

ЕФИ-391(49)-79

Э.А.АЙРАПЕТОВ, Л.С.БАГДАСАРЯН, Ю.А.БОРОДИН^{*)}

Г.С.ГРИГОРЯН, В.В.КУЛИКОВ^{*)}

СХЕМА ВРЕМЕННОЙ КОМПЕНСАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ
РАЗМЕРОВ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ

^{*)} ИТЭФ (Москва)

Ереван 1980

При измерении временных интервалов в физике частиц одним из основных требований, предъявляемых к времяизмерительным схемам, использующим, в частности, сцинтилляционные счетчики, является высокое временное разрешение порядка долей наносекунды. Вместе с тем, характер решаемых в экспериментах задач часто требует применения сцинтилляторов больших размеров, длиной порядка метра и более. И если такой сцинтилляционный счетчик участвует во временных измерениях, например, в измерениях времени пролета, то неизбежно возникает необходимость уменьшения временного разброса выходных импульсов счетчика, обусловленного прохождением частиц через разные пространственные точки сцинтиллятора. Величина этого временного разброса, определяемая разницей во времени распространения световых импульсов от различных мест прохождения частиц через сцинтиллятор до фотокатода ФЭУ, достигает в больших счетчиках нескольких наносекунд (задержка распространения света в сцинтилляторе, по нашим измерениям, составляет 8 нсек/м). Ниже обсуждается именно этот временной разброс импульсов со сцинтилляционного счетчика и его происхождение каждый раз не оговаривается.

Рассмотрим случай регистрации частиц узким сцинтиллятором длиной ℓ , оснащенным ФЭУ с формирователем (Φ) на одном из торцов (рис.1а). Для оценки величины обсуждаемого временного разброса импульсов можно с достаточной точностью считать линейной зависимость времени t появления сформированного сигнала ФЭУ на входе регистрирующего устройства (ПУ) от координаты z места прохождения частицы относительно фотокатода ФЭУ. Эта зависимость изображена на рис.1а и определяется выражением

$$t = t_0 + \alpha z \quad 0 \leq z \leq \ell \quad \dots, \quad (I)$$

где t_0 - задержка импульса в формирующих элементах счетчика и кабелях, α - константа, обратная скорости света в веществе сцинтиллятора. При $z = \ell$ t принимает максимальное значение $t_0 + \alpha \ell \equiv t_\ell$ и временной разброс импульсов $\Delta t = t - t_0$ достигает, в этом случае, величины

$$(\Delta t)_{\max} = \alpha \ell \quad \dots \quad (2)$$

Величина $\alpha \ell \equiv \ell_{\text{экв}}$ представляет собой эквивалентную длину счетчика - величину, равную времени прохождения светового импульса в сцинтилляторе длиной ℓ от одного торца до противоположного, выраженную в наносекундах. Таким образом, в сцинтилляционном счетчике с одним ФЭУ величина рассматриваемого временного разброса импульсов имеет порядок эквивалентной длины сцинтиллятора, что при геометрической длине последнего, например, в 1м составит в среднем 8 нсек. Неприемлемость такой временной неопределенности для точных временных измерений очевидна.

Оснастим теперь тот же сцинтиллятор двумя ФЭУ с противоположных торцов (рис.1б) и будем регистрировать прохождение частиц через счетчик импульсом одного из двух ФЭУ (режим "ИЛИ"), приходящим на вход ПУ первым. В этом случае зависимость $t = t(z)$ определяется выражением

$$t = \begin{cases} t_0 + \alpha z & 0 \leq z \leq \ell/2 \\ t_0 + \alpha(\ell - z) & \ell/2 \leq z \leq \ell \end{cases} \quad (3)$$

