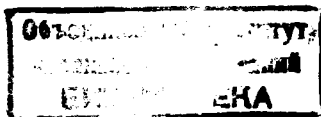


13 - 10408

С.Г.Басиладзе

РАСЧЕТ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ
РЕАЛЬНОГО ФОРМИРОВАТЕЛЯ
ПО ПЕРЕДНЕМУ ФРОНТУ ИМПУЛЬСА



5344.30
Б-272

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



1752/2-77

10/5-77

13 - 10400

С.Г.Басиладзе

РАСЧЕТ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ
РЕАЛЬНОГО ФОРМИРОВАТЕЛЯ
ПО ПЕРЕДНЕМУ ФРОНТУ ИМПУЛЬСА

1977

Басиладзе С.Г.

13 - 10408

Расчёт временного разрешения реального формирователя по переднему фронту импульса

В работе проведен расчёт временного разрешения и минимального разрешающего времени формирователя по переднему фронту импульса. При расчёте учтены: инерционность реальных схем, форма переднего фронта и разброс амплитуд запускающих сигналов.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

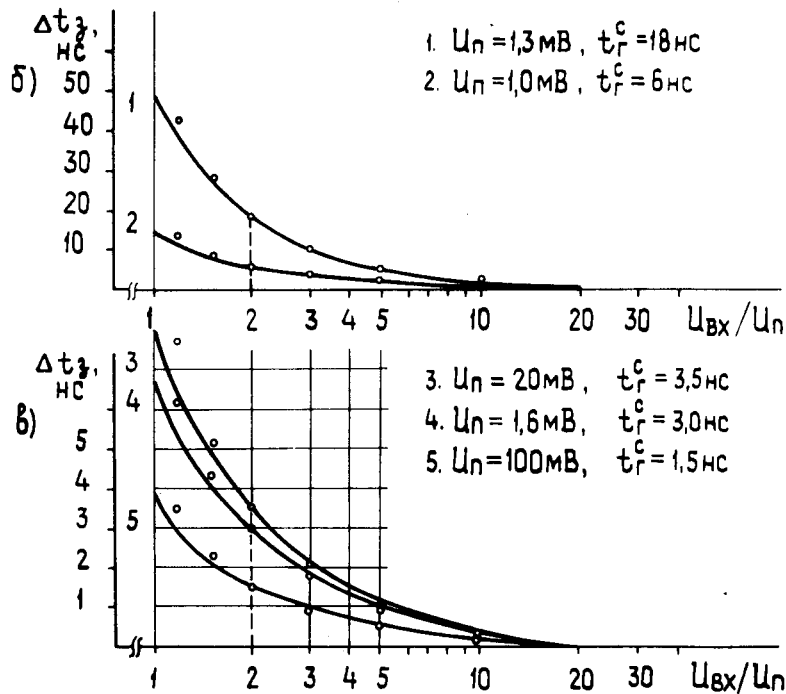
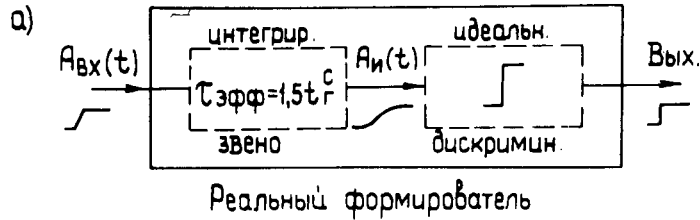
Как известно, реальный формирователь отличается от идеального: 1/ отсутствием ступенчатой переключательной характеристики по постоянному току в нерегенеративных /без внутренней положительной обратной связи/ формирователях; 2/ наличием зависимости порога срабатывания от длительности короткого входного сигнала, или эквивалентной ей зависимости момента срабатывания от амплитуды ступенчатого перепада напряжения.

В современных схемах формирователей дискриминирующий элемент, как правило, регенеративный /триггер Шмитта/. В случае нерегенеративного дискриминирующего элемента используется достаточно большое количество последующих нелинейных элементов /схемы "дифференцирования", времязадающие узлы, формирователи выходных уровней/, обостряющих результирующую переключательную характеристику. Поэтому, практически, на постоянном токе все современные формирователи имеют ступенчатую характеристику переключения.

