

4949 / 2-76

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



С344.38
Б-272

13/xII-76

13 - 9942

С.Г.Басиладзе

РАСЧЕТ

ВЛИЯНИЯ ИНЕРЦИОННОСТИ ПРЕДУСИЛИТЕЛЯ
НА АМПЛИТУДНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ СМЕЩЕНИЯ
ВРЕМЕННОЙ ОТМЕТКИ ФОРМИРОВАТЕЛЯ
ПО ПЕРЕДНЕМУ ФРОНТУ ИМПУЛЬСА

1976

13 - 9942

С.Г.Басиладзе

РАСЧЕТ
ВЛИЯНИЯ ИНЕРЦИОННОСТИ ПРЕДУСИЛИТЕЛЯ
НА АМПЛИТУДНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ СМЕЩЕНИЯ
ВРЕМЕННОЙ ОТМЕТКИ ФОРМИРОВАТЕЛЯ
ПО ПЕРЕДНЕМУ ФРОНТУ ИМПУЛЬСА

Временная привязка к выходным импульсам является одной из главных задач съема информации с различных детекторов экспериментальной ядерной физики. Основная проблема здесь заключена в минимизации временной погрешности, вносимой разбросом амплитуд сигналов с детектора. В схемах временной привязки по переднему фронту есть, как известно, два источника возникновения "гуляния" выходного импульса формирователя при изменении амплитуды входного сигнала. Первым источником "гуляния" является конечная /ненулевая/ длительность переднего фронта входного импульса /рис. 1а/, вторым - инерционность дискриминирующего элемента формирователя /определенная величина энергии, необходимая для его переключения/, вызывающая даже при идеальном ступенчатом фронте входного сигнала /рис. 1б/ сдвиг выходного импульса дискриминатора при изменении амплитуды входного сигнала. Количественно величину "гуляния" t_r принято определять ^{1,2/} как временной сдвиг выходного импульса дискриминатора при изменении амплитуды входного сигнала от $2A_{II}$ до $2\Delta A_{II}$, где A_{II} - величина порога дискриминатора. Ниже величина "гуляния" идеального безынерционного дискриминатора за счет конечного времени нарастания входного сигнала обозначена как t_r^I /рис. 1а/, а величина "гуляния" реального дискриминатора от ступенчатого входного сигнала, называемого далее "собственным", обозначена через t_r^C /рис. 1б/.

К настоящему времени, в связи с повышением требований к чувствительности дискриминаторов, стало обычным использование предусилителей в схемах временной привязки. Если сам дискриминатор можно выполнить

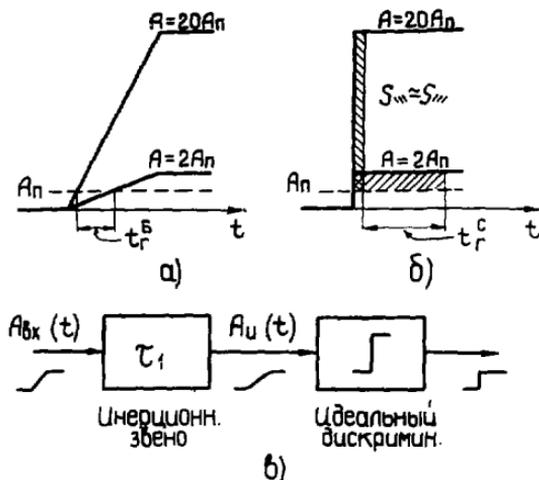


Рис. 1. а/ - иллюстрация "гуляния" безынерционного дискриминатора по переднему фронту выходного сигнала; б/ - образование "собственного гуляния" реального дискриминатора за счет его чувствительности к входному заряду; в/ - структурная схема дискриминатора с интегрирующим звеном на входе.

достаточно быстродействующим, например на туннельном диоде, то предусилители*, как правило, имеют сравнительно ограниченную /на уровне $50 \div 100$ МГц/ полосу пропускания.

Целью настоящей работы является количественное определение влияния инерционности промежуточного интегрирующего звена между детектором и дискриминатором /рис. 1в/ на величину "гуляния" /точность получения временной отметки/. Сам дискриминатор считается идеальным, т.е. безынерционным и имеющим ступенча-

*Для обеспечения стабильности "нуля" их реализуют на интегральных схемах, чаще всего на дифференциальных приемниках схем с эмиттерной связью [3].

