе ФВМ называются детекторами нуля (нуль-детекторами). На рис.1 приведена функциональная схема такого прибора и временные диаграммы, поясняющие принцип его работы. Данное устройство состоит из двух частей: формирователя биполярных импульсов (ФБИ) и “дискриминатора нуля” (Д“0”).

Существуют различные методы переформирования униполярных сигналов в биполярные. Выбор того или иного метода для решения этой задачи определяется длительностью и формой

сигналов с детектора. Для сигналов с $T > 100$ нс эту операцию можно производить с помощью ОУ (дифференцирование).

Переформирование *очень коротких* (< 10 нс) сигналов с *острой вершиной* в биполярные производится обычно с помощью линии задержки (ЛЗ) и понижающего импульсного трансформатора (ИТ), входы которых подключаются параллельно к выходу предусилителя, а выходы объединяются. Задержка сигнала в ЛЗ несколько меньше длительности его фронта, а вход и выход ЛЗ согласуются с нагрузками таким образом, чтобы отраженных сигналов не возникало.

Поскольку при этом вход и выход ИТ подключены к низкоомным нагрузкам (порядка волнового сопротивления ЛЗ), постоянная дифференцирования ИТ очень велика (много больше длительности входных импульсов) и при прохождении через ИТ сигналы практически не меняют форму, но уменьшается их амплитуда и меняется полярность. Понижение амплитуды импульсов в трансформаторе задается таким, чтобы в момент t_m , когда входной импульс достигает амплитудного значения, сигналы после линии задержки (U_1) и трансформатора (U_2) взаимно компенсировались. Выходные импульсы с ЛЗ и ИТ складываясь дают биполярный сигнал (Σ), причем при выполнении условия $U_1(t_m) + U_2(t_m) = 0$ момент изменения его полярности совпадает с вершиной входного импульса (t_m). Для качественного исполнения операции сложения применяется смеситель (Σ) импульсов, сконструированный на основе ОУ.

Для не слишком коротких сигналов вместо импульсного трансформатора можно использовать линейный инвертирующий каскад с коэффициентом передачи по напряжению $-1 < K < 0$, который реализуется с помощью микросхемы ОУ. Для согласования с ЛЗ его входное и выходное сопротивления должны быть малыми (порядка волнового сопротивления ЛЗ), что обеспечивается параллельной отрицательной обратной связью по напряжению ($J \rightarrow U$). В этом случае ОУ может выполнять и функцию смесителя (на его отрицательный вход сигнал с детектора подается непосредственно, а на положительный - через ЛЗ).

В тех случаях, когда входной импульс имеет плоскую вершину и момент перехода через ноль его первой производной размыт (в пределах длительности вершины импульса), с помощью специальных устройств формируется биполярный импульс, соответствующий второй производной от входного импульса. Этот импульс пересекает нулевой уровень в момент, когда крутизна фронта входного сигнала максимальна, т.е. временная привязка

производится примерно к середине фронта импульса (к точке перегиба). При этом возникает дополнительная методическая задача: сформированный импульс пересекает нулевой уровень дважды (на фронте и срезе входного сигнала) и второе пересечение должно быть дискриминировано; эта задача решается с помощью активного дискриминатора (например, триггера Шмитта), конечное состояние которого зависит от направления перехода входного напряжения через нулевой уровень (от отрицательных значений к положительным или наоборот).

С выхода ФБИ сигнал поступает на Д“0”. Для увеличения крутизны средней части биполярного сигнала (пересекающей нулевой уровень) и, тем самым, для увеличения точности временной привязки входных импульсов, в некоторых случаях между ФБИ и Д“0” устанавливается дополнительный быстродействующий формирователь на туннельном диоде.