Второй фактор есть следствие инерционности узлов формирователя. Строго говоря, вклад в собственное "гуляние" * t_r^c дают все узлы формирователя: триггер Шмитта, переключательная характеристика которого на коротких сигналах перестает быть ступенчатой; последующие за ним нелинейные элементы, изменяющие свой порог срабатывания, и предусилитель, вносящий переменную задержку и ухудшающий фронты входного сигнала /в линейном режиме/. Поэтому эквивалентная схема реального формирователя должна содержать много инерционных звеньев, зависеть от конкретного схемного

* Собственное "гуляние" /1/ - величина сдвига выходного сигнала формирователя при изменении ступенчатого перепада напряжения на его входе в пределах от 2 до 20 уровней порога срабатывания.

решения формирователя и описываться достаточно сложным операторным выражением. Однако есть основания предположить, по аналогии с простейшей эквивалентной схемой линейного усилителя, что можно выделить основную постоянную времени $\tau_{эфф}$, которая с достаточной степенью точности определяла бы поведение реального формирователя в области коротких времен. В этом случае эквивалентная схема реального формирователя будет состоять /рис.1а/ из интегрирующего звена с по-



стоянной времени $\tau_{эфф}$ и идеального безынерционного дискриминатора с порогом $A_{п}$. В правомерности такого предположения должен убеждать, например, тот факт, что в настоящее время имеется тенденция включать в схему формирователя перед дискриминирующим элементом предусилитель с большим коэффициентом усиления, инерционность которого и вносит основной вклад в величину "гуляния" формирователя.

Данная эквивалентная схема приводит к следующей очевидной зависимости момента срабатывания формирователя от величины $A_{вх}$ ступенчатого перепада входного сигнала:

$$t_{ср} = -\tau_{эфф} \cdot \ln \left(1 - \frac{A_{п}}{A_{вх}} \right). \quad /1/$$

Нетрудно показать /2/, что $t_{гс}^c = 0,65\tau_{эфф}$. На рис. 1б, в приведены графики зависимости моментов срабатывания от ступенчатого перепада ряда реальных формирователей: 1/ гибридного усилителя-формирователя для пропорциональных камер /3/; 2/ усилителя-формирователя для пропкам на интегральных схемах /4/; 3/ универсального формирователя /5/; 4/ усилителя-формирователя для дрейфовых камер /1/; 5/ универсального формирователя /6,7/ на дискретных элементах, имеющих собственное "гуляние", соответственно, от 18 нс до 1,5 нс. Характеристики совмещены в точке $A_{вх} = 20A_{п}$. Видно, что все зависимости с достаточной степенью точности /кружки на рис. 1б, в/ подчиняются логарифмическому закону сдвига /1/, т.е. принятая эквивалентная схема будет удовлетворительно описывать временные параметры схем, несмотря на их сильное различие в величинах порога и быстродействия, а также в схемной реализации. Расчетные значения были полу-

Рис.1. Эквивалентная схема реального формирователя /а/; зависимости момента срабатывания практических схем формирователей /1,3-7/ от амплитуды запускающего ступенчатого перепада напряжения /б, в/.

чены путем подстановки в /1/ величин t_{Γ}^C , взятых из экспериментальных кривых; кроме того, была введена поправка $(A_{\Pi})_{\text{ЭКСП}} = 0,9A_{\Gamma}$ учитывающая то, что измерения "гуляния" формирователей реально начинают с $5 \div 10\%$ -ного превышения входного сигнала над порогом /по постоянному току/, считая этот уровень за единицу.

На временное разрешение формирователя по переднему фронту кроме его инерционности, как известно, оказывает влияние форма и разброс амплитуд запускающего сигнала, разброс моментов поступления сигналов с детектора-излучений относительно момента прохождения частицы, шумы электроники и детектора. В данной работе мы ограничимся учетом влияния лишь первых трех факторов. Если формирователь сравнительно малоинерционен или порог срабатывания его сравнительно низок, то разброс моментов срабатываний не выходит за пределы переднего фронта входного сигнала. Различные встречающиеся на практике формы переднего фронта входного сигнала удобно аппроксимировать отрезком экспоненты /2/ в виде

$$A_{\text{ВХ}}(t) \approx \frac{A_i}{e^a - 1} \cdot [e^{a \frac{t}{t_H}} - 1], \quad /2/$$

здесь A_i - амплитуда входного сигнала, t_H - время нарастания входного сигнала /от 0 до 100%/ , a - коэффициент, отражающий форму переднего фронта /см. ниже/.