тую переключательную характеристику. Подобная постановка задачи является достаточно общей. Интегрирующим звеном кроме предусилителя может быть кабель связи большой длины, связывающий детектор с дискриминатором, в котором происходит затухание фронтов передаваемых импульсов^{4, 5/}. Съем сигнала зачастую производят также с частичным или полным интегрированием импульса тока с детектора.

Формула для переднего фронта сигналов. Импульсы с детекторов могут иметь различную форму переднего фронта. Для нахождения единого, общего решения поставленной задачи целесообразно найти такое аналитическое выражение для формы переднего фронта, которое бы описывало как сигналы с постоянно увеличивающимся темпом роста переднего фронта, сигналы с линейным передним фронтом, так и сигналы с затухающим темпом роста переднего фронта. Наиболее удобно использовать представление переднего фронта сигнала с детектора в виде отрезка экспоненты, а именно:

$$A_{\text{вх}}(t) = \frac{A_i}{e^a - 1} \cdot [e^{at} - 1], \quad /1/$$

где A_i - амплитудное значение входного сигнала; t_H - время нарастания переднего фронта /в пределах от 0 до 100%/; a - коэффициент, определяющий форму переднего фронта /рис. 2/.

Указанное представление является достаточно гибким. Так, если $a = 1/4$ /используется начальный участок экспоненты/, то передний фронт близок к линейной функции времени /рис. 2/; если $a = -4$, то формула /1/ описывает с достаточной степенью точности экспоненциальный входной сигнал, причем постоянная времени $t_{\text{вх}} = t_H/4$; ; если $a \rightarrow -\infty$, то имеем ступенчатый входной импульс и, наконец, при $a > 1$ формула /1/ описывает сигналы с увеличивающимся темпом роста переднего фронта /рис. 2/.

Общее решение. Дифференциальное уравнение, связывающее величину выходного сигнала интегрирующего

звена $A_{и}(t)$ с величиной входного сигнала, как известно, имеет вид

$$\tau_1 \frac{dA_{и}(t)}{dt} = A_{вх}(t) - A_{и}(t). \quad /2/$$

Решая это уравнение ^{/6/}, при начальных условиях $A_{и} = 0$ при $t=0$ получим

$$A_{и}(t) = \frac{A_i}{e^{\alpha} - 1} \cdot \left[\frac{t_{и}}{t_{и} + \alpha \cdot \tau_1} \cdot e^{\frac{\alpha \cdot t}{t_{и}}} + \frac{\alpha \cdot \tau_1}{t_{и} + \alpha \cdot \tau_1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1} - 1} \right]. \quad /3/$$

Формула /3/ дает общее решение задачи. Например, для безынерционного дискриминатора $\tau_1 = 0$ она обращается в /1/. Момент срабатывания такого дискриминатора с порогом $A_{и}$ равен

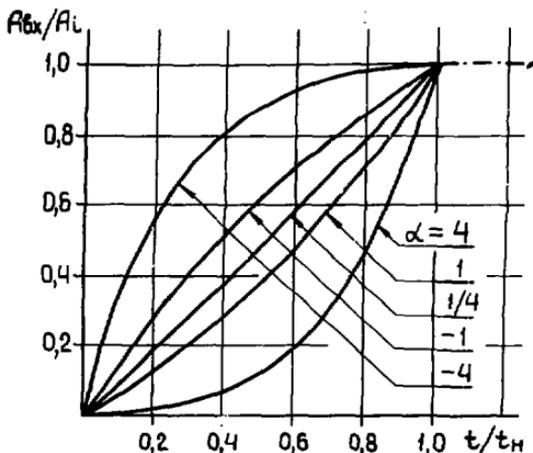


Рис. 2. Графики зависимости формы переднего фронта входного сигнала от величины α , к формуле /1/.

$$t_B = \frac{t_H}{a} \cdot \ln \left[\frac{A_H}{A_i} \cdot (e^a - 1) + 1 \right], \quad /4/$$

откуда нетрудно найти формулу для величины его "гу-ляния"

$$t_{\Gamma}^B = \frac{t_H}{a} \cdot \ln \left[10 \frac{e^a + 1}{e^a + 19} \right]. \quad /5/$$

Для дискриминатора, имеющего интегрирующее звено, при ступенчатом входном сигнале из формулы /3/ имеем

$$\Lambda_H = A_i \cdot \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_H}} \right]. \quad /6/$$