Трудность построения “дискриминатора нуля” определяется шумами и фоновыми импульсами. Для предотвращения их влияния можно использовать одновибратор и дискриминатор с общим входом, подключенные к схеме совпадений. Одновибратор имеет достаточно высокий по сравнению с уровнем шума положительный порог и в начале первого полупериода биполярного импульса на выходе его вырабатывается положительный импульс примерно равный по длительности входному. Дискриминатор имеет близкий к нулю отрицательный порог, лишь немного превышающий уровень шума. Такая система срабатывает только от биполярных импульсов (в момент изменения полярности, причем только при изменении полярности в определенной последовательности) и отсекает практически весь шумовой фон.

Для сигналов с достаточно короткими фронтом и срезом и острой вершиной в качестве “дискриминатора нуля” может служить также триггер Шмитта с достаточно большой величиной гистерезиса U_T (по крайней мере, большей уровня шумов и фоновых сигналов). Порог его включения U_{T1} выставляется на уровне U_T , а порог выключения $U_{T2} = 0$.

В рассмотренном методе динамический диапазон амплитуд входных импульсов перекрывает два порядка величины, а временное разрешение δT достигает 0.1 нс. Однако по сравнению с методом “привязки по фронту”, метод “пересечения нуля” требует значительно большего времени (мертвое время) для выставления временной метки. В методе “пересечения нуля” это время составляет от нескольких единиц до нескольких десятков нс, складываясь из

длительности фронта сигнала детектора и длительности сигналов “дискриминатора нуля”.

Метод “следящего порога”.

Этот метод заключается в том, что формирователь запускается при достижении входным сигналом уровня, равного предварительно заданной фиксированной части его амплитуды. Он позволяет осуществить временную привязку практически к любой точке фронта входного импульса и ввести поправку на время нарастания сигнала в широком диапазоне амплитуд. Основанные на этом принципе устройства называются *формирователями со следящим порогом или дискриминаторами постоянной фракции*.

На рис.2а приведена функциональная схема такого прибора, а на рис.2б - временные диаграммы, поясняющие принцип его работы.

В точке А входной импульс разветвляется на линию задержки (ЛЗ) и в тракт регулировки порога формирователя. Последний состоит из аттенюатора (Ат) с коэффициентом ослабления $B < 1$, линейного дискриминатора (ЛД) с порогом $U_{п} > 0$ и линейного инвертирующего каскада с $K = -1$.

В смесителе (Σ) ослабленный инвертированный сигнал с отсеченным начальным участком фронта складывается со сдвинутым по времени исходным сигналом. В результате сложения этих двух сигналов получается биполярный импульс, причем полярность меняется в момент достижения входным сигналом уровня, отвечающего заданной части его амплитуды. Результат сложения поступает на одновибратор (ОВ) с порогом, равным порогу ЛД: $U_{пОВ} = U_{пЛД}$.

Для простоты анализа представленные на рис. 2б входные сигналы разной амплитуды (V_{01} и V_{02}) имеют линейный фронт и плоскую вершину. Поскольку форма их должна быть инвариантной, длительность фронта $T_{ф}$ не зависит от амплитуды сигналов. Из приведенных на рис.2б временных диаграмм видно, что момент начала вырабатываемого данной системой прямоугольного импульса не зависит от амплитуды входного сигнала, если $U_{пОВ} = U_{пЛД}$ и задержка T_3 несколько превышает длительность фронта сигналов. Выходной импульс появляется через $\Delta t = T_3 + B \cdot T_{ф}$ после начала входного сигнала (B - ослабление входного сигнала аттенюатором).

Для доказательства этого утверждения достаточно рассмотреть заштрихованные на рис.2б треугольники. В увеличенном виде они приведены на рис.2в. Пусть $AB \equiv x$. Поскольку $\Delta ABC \propto \Delta CDE$, а

$\Delta ACG \propto \Delta CFE$ (по углам),
 $AB/DE = AC/CE = AG/FE$, т.е.

$$\frac{x}{T_\Phi - x} = \frac{B\Delta V_0}{(1 - B)\Delta V_0}.$$

Отсюда находим: $x = B \cdot T_\Phi$. Следовательно выходной импульс появляется через $\Delta t = T_3 + B \cdot T_\Phi$ после начала входного сигнала; величина Δt не зависит от амплитуды входного сигнала и соответствует моменту, когда он достигают уровня $B \cdot V_0$.