В работе /2/ показано, что решение дифференциального уравнения, связывающего между собой $A_{\text{ВХ}}(t)$ и сигнал на выходе интегрирующего звена $A_{\Pi}(t)$ в эквивалентной схеме /рис. 1а/, имеет вид:

$$A_{\Pi}(t) = \frac{A_i}{e^a - 1} \cdot \left[\frac{t_H}{t_H + 1,5a \cdot t_{\Gamma}^C} \cdot e^{a \frac{t}{t_H}} + \frac{1,5a \cdot t_{\Gamma}^C}{t_H + 1,5a \cdot t_{\Gamma}^C} \cdot e^{\frac{t}{1,5t_{\Gamma}^C}} \right] = A_i \cdot F(a, t_{\Gamma}^C, t). \quad /3/$$

Зависимости $A_{\Pi}(t)$ при трех различных формах переднего фронта входного сигнала: экспоненциальной /рис. 2б; $a = -4$ / , линейной /рис. 3б; $a = 1/4$ / и плавно нарастающей /рис. 4б; $a = 4$ / - приведены, соответственно, на рис. /2÷4/б для трех значений t_{Γ}^C/t_H : 0,2; 0,4; 0,8.

Примем, что амплитуды входных сигналов распределены по закону Гаусса /рис. /2÷4/а/:

$$N_A = \exp \left\{ - \ln 2 \frac{(A_i - A_{\text{ср}})^2}{\sigma_A^2} \right\}, \quad /4/$$

где $A_{\text{ср}}$ - средняя амплитуда, а σ_A^2 - дисперсия амплитуд входных сигналов.

Очевидно, что в момент срабатывания формирователя $\bar{A}_{\Pi} = \bar{A}_i \cdot F(a, t_{\Gamma}^C, \bar{t})$. Здесь и далее приняты относительные переменные: $\bar{A} = A/A_{\text{ср}}$, $\bar{t} = t/t_H$. Следовательно, распределение моментов срабатывания реального формирователя, вызванное разбросом амплитуд входных сигналов, будет иметь вид:

$$N_t = \exp \left\{ - \ln 2 \frac{[\bar{A}_{\Pi}/F(a, t_{\Gamma}^C, \bar{t}) - 1]^2}{\bar{\sigma}_A^2} \right\}. \quad /5/$$

На рис. /2÷4/в, д, ж для одного из типичных значений $\bar{\sigma}_A = 0,2$ /рис. /2÷4/а/ по формулам /3/, /5/ построены распределения N_t . Распределения вычислены для величин порогов $\bar{A}_{\Pi} = 0,6; 0,3; 0,15$ в случаях, когда $\bar{t}_{\Gamma}^C = 0$ /безынерционный формирователь/; 0,2; 0,4; 0,8. Как видим, форма переднего фронта оказывает существенное влияние на величину временного разрешения и на ход зависимостей его от \bar{A}_{Π} и \bar{t}_{Γ}^C .

Подобные графики необходимы для нахождения характеристик электроники время-координатных детекторов /сцинтилляционных спектрометров по времени пролета, дрейфовых камер/. Для схем, работающих по методу совпадений, на основании /5/ можно вычислить кривую задержанных совпадений сигналов с выходов реального