Найдя из /6/ момент срабатывания дискриминатора по-добно /4/, получаем следующее выражение для величины "собственного нуляния":

$$t_{\Gamma}^C = \tau_H \cdot \left(\ln \frac{19}{20} - \ln \frac{1}{2} \right) = 0,65 \tau_H. \quad /7/$$

Аппроксимации для $t = f(\tau_H, a, t_H)$. Получение общего выражения для $t_{\Gamma} = f(\tau, a, t_H)$ непосредственно из формулы /3/ затруднительно, т.к. она не разрешается в простых функциях относительно t . Попробуем найти аппроксимацию для $\Lambda_H(t)$ в виде, представленном одной экспонентой. Введем для удобства обозначений новые переменные: $\kappa = t_H / a \tau_H$, $\tilde{t} = t / \tau_H$. Тогда /3/ можно представить в виде

$$\Lambda_H = \frac{A_i}{e^a - 1} \cdot [y(\kappa, \tilde{t}) - 1], \quad /8a/$$

где

$$y(\kappa, \tilde{t}) = y_1 + y_2 = \frac{\kappa}{1 + \kappa} e^{\frac{\tilde{t}}{\kappa}} + \frac{1}{1 + \kappa} e^{-\tilde{t}}. \quad /8б/$$

Будем искать аппроксимацию для $y(\kappa, \tilde{t})$ отдельно для $\kappa > 0$ ($a > 0$) и для $\kappa < 0$ ($a < 0$).

1. Из анализа $y(\kappa, \bar{t})$ для $\kappa > 0$ видно, что при $\bar{t} \rightarrow \infty$ $y_2 \rightarrow 0$, поэтому асимптотой для $y(\kappa, \bar{t})$ является y_1 . Ход графиков зависимости $\ln y$ /рис. 3/ позволяет предположить, что аппроксимацию $\ln y$ можно представить в виде:

$$\ln y \approx \ln \frac{\kappa}{1 + \kappa} + \frac{\bar{t}}{\kappa} + \frac{1}{a\bar{t} + b} + \frac{c}{b}. \quad /9/$$

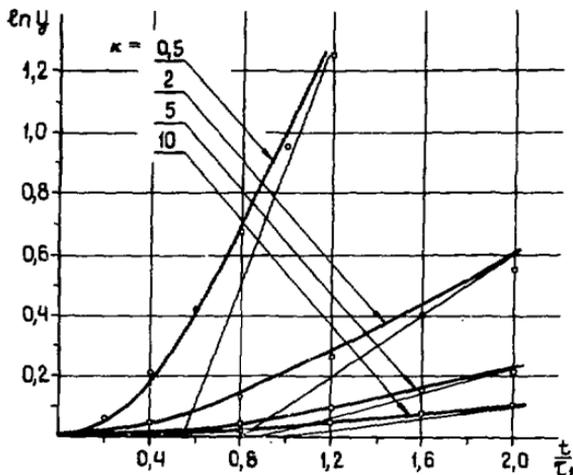


Рис. 3. График зависимости показателя степени аппроксимирующей экспоненты, κ формуле /3/, от величины \bar{t} при различных $\kappa > 0$.

Выражение /9/ есть сумма прямой, асимптоты $\ln y$, и гиперболы, параметры a, b, c которой можно найти из нижеследующих условий.

1/ При $\bar{t} = 0$ $\ln y = 0$, откуда

$$\frac{1 + c}{b} = \ln \frac{1 + \kappa}{\kappa}. \quad /10a/$$

2/ При $\tilde{t} = 0$ $\frac{d(\ln y)}{dt} = 0$, откуда

$$\frac{a}{b^2} = \frac{1}{\kappa}. \quad /10Б/$$

3/ Из графиков /рис. 3/ видно, что $\ln y$ становится близким к асимптоте при $\tilde{t} \approx 2\tilde{t}_0$, где \tilde{t}_0 — есть координата пересечения асимптотой оси абсцисс: $\tilde{t}_0 = \kappa \cdot \ln[(1+\kappa)/\kappa]$.