Поскольку все преобразования импульсов до ОВ линейны, проведенные рассуждения будут справедливы для входных сигналов произвольной, инвариантной по отношению к амплитуде, формы.

Для реализации этого метода вместо ЛД и ОВ можно использовать нуль-детектор (см. выше), устанавливая его после смесителя.

Метод “следящего порога” является наиболее совершенным способом временной привязки сигналов, имеющих инвариантную форму. Временное разрешение этого метода δT достигает $50 \div 100$ пс, а мертвое время определяется, в основном, переключением нелинейных элементов и составляет от нескольких единиц до нескольких десятков нс.

Точность временной привязки сигналов методами “пересечения нуля” и “следящего порога” зависит от выполнения основного условия - неизменности *формы* сигнала, снимаемого с детектора. Это условие выполняется только приближенно. Так, для полупроводникового детектора длительность фронта сигналов немного зависит от расположения трека частицы в его чувствительной области; для сцинтилляционных детекторов небольшие вариации формы сигналов могут быть связаны со статистическими флуктуациями в ФЭУ, влиянием шумов, нелинейных искажений и помех.

Анализ статистических процессов сбора носителей заряда, приводящих к небольшим флуктуациям формы выходных сигналов детекторов показывает, что существует оптимальное значение коэффициента аттенюации сигналов B , обеспечивающее наилучшее временное разрешение системы. Для сцинтилляционных детекторов это значение $B = 0.05 \div 0.2$. Поэтому в экспериментальных установках предусматривается возможность регулировки этого параметра.

В ряде детекторов (обычно в детекторах большого объема) время сортирования носителей заряда, длительность фронта и форма выходного сигнала зависят от длины трека ионизирующей частицы в

чувствительной области. При временной привязке таких сигналов до поступления на ФВМ они пропускаются через дополнительный дискриминатор, порог которого выставляется так, чтобы интересующие нас сигналы пересекали его раньше некоторого заданного момента времени, т.е. сигналы с длинными фронтами дискриминируются. Эта методика основана на том, что время собирания электронного и ионного (дырочного) компонентов ионизации в рассматриваемых детекторах обычно существенно различаются (электроны собираются быстрее) и для сигналов не слишком большой амплитуды, для которых длительность фронта определяется, в основном, собиранием электронов, разброс ее не слишком велик.

4. ЗАДАНИЕ

На основе операционного усилителя собрать и настроить формирователи временной метки с заданными преподавателем порогами, амплитудой и длительностью выходных импульсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Н.Дмитриева, А.С.Ковтюх, Б.Х.Кривицкий. Ядерная электроника. М.: Изд. МГУ. 1982. Гл. 5.
2. П.Хоровиц, У.Хилл. Искусство схемотехники. М.: Мир. 1983. т.1.
3. А.И.Абрамов, Ю.А.Казанский, Е.С.Матусевич. Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Энергоатомиздат. 1985.
4. В.А.Григорьев, А.А.Колюбин, В.А.Логинов. Электронные методы ядерно-физического эксперимента. М.: Энергоатомиздат. 1988.
5. Х.Шмидт. Измерительная электроника в ядерной физике. М.: Мир. 1989.