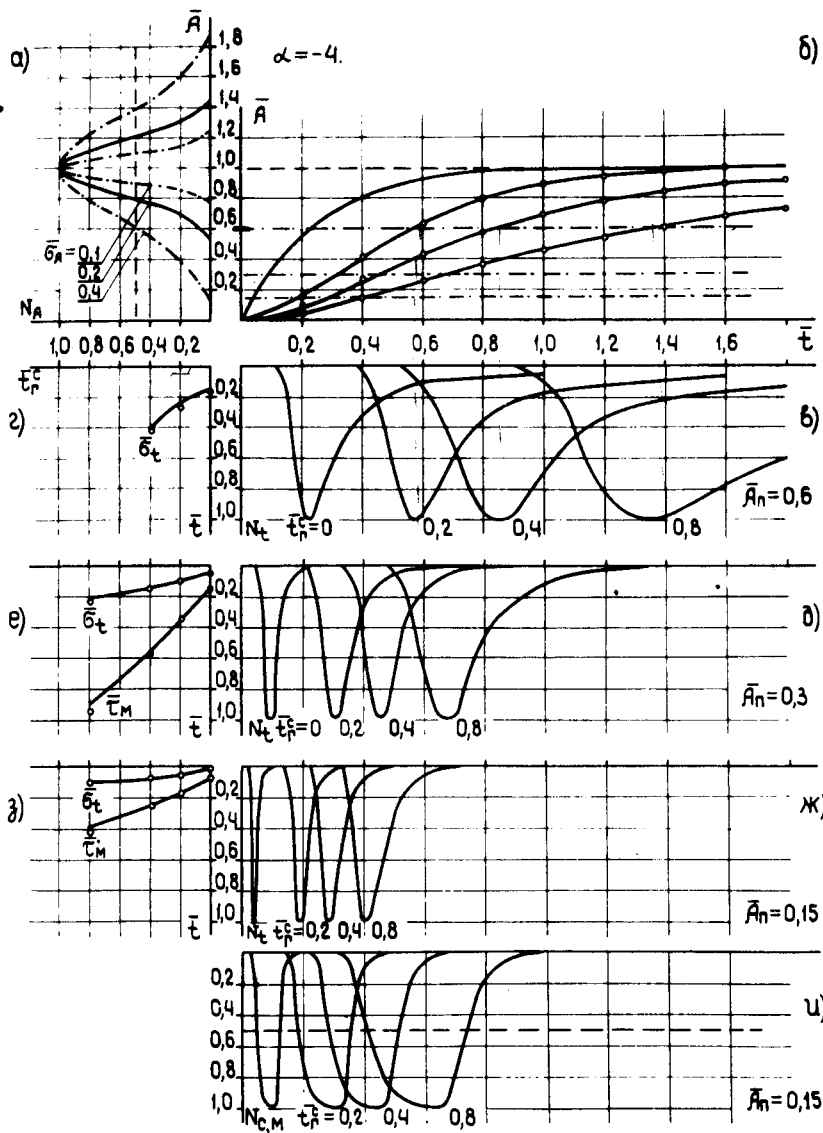


Рис. 2. Зависимости $\bar{A}_n(\bar{t})$, $\bar{\sigma}_t(\bar{t})$, $\bar{\tau}_M(\bar{t})$ от \bar{A}_n и \bar{t}_Γ^C при экспоненциальном фронте входного сигнала.