Условие обращения в нуль гиперболы при $\tilde{t} \approx 2\tilde{t}_0$ дает

$$\frac{1}{2b^2 \frac{1+c}{b} + b} + \frac{c}{b} = 0. \quad /10В/$$

Решая данное уравнение, получим $c = -1/2$. Найдя из /10А/ и /10Б/ величины a и b и подставив их в /9/, будем иметь

$$\ln y \approx \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{\tilde{t}^2}{\tilde{t} + \kappa \cdot \tilde{t}_0}. \quad /11/$$

Коэффициент $k=2$ для рассматриваемого нами случая ($\kappa > 0$). Значения аппроксимация для $\ln y$, получаемые из /11/, отмечены на рис. 3 кружками. Полная формула будет иметь вид

$$A_{и} \approx \frac{A_i}{e^\alpha - 1} \cdot \left[\exp\left(\frac{\alpha}{t_H} \cdot \frac{t^2}{t + k \cdot t_0} - 1\right) \right], \quad /12/$$

О степени точности данной аппроксимации можно судить по рис. 4, где по формуле /3/ построены графики зависимости $A_{и}(t)$ для различных величин r_1 в случае линейного переднего фронта входного сигнала. Разрешая /12/ относительно t , нетрудно найти, что момент срабатывания дискриминатора составляет

$$t_{cp} \approx \frac{1}{2} t_B \cdot (1 + \sqrt{1 + 4k \cdot t_0 / t_B}), \quad /13/$$

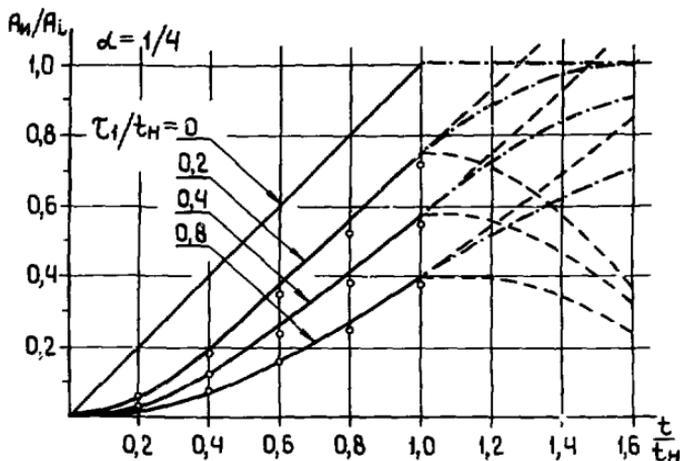


Рис. 4. Передний фронт сигнала на выходе интегрирующего звена /для линейного фронта входного сигнала/ при различных величинах τ_1 . Крестиками отмечены данные, полученные по аппроксимации /12/.

и, соответственно, формула для величины "гуляния" будет иметь вид

$$t_r = \frac{1}{2} [t_{r1}^2 + t_{B2}^2 \sqrt{1 + 4k \cdot t_0 / t_{B2}} - t_{B20}^2 \sqrt{1 + 4k t_0 / t_{B20}}] \quad /14/$$

Здесь t_{B2} и t_{B20} - моменты срабатывания безынерционного дискриминатора, соответственно, при двойном ($A_i/A_n = 2$) и двадцатикратном превышении входного сигнала над порогом.

Формула /14/ справедлива при $t_{B2} \leq t_n$, т.е. когда постоянная интегрирования не настолько велика, чтобы к моменту окончания переднего фронта входного сигнала импульс на выходе инерционного звена успевал нарасти до половины своего установившегося значения.

В противном случае необходимо учитывать поведение входного сигнала при $t > t_H$, т.е. имеет ли импульс плоскую вершину /на рис. 4 показано штрих-пунктиром/, либо сразу начинается его спад. Подобный учет осуществляется "включением" дополнительного генератора отрицательного сигнала в момент времени $t - t_H$ /на рис. 4 показано пунктиром/ и суперпозицией сигналов реакций интегрирующего звена на оба генератора /штрих-пунктир на рис. 4/.

2а. Рассмотрим теперь случай $0 > \kappa > -1$. При $t \rightarrow \infty$ y_1 и y_2 стремятся к нулю. Однако y_1 убывает быстрее, следовательно, асимптотой для $y(\kappa, t)$ служит y_2 . Представим аппроксимацию $\ln y$ /рис. 5/ так же, как и в первом случае, суммой прямой /асимптоты/ и гиперболы, коэффициенты a, b, c которой необходимо подобрать. Условия 1/ и 2/ для нахождения коэффициентов остаются та-