и имеет вид, изображенный на рис.1б. Максимум t достигается здесь при $z = \ell/2$ и равен $t_0 + \alpha \ell/2 \equiv t_{\ell/2}$, что приводит к

$$(\Delta t)_{\max} = \alpha \ell/2 \quad (4)$$

т.е. величина временного разброса импульсов уменьшилась вдвое. Аналогичная величина $(\Delta t)_{\max}$ получилась бы при работе с одним ФЭУ на счетчике вдвое меньшей длины, но при этом регистрирующая система имела бы и вдвое меньший геометрический аксептанс. Оснащение же сцинтиллятора двумя ФЭУ, с регистрацией частиц в режиме приоритета первого импульса, позволяет скомпенсировать во времени половину длины пространственной апертуры счетчика без изменения его геометрии. Тем не менее, полученная величина $(\Delta t)_{\max}$ имеет все еще порядок нескольких наносекунд, что опять-таки неприемлемо для точных временных измерений на больших сцинтилляторах и требует дальнейшей докомпенсации ℓ . Фактически необходимо решить следующую задачу: импульс, сигнализирующий о прохождении частицы через счетчик, должен появляться на входе ПУ всегда через одно и то же время t с момента прохождения частицы, независимо от координаты z места её

прохождения в сцинтилляторе. Эта задача по-разному решалась различными авторами, например, [1,2,3,4] с помощью специальных схем, обрабатывающих сигналы двух ФЭУ одного счетчика с промежуточным преобразованием времени в напряжение или заряд, и выдающих на выходе один сигнал с достаточной точностью удовлетворяющий сформулированному требованию. В представляемой ниже схеме, называемой далее СКГ (схема компенсации геометрии), реализуется принцип компенсации, предложенный в [5], который не требует промежуточного преобразования и сводится к следующему: если сформированные импульсы обоих ФЭУ счетчика вводятся с противоположных концов в линию задержки, эквивалентную в нсек длине счетчика, т.е.

$$t_{\text{заг}} = l_{\text{экв}} \quad (\text{нсек}) \quad (5)$$

то эти импульсы будут совпадать на линии в различных точках, в зависимости от места прохождения частицы через сцинтиллятор, но всегда одно и то же время t_{12} с момента прохождения частицы, определяемое как

$$t_{12} = \frac{t_1 + t_2 + l_{\text{экв}}}{2}, \quad (6)$$

где t_1 и t_2 - моменты времени появления сформированных импульсов ФЭУ на входах 1 и 2 СКГ, которые, в свою очередь, имеют вид:

$$t_1 = t_0 + \alpha z \quad 0 \leq z \leq l \quad (7)$$

$$t_2 = t_0 + \alpha(l-z) \quad 0 \leq z \leq l \quad (8)$$

С учетом (7) и (8), для момента совпадения импульсов на линии задержки получим независящее от z выражение

$$t_{12} = t_0 + l_{\text{экв}} \quad (9)$$

Отбирая при каждом прохождении частицы через счетчик лишь импульс от совпадения двух сигналов, СКГ, таким образом, привяжет регистрацию частицы к моменту прохождения её через сцинтиллятор безотносительно от места прохождения.

Отметим, однако, что условие (5) является лишь частным случаем более широкого условия

$$t_{\text{заг}} \geq l_{\text{экв}}, \quad (10)$$

налагаемого на длину вводимой линии задержки и реализованного, в частности, в описываемой здесь схеме. Условие (10) допускает использование СКГ не только с данным конкретным счетчиком длиной l , но и со счетчиками большей или меньшей длины. Момент совпадения сигналов на линии задержки определяется в этом случае как

$$t_{12} = t_0 + (l_{\text{экв}} + t_{\text{заг}}) / 2. \quad (11)$$

Окончательно для времени t появления выходного сигнала СКГ на входе регистрирующего устройства относительно момента прохождения частицы через сцинтиллятор, имеем:

$$t = t_0 + (l_{\text{экв}} + t_{\text{заг}}) / 2 + \tau, \quad (12)$$

где τ - задержка в формирующих элементах СКГ с момента совпадения сигналов на линии до момента появления импульса на входе РУ. Правая часть (I2) содержит лишь постоянные параметры и не зависит от Z , т.е. $t = \text{const}$ и, таким образом, решение сформулированной задачи можно считать достигнутым. Соответствующая (I2) кривая приведена на рис.1в, где временной разброс импульсов Δt , обусловленный прохождением частиц через разные пространственные точки сцинтиллятора, равен нулю. В реальных схемах получение такой идеальной временной компенсации геометрической длины счетчика сопряжено с определенными трудностями, обусловленными влиянием на точность компенсации ряда факторов, которые будут рассмотрены ниже. Пока же отметим, что величина недокомпенсации определяется, в конечном итоге, точностью, с которой регистрируется момент совпадения импульсов в линии задержки СКГ.