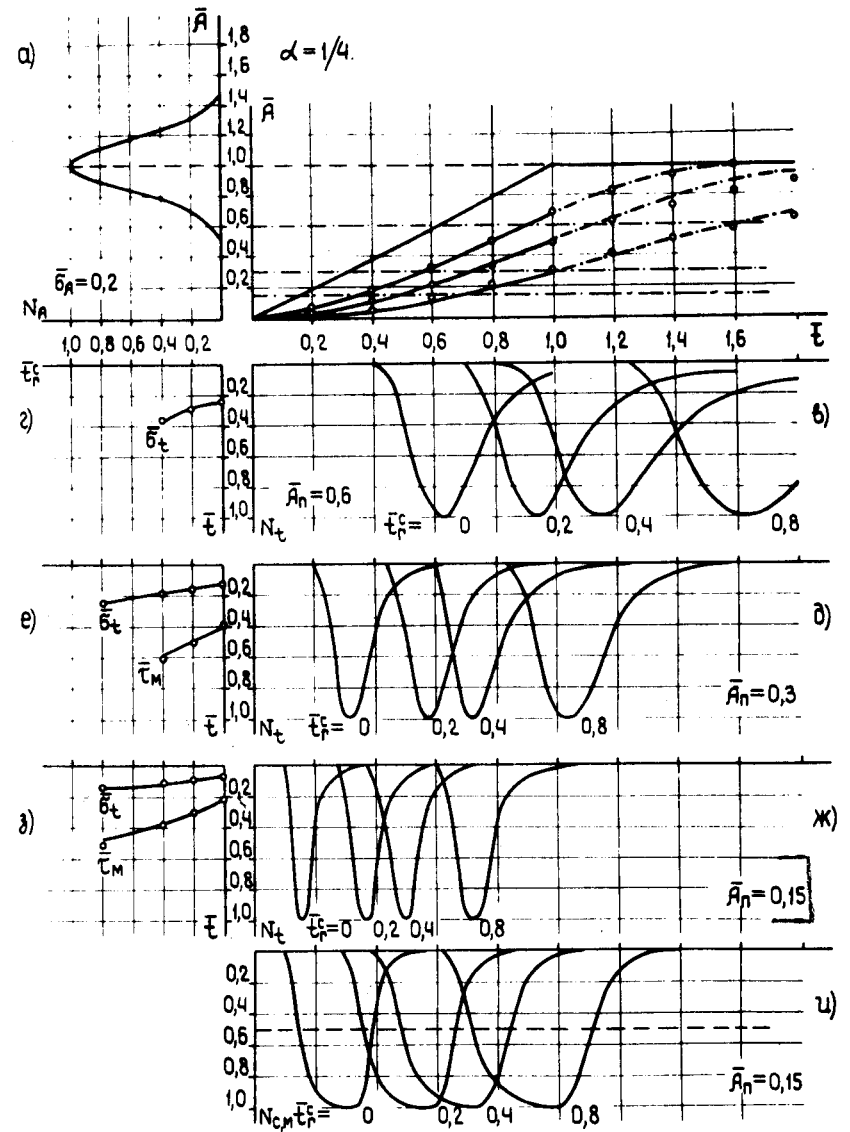


Рис. 3. Зависимости $\bar{A}_n(\bar{t})$, $\bar{\sigma}_t(\bar{t})$, $\bar{\tau}_M(\bar{t})$ от \bar{A}_n и \bar{t}_Γ^C при линейном фронте входного сигнала.

и идеального /не имеющего временного разброса/ каналов регистрации. Очевидно, что эти кривые будут иметь минимальное разрешающее время τ_M . Ход этих "минимальных" кривых совпадений определяется интегралом:

$$N_{C, M} = \int_0^t N_t \cdot dt, \quad /6/$$

а разрешающее время τ_M равно ширине распределения N_t по основанию /на уровне $\sim 0,01$ /. Графики таких "минимальных" кривых задержанных совпадений, полученные путем численного интегрирования кривых временного разрешения на рис. /2-4/ж /для $\bar{A}_{\Pi} = 0,15$ /, показаны, соответственно, на рис. /2-4/и. Характерна несимметрия "минимальных" кривых*. Величины временного разрешения $\bar{\sigma}_t$ и разрешающего времени $\bar{\tau}_M$, найденные из приведенных графиков, построены в виде зависимостей их от \bar{t}_{Γ}^C на рис. /2-4/з, е, в, соответственно, для порогов $\bar{A}_{\Pi} = 0,6; 0,3; 0,15$.

Данный графический метод нахождения $\bar{\sigma}_t$ и $\bar{\tau}_M$ неудобен для практических расчетов, т.к. требует большого количества вычислений. Вычислять же их непосредственно из /3/, /5/ представляется затруднительным, т.к. выражение /3/ не разрешается в простых функциях относительно t . Попытки использовать простейшие приближения, например представление σ_t в виде геометрической /арифметической/ суммы временного разрешения безынерционного дискриминатора σ_t^B и временного разрешения реального дискриминатора от ступенчатых входных перепадов σ_t^C , не дают удовлетворительной точности. Для этой цели можно использовать аппроксимацию выражения /3/ формулой, предложенной в /2/ :

$$A_{\Pi}(t) \approx \frac{A_i}{e^{\alpha} - 1} \cdot \left[\exp\left(\frac{t^2/t_1}{t + k \cdot t_0}\right) - 1 \right], \quad /7/$$