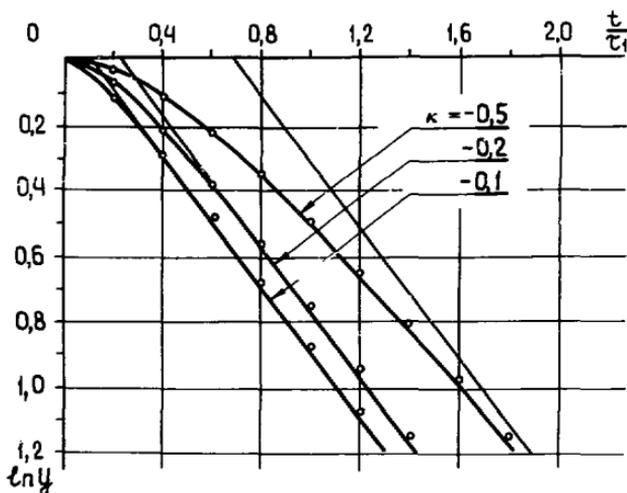


Рис. 5. График зависимости показателя степени аппроксимирующей экспоненты /3/ от времени при различных $-1 < \kappa < 0$.

кими же; в третьем условии, в соответствии с графиками поведения $\ln y$ /рис. 5/, потребуем, чтобы гипербола обращалась в нуль при $\bar{t} = 3\bar{t}'_0$, что дает $\kappa = -1/3$. В результате получим

$$\ln y \approx - \frac{1}{r_1} \cdot \frac{t^2}{t + 1,5t'_0}, \quad /15/$$

где $t'_0 = r_1 \cdot \ln[1/(1-\kappa)]$. Значения аппроксимации для $\ln y$, получаемые из формулы /15/, отмечены на рис. 5 кружками. Полная формула будет иметь вид

$$A_{и} = \frac{A_i}{1 - e^{-|a|}} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{r_1} \cdot \frac{t^2}{t + 1,5t'_0}\right)\right). \quad /16/$$

О степени точности данной аппроксимации можно судить по рис. 6, где по формуле /3/ построены графики зави-

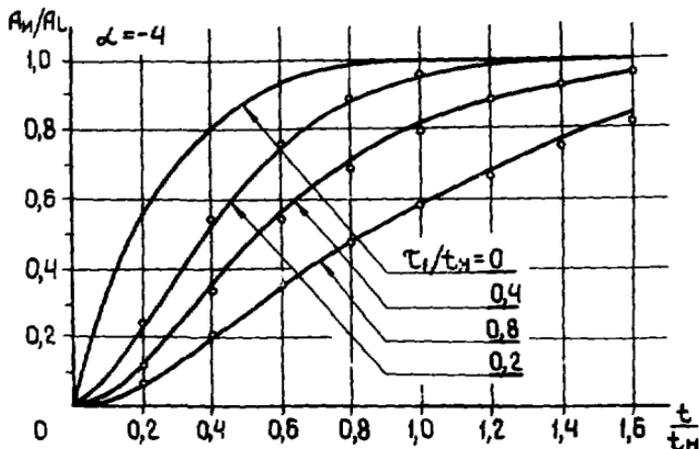


Рис. 6. Передний фронт сигнала на выходе интегрирующего звена /для экспоненциального фронта входного сигнала/ при различных величинах r_1 . Кружками отмечены данные, полученные по аппроксимациям /16/ и /12/.

симости $A_{II}(t)$ для величин r_1 , равных $0,4t_{II}$ и $0,8t_{II}$, в случае экспоненциального переднего фронта. Разрешив /16/ относительно t , найдем момент срабатывания дискриминатора

$$t'_{cp} = \frac{t_B}{2k} \cdot (1 + \sqrt{1 + 6k t'_0 / t_1}) \quad /17/$$

Отсюда легко можно получить формулу для "гуляния", по аналогии с /14/.

26. В случае $k \ll 1$ /малая величина r_1 / асимптотой для $y(\kappa, t)$ снова становится y_1 . Повторив дважды описанные выше операции по подбору коэффициентов a, b, c , получим формулы, эквивалентные /11/, /12/, /13/, /14/ с той лишь разницей, что $k=1$. Данный случай представлен графиком на рис. 6, где $r_1/t_{II} = 0,2$.

Поскольку при $a \leq -4$ передний фронт входного сигнала плавно переходит в вершину импульса, то для импульсов с плоской вершиной можно использовать формулы /15/ ÷ /17/ и для $t \sim t_{II}$ /см. рис. 6/. Применительно к расчету величины "гуляния" это означает, что ограничение на величину r_1 , отсутствует, как в случае с линейным фронтом.