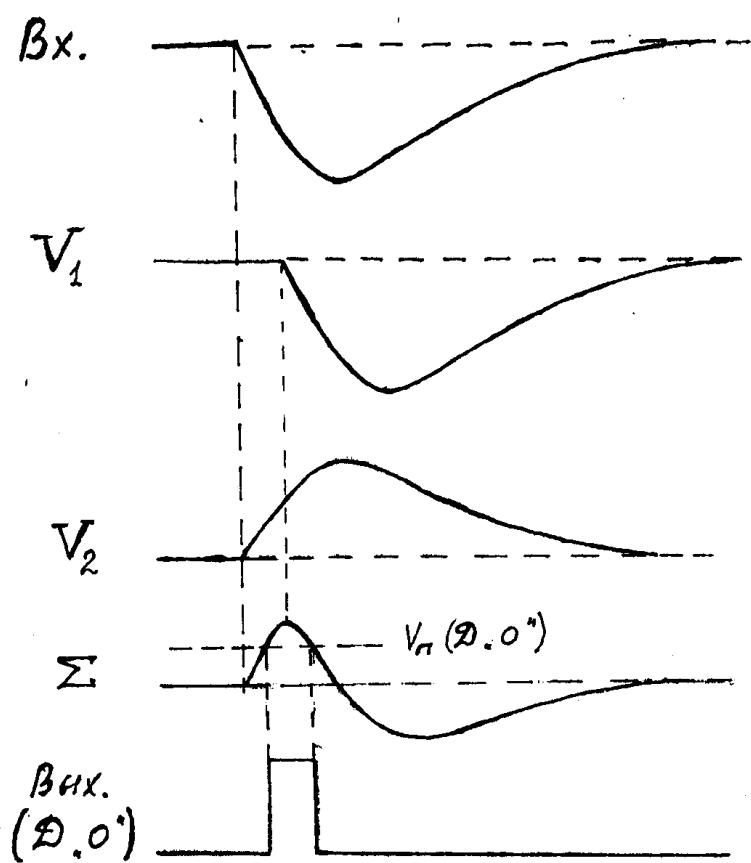
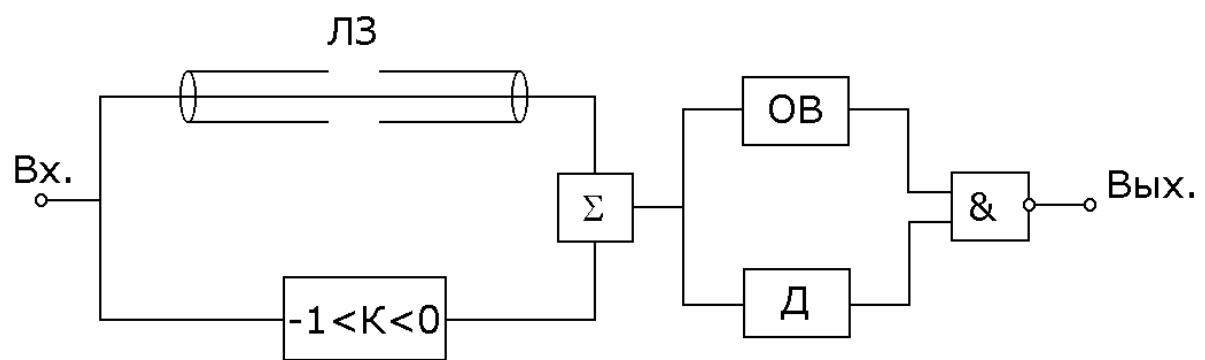


Рис.1. Функциональная схема формирователя временной метки методом “пересечения нуля” и синхронизованные импульсы в различных точках прибора, поясняющие принцип его работы.