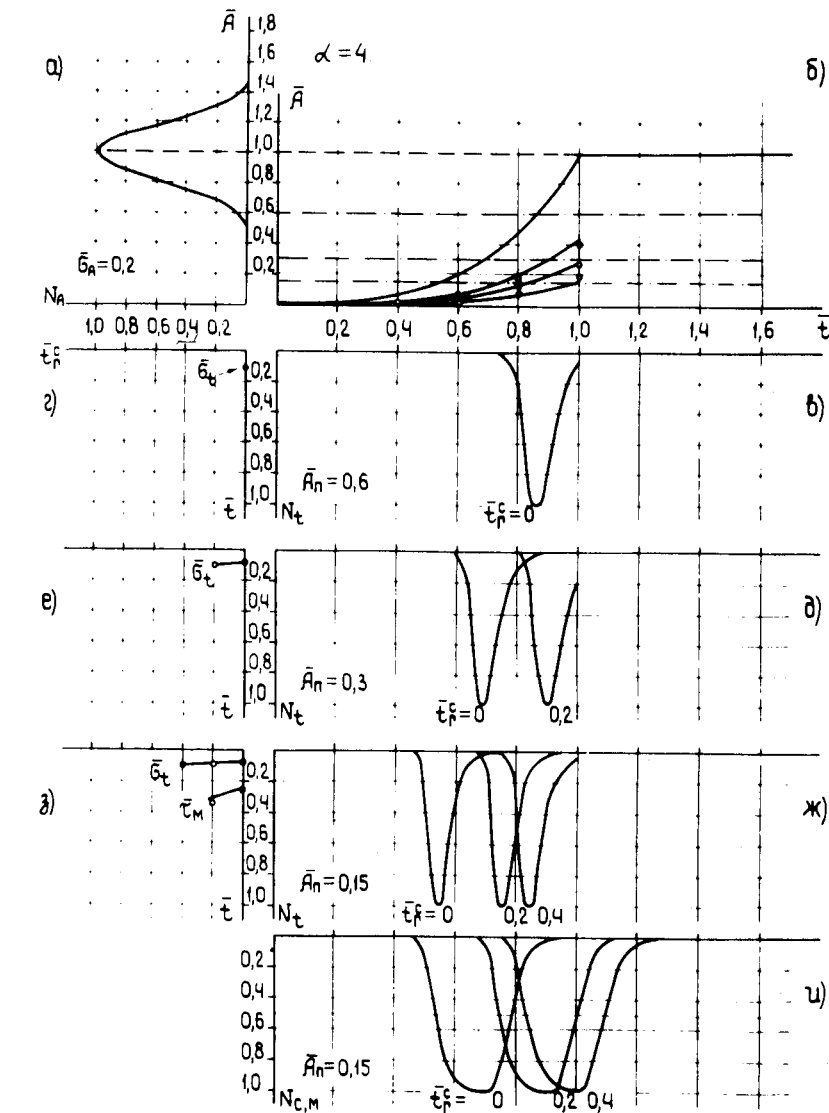


Рис. 4. Зависимости $\bar{A}_{\Pi}(\bar{t})$, $\bar{\sigma}_t$, $\bar{\tau}_M$ от \bar{A}_{Π} и \bar{t}_{Γ}^C при плавно нарастающем фронте входного сигнала.

* Строго говоря, симметричная кривая задержанных совпадений получается лишь для формирователей, имеющих идентичные кривые временного разрешения.

где

$$k = \begin{cases} \frac{50 + 3/a}{35 + (1,5a \cdot \bar{t}_p^c)^{-1}}, & \text{при } a > 0, \\ \frac{5}{3,5 - (1,5a \cdot \bar{t}_p^c)^{-1}}, & \text{при } a < 0, \end{cases}$$

$$\bar{t}_0 = \begin{cases} \bar{t}_1 \cdot \ln(1 + 1,5a \cdot \bar{t}_p^c), & \text{при } a > \frac{-1}{1,5\bar{t}_p^c}, \\ \bar{t}_1 \cdot \ln(1 + \frac{1}{1,5a \cdot \bar{t}_p^c}), & \text{при } a < \frac{-1}{1,5\bar{t}_p^c}, \end{cases}$$

$$\bar{t}_1 = \begin{cases} 1/a, & \text{при } a > \frac{-1}{1,5\bar{t}_p^c}, \\ -1,5\bar{t}_p^c, & \text{при } a < \frac{-1}{1,5\bar{t}_p^c}. \end{cases}$$

Данная аппроксимация достаточно точно описывает зависимость выходного сигнала интегрирующего звена от времени /на рис. /2÷4/6 показана кружками/.

Исходя из /7/, согласно /5/, можно получить следующую формулу для ширины кривой временного разрешения на относительном уровне \bar{h} :

$$\bar{\Delta}_t = \frac{\bar{t}_1}{2} \cdot \left\{ \ln^- \cdot \sqrt{1 + \frac{4k \cdot \bar{t}_0}{\bar{t}_1 \cdot \ln^-}} - \ln^+ \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4k \cdot \bar{t}_0}{\bar{t}_1 \cdot \ln^+}} \right) \right\}, \quad /8/$$

где

$$\ln^\pm = \ln \left[1 + \frac{\bar{A}_{II} (e^a - 1)}{\pm \bar{\sigma}_A \cdot \sqrt{\frac{\ln 1/\bar{h}}{\ln 2}}} \right].$$

Величины $\bar{\sigma}_t / \bar{h} = 0,5/$ и $\bar{\tau}_M / \bar{h} = 0,01/$, найденные по формуле /8/, показаны на рис. /2÷4/2,е,з кружками. Следует подчеркнуть, что выведенные зависимости справедливы только на участке переднего фронта импульса, т.е. когда моменты срабатывания дискриминатора не выходят за границы t_{II} , что выполняется, если

$$\frac{\bar{t}_1}{2} \cdot \ln^- \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4k \cdot \bar{t}_0}{\bar{t}_1 \cdot \ln^-}} \right) < 1. \quad /6/$$