Принципиальная схема СКГ представлена на рис.2. Сформированные сигналы двух ФЭУ сцинтилляционного счетчика подаются на два идентичных входа с преобразователями уровней, выполненными на транзисторах КТ349 ($T_1 - T_4$). В схеме второго входа предусмотрен переключатель П, выведенный на переднюю панель блока СКГ и позволяющий при необходимости отключать режим суммирования сигналов в процессе наладочных и контрольных работ (положение I "ПРОПУСКЕНИЕ"). Преобразованные сигналы положительной полярности вводятся встречно с противоположных концов в линию задержки (ЛЗ), состоящую из 12-ти отрезков 50Ω -го кабеля. Длина каждого отрезка $\Delta l_{\text{заг}} = 20$ см (или $\Delta t_{\text{заг}} = 1$ нсек). Суммарный импульс, таким образом, может сниматься с

линии в 12-ти точках с помощью двух 8-ми входных логических элементов "ИЛИ" К138ЛМ1 (M_1 и M_2) с порогом, превышающим амплитуду одиночного импульса, но достаточно низким для пропускания суммарного импульса. Выходной сигнал M_1 или M_2 запускает одновибратор, собранный на схеме К138ЛМ2 (M_3), который совместно с преобразователем уровней на транзисторах T_5 и T_6 формирует выходной НИМ - стандартный сигнал СКГ, длительностью 10 нсек. Параллельно включается схема индикации работы СКГ (M_4) с лампой Л1, выведенной на переднюю панель блока СКГ. Окончательно выходной сигнал выводится на два запараллеленных 50Ω -ных разъема. Конструктивно две схемы СКГ размещаются в одном блоке $80 \times 160 \times 280$ мм³, выполненном в стандарте "Вишня".

Остановимся теперь на некоторых особенностях схемы. Рассмотрим, прежде всего, вопрос выбора оптимальной длины $\Delta l_{\text{заг}}$ (или в нсек - $\Delta t_{\text{заг}}$) отрезков, на которые разбивается линия задержки СКГ. Этот выбор определяет точность измерения момента времени, в который уровень суммарного сигнала превосходит порог схемы "ИЛИ", и необходимое число входов этой схемы. Заметим, что суммируемые импульсы имеют одинаковые параметры, а кабель, используемый в качестве сумматора, представляет собой линейный смеситель, так что амплитуда суммы двух импульсов в момент их полного наложения равна удвоенной амплитуде одиночного импульса. Поэтому порог срабатывания M_1 и M_2 должен превышать амплитуду одиночного импульса, но оставаться ниже уровня удвоенной амплитуды. При сложении идеально прямоугольных импульсов с амплитудой А, величина амплитуды суммарного сигнала равна 2А при любой степени перекрытия импульсов. В этом случае конкретное значение уровня порога, если оно удовлетворяет отмечен-

ному условию, несущественно, и величина $\Delta t_{\text{заг}}$, очевидно не должна превышать длительности одиночного прямоугольного импульса. При этом максимальная величина недокомпенсации будет равна $\Delta t_{\text{заг}}/2$.