Заключение

Полученные формулы позволяют найти величину "гуляния" дискриминатора, имеющего инерционную входную цепь. Для практических оценок интересно еще выявить связь t_r с t_r^B и t_r^C . В работе /2/ указано, что "гуляние" дискриминатора должно находиться в границах, задаваемых арифметической и геометрической суммами величин "гуляния" безынерционного дискриминатора и "собственного гуляния" дискриминатора. На рис. 7 приведены графики зависимости "гуляния" от величины отношения r_1/t_{II} для двух частных случаев: экспоненциального /а/ и линейного /б/ фронтов входного сигнала. Пунктирной линией /треугольниками/ отмечена геометрическая сумма t_r^B и t_r^C , а штрих-пунктиром /кружками/ - арифметическая. Как видим, при экспоненциальном фронте

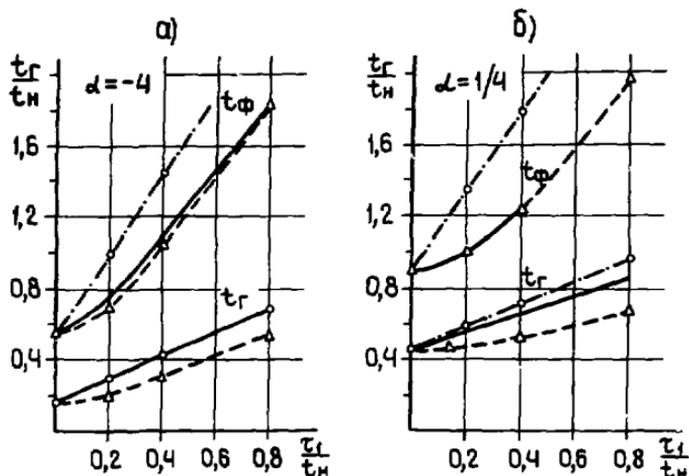


Рис. 7. Зависимости "гуляния" дискриминатора и времени фронта нарастания сигнала на выходе интегрирующего звена от величины τ_1 в случаях а/ экспоненциального б/ линейного фронтов входного сигнала. Пунктиром и штрих-пунктиром показаны соответственно геометрические и арифметические суммы t_{Γ}^B и t_{Γ}^C ; t_{Φ}^{BX} и t_{Φ}^C .

величина "гуляния" практически совпадает с арифметической суммой:

$$t_{\Gamma} \approx t_{\Gamma}^B + t_{\Gamma}^C = t_{\Gamma}^B + 0,65\tau_1. \quad /18/$$

Для линейного фронта оно также существенно ближе к арифметической сумме, нежели к геометрической.

Формула /18/ выявляет существенное различие между величиной "гуляния" и временем фронта нарастания сигнала на выходе инерционного звена. Поскольку время фронта нарастания определяется геометрической суммой времени фронта нарастания входного сигнала и собственного времени фронта /7/, а именно

$$t_{\Phi} = \sqrt{(t_{\Phi}^{BX})^2 + (t_{\Phi}^C)^2} = \sqrt{(t_{\Phi}^{BX})^2 + (2,2\tau_1)^2}, \quad /19/$$

то влияние величины r_1 на t_Φ существенно меньше, чем на t_Γ .

Используем формулу /19/ для проверки правильности проведенных расчетов. На рис. 7 приведены графики зависимости t_Φ от величины r_1/t_{II} , построенные на основании выведенных выше формул. Пунктиром и штрихпунктиром показаны соответственно геометрические и арифметические суммы t_Φ^{BX} и t_Φ^C . Как видим, рассчитанные величины t_Φ практически совпадают с геометрической суммой.

Литература

1. C. Engster, J. C. Tarle, H. Verweij. CEKI. Report 73-15, 9 Oct., 1973.
2. С. Г. Басиладзе. Сообщение ОИЯИ, 13-8911, Дубна, 1975.
1. С. Г. Басиладзе. Сообщение ОИЯИ, 13-9744, Дубна, 1976.
4. С. В. Медведь, Ю. Н. Симонов. Сообщение ОИЯИ, 13-3645, Дубна, 1967.
5. С. В. Медведь, Ю. Н. Симонов. Сообщение ОИЯИ, 13-3646, Дубна, 1967.
6. М. Я. Выгодский. Справочник по высшей математике, Наука, М., 1975, стр. 715.
7. К. Э. Эрглис, И. П. Степаненко. Электронные усилители, Физматгиз, М., 1961, стр. 86.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 июля 1976 года.