В безынерционном формирователе это условие выполняется для

$\bar{A}_{II} < 1 - \bar{\sigma}_A \cdot \sqrt{\frac{\ln 1/\bar{h}}{\ln 2}}$. В случае увеличения \bar{t}_p^c

формула /8/ применима при меньших порогах. Если порог срабатывания выше данного критического, то для нахождения σ_t и τ_M необходимо учитывать вид зависимости $A_{II}(t)$ в области времен $t > t_{II}$, т.е. форму вершины или даже спада импульса. Отметим, что для $a < 0$ формулой /8/ можно пользоваться без ограничения /9/ для импульсов с плоской вершиной /см. рис. 2 б,е/.

В заключение отметим также, что $\bar{\sigma}_t$ и $\bar{\tau}_M$ связаны приближенным соотношением: $\bar{\tau}_M \approx 3,5\bar{\sigma}_t$.

Приложение 1

Для многих типов детекторов, в которых имеется внутреннее усиление, основанное на статистическом процессе размножения исходного заряда, форма переднего фронта выходного импульса тока близка к Гауссовой

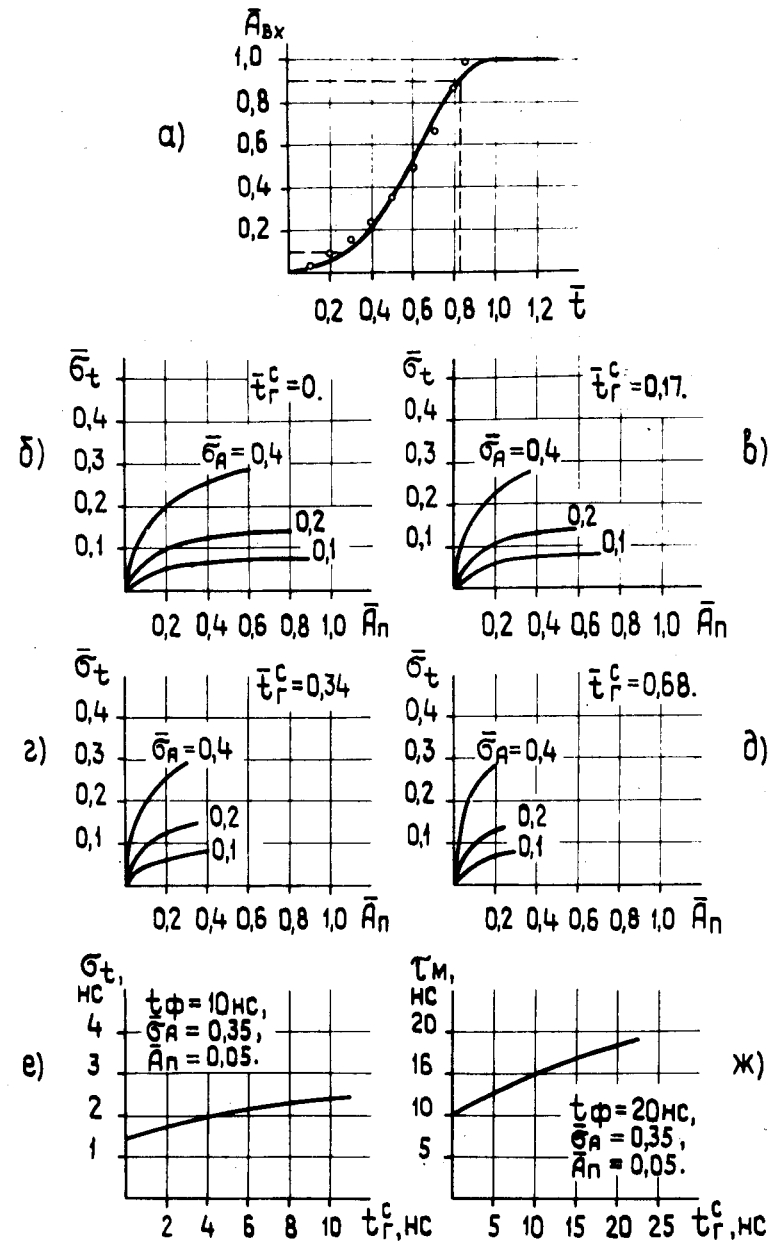
/рис. 5а/. Для таких детекторов /сцинтилляционных счетчиков, пропорциональных, дрейфовых камер/ можно пользоваться аппроксимацией /7/ с параметрами $\alpha = 2$, $(t_n)_{\text{аппр}} = 0,85 (t_n)_{\text{гаусс}} = 1,4 (t_{\phi})_{\text{гаусс}}$. Данная аппроксимация отмечена кружками на рис. 5а. На рис. 5б÷д приведены вычисленные по /8/ графики зависимости $\bar{\sigma}_t = f(\bar{A}_{\text{п}})$ при различных \bar{t}_{Γ}^c . Они позволяют быстро находить величины временного разрешения для наиболее часто встречающихся на практике сигналов с детекторов.