При сложении сигналов с линейным фронтом нарастания амплитуда суммарного сигнала существенно зависит от степени перекрытия импульсов и влияние уровня порога схемы "ИЛИ" на точность регистрации момента совпадения становится определяющим. Для длины $\Delta l_{\text{заг}}$ отдельной секции ЛЗ, из ограничений, налагаемых на уровень порога, в этом случае вытекает условие: величина $\Delta l_{\text{заг}}$ должна быть меньше длительности фронта нарастания импульса. При этом пропадает связь величины недокомпенсации Δt с длиной секции $\Delta l_{\text{зад}}$, и точность определения момента времени, в который уровень суммы импульсов превысит порог, т.е. точность компенсации определяется здесь степенью отклонения формы фронта от линейной и стабильностью порога схемы "ИЛИ". Сигналы в коллекторах транзисторов T_1 и T_3 имеют фронт нарастания 2 - 3 нсек, близкий к линейному. Поэтому была выбрана длина отрезка кабеля $\Delta l_{\text{заг}} = 20$ см ($\Delta t_{\text{заг}} = 1$ нсек). Уровень порога срабатывания M_1 и M_2 равен $-1,2$ В при уровне логического нуля $-1,6$ В. Параметры входных импульсов, необходимые для пороговой дискриминации суммы сигналов при таком уровне порога, обеспечиваются входными преобразователями уровней и напряжением смещения -2 В. Положительный сигнал на коллекторах T_1 и T_3 имеет амплитуду $+0,5$ В.

Анализ работы СКГ показал, что изменение времени задержки СКГ $\Delta \tau$ существенно зависит от изменения напряжения -2 В:

$\Delta \tau = 6$ нсек/В $\cdot \Delta U$ (В) и температуры. Введение в схему T_7 , D_3 и D_1 позволило получить $\Delta \tau = 0,36$ нсек/В ΔU (В) и для термостабильности задержки $\Delta \tau = 0,01$ нсек/град $\cdot \Delta t^\circ$ в диапазоне температур от 20°C до 60°C . Зависимость $\Delta \tau$ от стабильности напряжения питания $+6$ В имеет вид: $\Delta \tau = 0,5$ нсек/В $\cdot \Delta U$ (В) в диапазоне от $+5$ В до $+7$ В. Все эти параметры вполне удовлетворительны для лабораторного применения и необходимых нам точностей.

Рассмотрим теперь еще один фактор, который необходимо учитывать при использовании во временных измерениях многоходовых микросхем. До сих пор молчаливо предполагалось, что задержка сигнала между входом и выходом у M_1 и M_2 одинакова для всех входов. Измерения показали, однако, что это не так. В справочниках и технических паспортах указывается обычно лишь среднее время задержки сигнала в микросхеме. Но при высокоточных измерениях временных интервалов с многоходовыми схемами важно знать не столько абсолютную задержку сигнала, сколько разницу задержек в каналах Вход-Выход для различных входов. Мы провели испытание микросхем К138ЛМ1 на различие в задержках между отдельными входами и выходом. Один и тот же сигнал подавался поочередно на разные входы микросхемы и с помощью время-амплитудного конвертора, с последующим преобразованием амплитуды в код, измерялась задержка между входным и выходным сигналами. На рис.3 представлено распределение по параметру $\Delta t(n) = t(n) - t(1)$, представляющему собой разницу между задержкой $t(1)$ в канале первого входа и задержкой $t(n)$ в канале n -го входа микросхемы. Видно, что эта разница в среднем

составляет $\pm 0,05$ нсек. На том же рисунке показано распределение по разнице $\Delta t(1)$ между задержками в каналах первых входов различных корпусов для 46-ти микросхем К138ЛМ1 из различных партий по времени изготовления. Разброс задержек для микросхем из разных партий достигает уже 1 нсек, однако в пределах отдельной партии этот разброс может быть оценен как $\pm 0,2$ нсек. Эти цифры будут определять компенсационные точности СКГ. Поэтому, с целью уменьшения влияния рассматриваемого фактора на точность работы СКГ, мы предусмотрели возможность введения на входах микросхем дополнительных сопротивлений $R_1 + R_{12}$ (рис.2), образующих интегрирующую цепочку с входной ёмкостью транзисторов в M_1 и M_2 для точной корректировки задержек. При настройке 10-ти СКГ нам пришлось вводить не более трех сопротивлений (20 - 100 ом) в отдельной схеме.