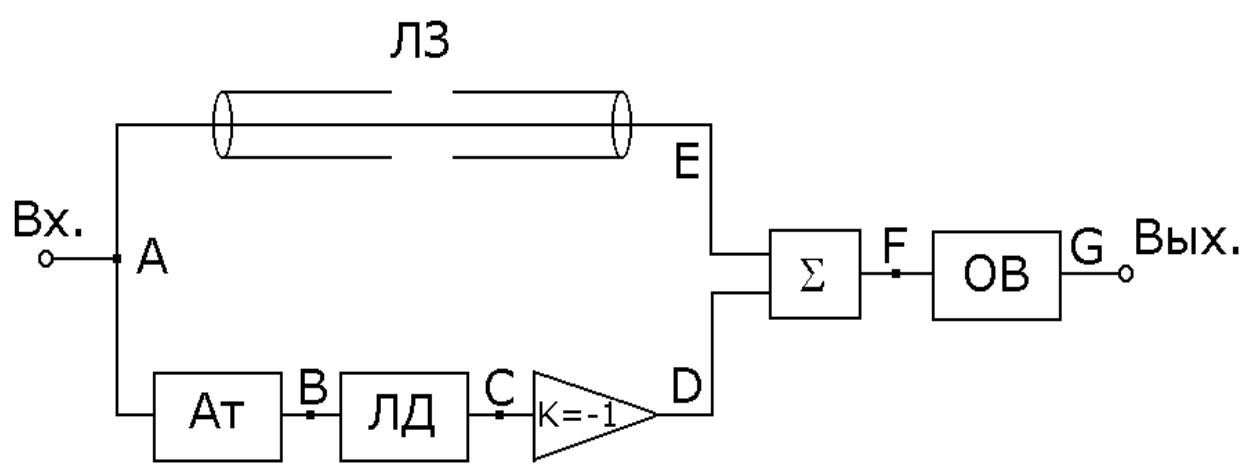


Рис.2а. Функциональная схема формирователя временной метки со
“следящим порогом”.