В качестве примера рассмотрим решение двух задач.

1. Оценить количественный вклад инерционности усилителя-формирователя в получаемое временное /пространственное/ разрешение дрейфовых камер / $t_{\phi} \approx 10$ нс, $\bar{\sigma}_A \approx 0,35$ /. Построив на основании данных рис. 5б÷д график зависимости $\sigma_t = f(t_{\Gamma}^c)$ для порога регистрации $A_{\text{п}} = 0,05$ /соответствующего началу плато по эффективности регистрации $\bar{A}_{\text{п}} \approx 1 - 2,6 \bar{\sigma}_A$ /, найдем, что усилитель-формирователь с собственным "гулянием" $3 \div 4$ нс обеспечит пространственное разрешение ~ 100 мкм / $\sigma_t = 2$ нс/, тогда как идеальная схема дает ~ 75 мкм.

2. Оценить вклад инерционности усилителя-формирователя в разрешающее время пропорциональной камеры / $t_{\phi} \approx 20$ нс, $\bar{\sigma}_A \approx 0,35$ /. Из графика, приведенного на рис. 5ж, видим, что при собственном "гулянии" усилителя-формирователя на уровне $20 \div 25$ нс /усилитель с фронтом в линейном режиме $2,2 \tau_{\phi} \approx 70$ нс/ вклад в разрешающее время / ~ 19 нс/ существенно меньше собственного разрешающего времени пропкамеры / ~ 40 нс для проволочек с шагом 2 мм/, вызванного разбросом времени дрейфа исходного заряда.

Рис. 5. Зависимости $\bar{\sigma}_t$ от $\bar{\sigma}_A$, $\bar{A}_{\text{п}}$, \bar{t}_{Γ}^c при форме переднего фронта входного сигнала, описываемой функцией Гаусса, /а÷д/; зависимость временного разрешения формирователя для дрейфовой камеры от величины t_{Γ}^c /е/; зависимость собственного разрешающего времени усилителя-формирователя для пропкамер от величины t_{Γ}^c /ж/.



Приложение 2

Используя эквивалентную схему, легко найти зависимость порога срабатывания реального формирователя от длительности входного импульса прямоугольной формы $t_{\text{ВХ}}$:

$$A_{\text{П}}(t_{\text{ВХ}}) = \frac{A_{\text{П}}}{1 - \exp(-t/1,5t_{\text{Г}}^{\text{с}})} \quad /10/$$

Из /10/, в частности, следует, что отношение разности величин динамического и статического порогов к динамической величине: $[A_{\text{П}}(t_{\text{ВХ}}) - A_{\text{П}}] / A_{\text{П}}(t_{\text{ВХ}})$ увеличивается вдвое при каждом сокращении длительности входного сигнала на величину $t_{\text{Г}}^{\text{с}}$.

Очевидно также, что собственное "гуляние" формирователя можно вычислить на основании измерения $A_{\text{П}}(t_{\text{ВХ}})$:

$$t_{\text{Г}}^{\text{с}} = \frac{-t_{\text{ВХ}}}{1,5 \ln[1 - A_{\text{П}} / A_{\text{П}}(t_{\text{ВХ}})]} \quad /11/$$

В заключение автор выражает признательность Е.А.Силаеву за полезные обсуждения.

Литература

1. Басиладзе С.Г. ОИЯИ, 13-8911, Дубна, 1975.
2. Басиладзе С.Г. ОИЯИ, 13-9942, Дубна, 1976.
3. Бару С.Е. и др. ПТЭ, 1975, №4, с. 105.
4. Басиладзе С.Г. ПТЭ, 1974, №3, с. 99.
5. Басиладзе С.Г., Юдин В.К. ОИЯИ, 13-10016, Дубна, 1976.
6. Басиладзе С.Г. ОИЯИ, 13-5732, Дубна, 1971.
7. Басиладзе С.Г. и др. ОИЯИ, 13-6383, Дубна, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел
1 февраля 1977 года.