Испытания СКГ проводились с импульсами от генератора и со сцинтилляционными счетчиками на пучке частиц. На рис.4 приведены блок-схема и результаты испытаний от генератора для трех СКГ (кривые проведены "от руки"). Импульс от генератора (ГЕН) через разветвитель (Р) и линию задержки (ЛЗ) подается на вход "СТАРТ" время-амплитудного конвертора (ТАС). Со второго выхода разветвителя импульс выводится на вход блока регулируемой спиральной линии задержки (БДС), имеющего два выхода. Моменты времени появления сигналов на выходах БДС равны $T_0 + \Delta T$ и $T_0 - \Delta T$, где ΔT - регулируемая задержка, имитирующая координату места прохождения частицы через сцинтиллятор, а T_0 - начало отсчета ($T_0=0$). Оба сигнала БДС подаются на входы СКГ, выходной импульс которой служит

сигналом "СТОП" время-амплитудного конвертора. Таким образом, временной разброс Δt выходных импульсов СКГ трансформируется в колебания величины СТАРТ-СТОП интервала на входе ТАС. Величина этого интервала измерялась амплитудным преобразователем (БАП). Изменением задержки ΔT в обоих направлениях относительно нуля определяется интервал $2|\Delta T|$ между импульсами на двух входах СКГ, в пределах которого временной разброс Δt выходных импульсов СКГ не превышает величины $\pm 0,1$ нсек. Если при изменении задержки в пределах интервала $2|\Delta T| = 10$ нсек величина Δt превышала $\pm 0,1$ нсек, то вводилось или изменялось соответствующее сопротивление $R_1 + R_{12}$ и измерение повторялось. Из приведенных кривых видно, что диапазон $2|\Delta T|$, в пределах которого величина недокомпенсации не превышает $\pm 0,1$ нсек, равен 11 нсек, что соответствует длине сцинтиллятора 1,3 метра.

Работа СКГ со сцинтилляционными счетчиками исследовалась на материале, набранном в эксперименте по изучению реакции $\pi^- \alpha$ -упругого рассеяния назад [6]. СКГ использовались здесь в счетчиках широкоапертурного времяпролетного спектрометра заряженных частиц [7]. Измерялось время пролета фоновых протонов от мишени до базового годоскопического счетчика, состоящего из 8-ми элементов. Каждый элемент имел размеры 15 x 70 x 2 см³ и оснащался с торцом двумя ФЭУ-30 с пороговыми формирователями, и СКГ. Выходной импульс СКГ подавался на вход "СТАРТ" время-амплитудного конвертора ТН200А/Н. На вход "СТОП" конвертора приходил сигнал от другого базового счетчика, размером 8 x 1,8 x 15 см³, оснащенного также двумя ФЭУ-30 и СКГ и установленного перед мишенью. Время пролета

измерялось с преобразованием Время - Амплитуда - Код. Протоны из мишени попадали в разные точки элементов годоскопа, которые определялись восстановлением траекторий частиц в пространстве с точностью до $\pm 0,5$ мм. Каждый элемент годоскопа разбивался по длине на зоны по 10 см и для каждой зоны строилось распределение измеренных времен пролета, вычислялось среднее время пролета, точность определения среднего \bar{t}^* и дисперсия распределения σ^2 . На рис.5 приведены полученные таким образом кривые компенсации СКГ зависимости измеренного времени пролета от координаты Z места прохождения частицы в сцинтилляторе с привязкой к центрам зон. Под каждой экспериментальной точкой приведено значение \bar{t}^* , полученное для соответствующей зоны. Разрешение по времени пролета \bar{t} , вообще говоря, может зависеть от места прохождения частицы через сцинтиллятор, однако при точности наших измерений в полученных результатах мы не наблюдали какой-либо закономерности для зависимости \bar{t} от Z (\bar{t} меняется в пределах от 0,55 до 0,75 нсек для разных элементов годоскопического счетчика). Из приведенных результатов видно, что с точностью $\Delta t = 60 + 100$ п/сек измеренное время пролета не зависит от Z . Эта величина Δt и определяет точность, с которой СКГ компенсирует временной разброс, обусловленный прохождением частиц через различные точки сцинтилляционного счетчика.