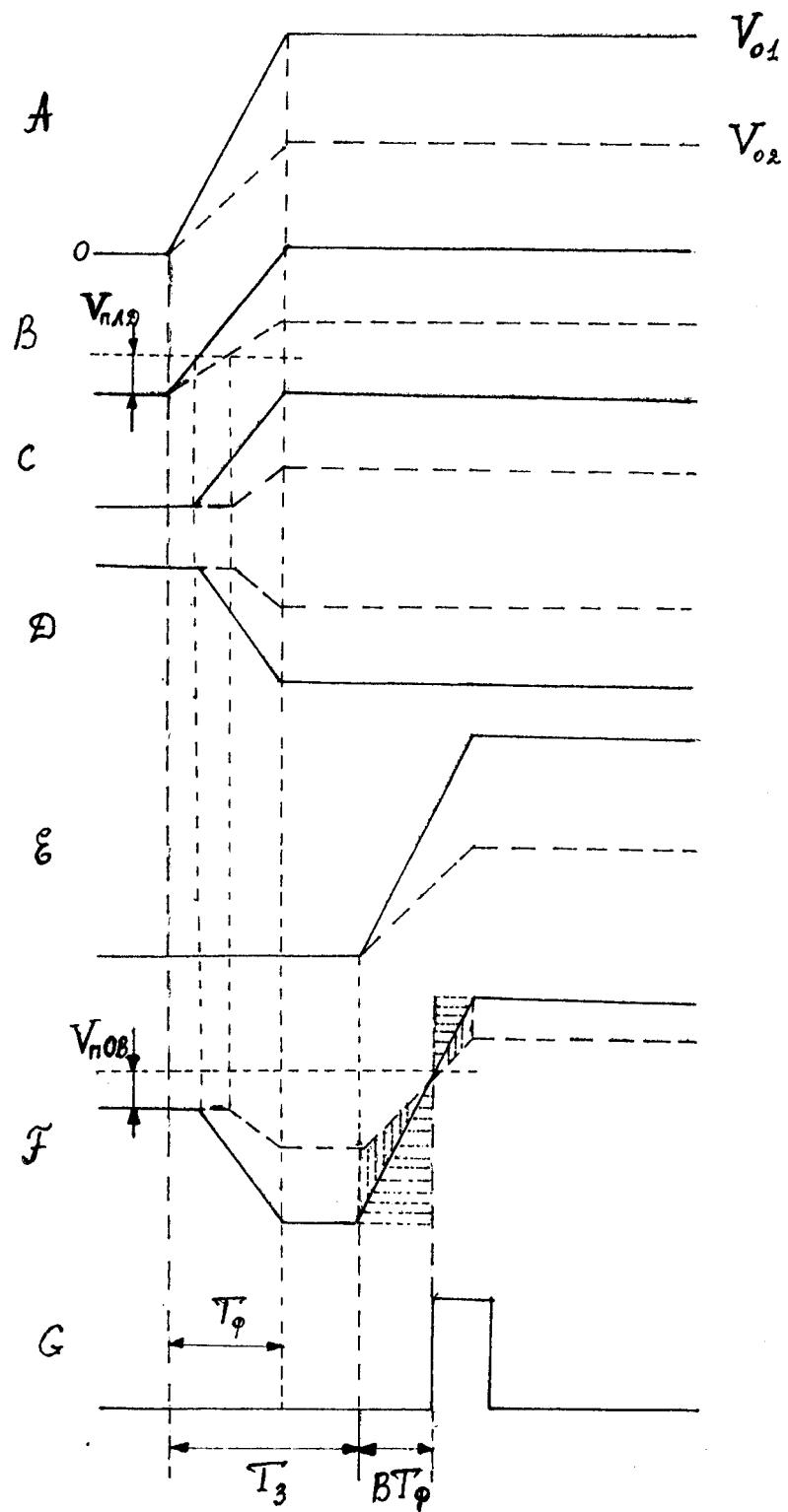


Рис. 26. диаграммы, поясняющие принцип работы формирователя временной метки со “следящим порогом”.

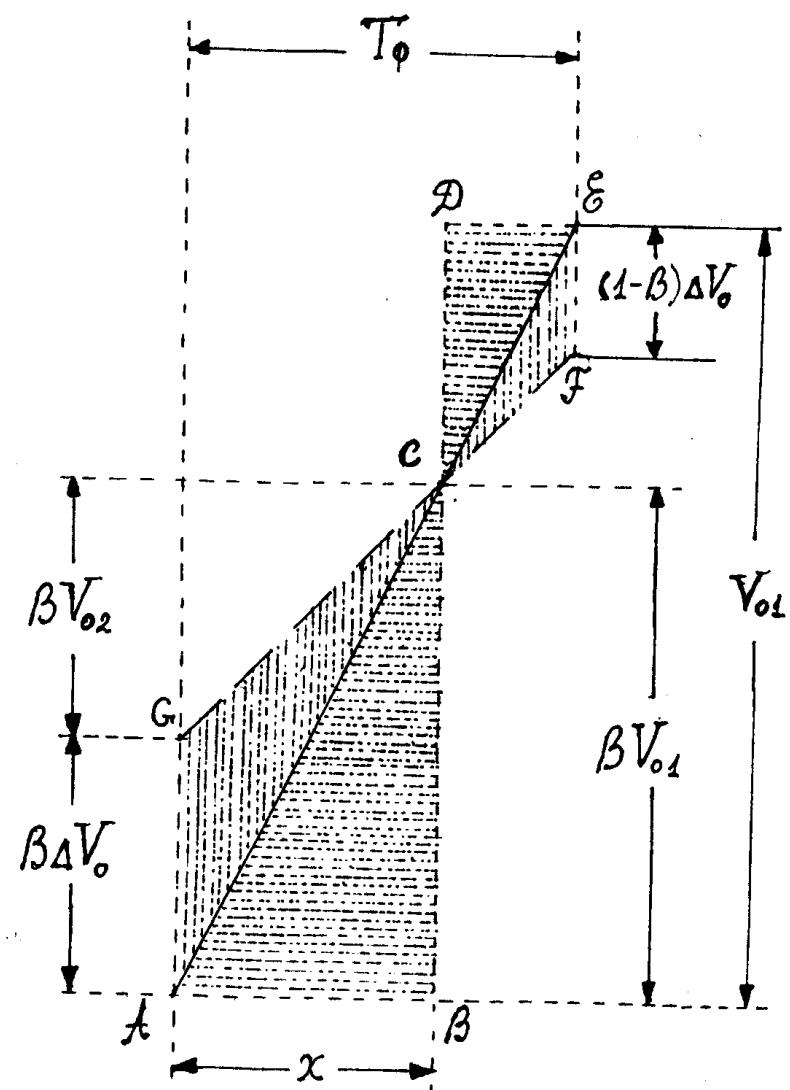


Рис.2в. Временная диаграмма в точке F формирователя временной метки со “следящим порогом”.