Нами было изготовлено десять СКГ, девять из которых одновременно использовались в экспериментах по изучению π^-d -рассеяния при больших передаваемых импульсах. Все схемы безотказно работали в течение всех серий измерений в этих экспери-

ментах, показав высокую надежность и рабочую стабильность в условиях длительной эксплуатации.

В заключение, авторы выражают глубокую признательность И.А.Радкевичу за полезные обсуждения, а также всему коллективу 3-х метрового спектрометра ИТЭФ за помощь в изготовлении схем и снятии их характеристик.

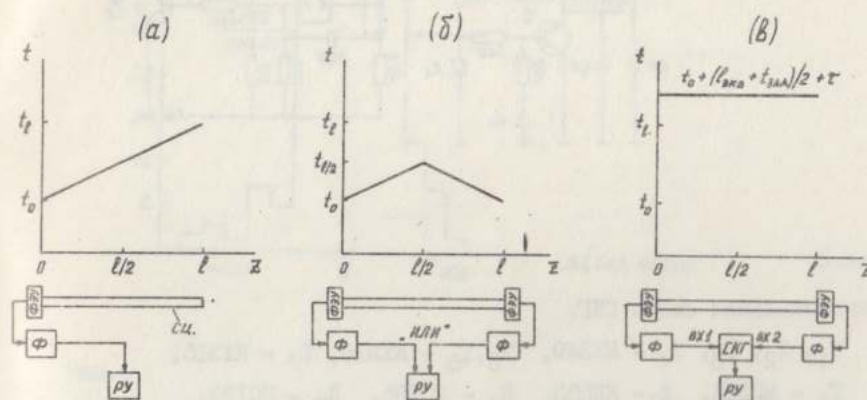


Рис.1

Зависимость времени появления импульса на выходе счетчика от координаты места прохождения частицы через сцинтиллятор при регистрации: а) в режиме одного ФЭУ, б) в режиме "ИЛИ", в) в режиме СКГ.

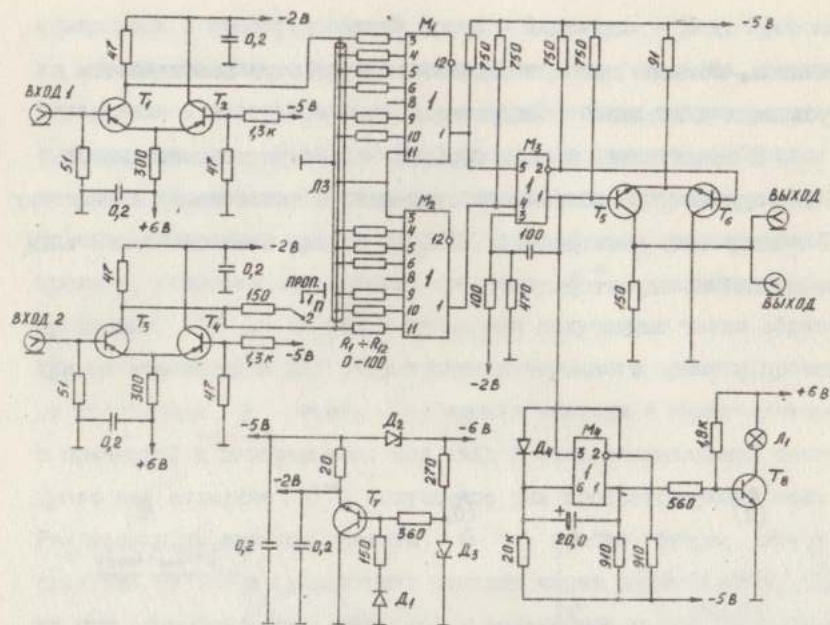


Рис.2

Принципиальная схема СМТ.

T_1, T_2, T_3, T_4 - КТ349, T_5, T_6 - КТ316, T_7 - КТ315,
 T_8 - МП38А, D_1 - КД503, D_2 - 2С156, D_3 - 2С133,
 D_4 - Д105А, M_1, M_2 - К138ЛМ1, M_3, M_4 - К138ЛМ2,
 L_1 - СМН 6x20.

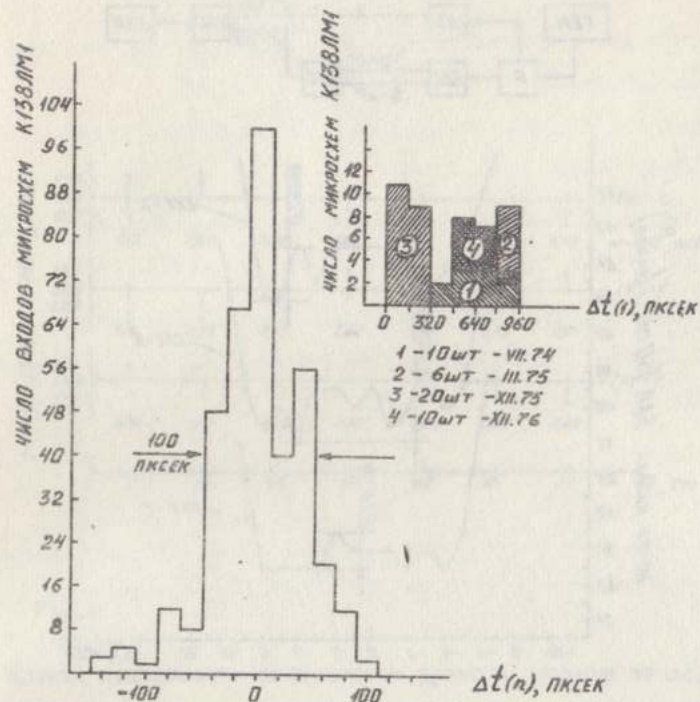


Рис.3

Распределение по разнице в задержках ВХОД-ВЫХОД между первым входом и остальными входами интегральных схем К138ЛМ1

ЛИТЕРАТУРА

1. G Charpak L.Dick L.Feuwrais. Nucl. Instrum. and Meth. 15, 323, 1962.
2. J Guyon J Pigneret M Gouanere. Nucl. Instr. and Meth. 71, 215, 1969.
3. Л.Ондриш, С.В.Мухин, С.В.Рихвицкий, И.Н.Семенюшкин, М.Тура-
ла, П.Хорват, А.Н.Хренов . ПТЭ, 2, 110, 1971.
4. Н.К.Вишневицкий, М.Н.Грачев, И.И.Карпов, В.Г.Лапшин,
А.И.Ронжин, В.И.Рыкалин, В.И.Соляник, В.П.Хромов. Препринт
ИФВЭ, 71-86, Серпухов, 1971.
5. J Faust R.S.Larsen. Nucl. Instrum. and Methods 115 , 365, 1974.
6. В.М.Абрамов В.А.Айрапетов Л.С.Багдасарян И.А.Духовской
В.В.Кишкурно А.П.Крутенкова В.В.Куликов М.А.Мацук
И.А.Радкевич Е.Н.Турдакина В.С.Федоретц . Preprint ИТЭР
21 , Moscow , 1979
7. В.М.Абрамов, Э.А.Айрапетов, Л.С.Багдасарян, И.А.Духовской,
В.В.Кишкурно, А.П.Крутенкова, В.В.Куликов, М.А.Мацук,
И.А.Радкевич Е.Н.Турдакина, В.С.Федоретц. ПТЭ, 5, 52, 1979.

Рукопись поступила 21- го ноября 1979 г.

Редактор Л.П.Мукаян
Тех.редактор А.С.Абрамян

Заказ 452 В4-05052 Тираж 892
Препринт ЕФИ Формат издания 60x84/16
Подписано к печати 7/III-80г. 1,5 уч.изд.л. Ц. 10 к.

Издано Отделом научно-технической информации
Ереванского физического института, Ереван-36, пер.Маркаринна 2