ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

IFVE - OEIUNK - 91-135

ИФВЭ 91-135
ОЭИУНК

Р.Н.Краснокутский, Л.Л.Курчанинов,
В.В.Сушков, Р.С.Шувалов

БЫСТРЫЙ МАЛОШУМЯЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ С МАЛЫМ ВХОДНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Направлено в *ПТЭ*

Протвино 1991

УДК 539.1.075 М–24

Аннотация

Крапошукский Р.Н. и др. Быстрый малошумящий усилитель с малым входным сопротивлением: Препринт ИФВЭ 91-135. – Протвино, 1991. – 6 с., 4 рис., библиогр.: 5.

Исследован быстродействующий малошумящий предусилитель, используемый для получения короткого отклика в случае, если детектор в измерительном тракте можно описать емкостным импедансом при величине емкости 100-1000 пФ.

Abstract

Krasnokutsky R.N. et al. Fast Low-noise Preamplifier with Low Input Impedance: IHEP Preprint 91-135. Protvino, 1991. p. 6, figs. 4, refs.: 5.

The study of the low-noise preamplifier, which could be utilized to obtain short-duration response in the case when the detector in measurement circuit could be described by the capacitance of 100-1000 pF magnitude, is presented

© Институт физики высоких энергий, 1991

Введение

В последние годы в связи со строительством и проектированием ускорителей нового поколения (УНК, SSC, LHC) резко возросли требования к быстродействию (скорость счета $3 \cdot 10^7$ частиц/с) измерительного тракта, в первую очередь детектора и предусилителя (ПУ). Независимо от принципа работы детектора длительность сигнала на входе ПУ не может быть короче той, что задает затухающая экспонента $exp(-t/R_{in}C_d)$, где R_{in} входное сопротивление усилителя, C_d - емкость детектора. Эта емкость может составлять 100-1000 пФ. Короткий импульс на выходе формирующего усилителя можно получить следующим образом: 1) уменьшая R_{in}; 2) применяя цепи компенсации полюса нулем (КПН); 3) используя совместно решения 1) и 2). В настоящей работе использован первый вариант.

Принципиальная схема и результаты исследований макета

Известно, что уменьшить R_{in} можно, вводя после головного элемента усилитель тока и охватив оба каскада общей обратной связью. Чтобы входное сопротивление было чисто резистивным, импедансы цепи обратной связи и нагрузки должны удовлетворять соотношению (см., например, обзор[1] и приведенные там ссылки на литературу)

$$R_f C_f = R_L C_L, \tag{1}$$

где индексы f относятся к обратной связи, L - к нагрузке.

Величина входного сопротивления может быть вычислена по формуле

$$R_{in} = i_e r_e / i_f = (R_f + R_L)/(g_{m1} A R_L), \qquad (2)$$

где $r_e = 1/g_m = \phi_t / I_e$, I_e – постоянный ток эмиттера головного транзистора, A – коэффициент усиления "внутреннего" усилителя по току, i_f – сигнальный ток в цепи обратной связи, ϕ_t – термический потенциал. Из приведенной формулы видно, что реализовать малое R_{in} затруднительно, так как если увеличивать A, неизбежно возникнут проблемы с устойчивостью, а значительное уменьшение R_f приводит к увеличению шума. Уменьшать отношение R_f/R_L бессмысленно, так как оно определяет коэффициент усиления ПУ в целом.

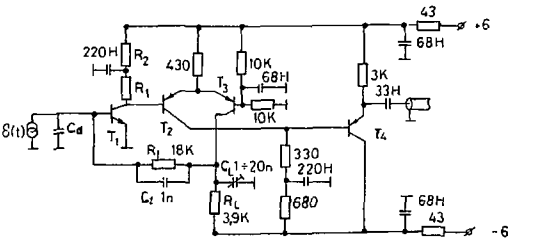

Рис. 1. Принципиальная схема предусилителя. Транзисторы: T_1 – КТ399; T_2, T_3 – КТ3123; T_4 – КТ363. Нагрузка коллектора головного транзистора для разных режимов имеет следующие значения: 1) при токе коллектора T_1, равном 3,3 mA, R_1=100 Ом, R_2 = 680 Ом; 2) при токе коллектора T_1, равном 9,4 mA, R_1=51 Ом, R_2 = 200 Ом.

Требование получить короткий сигнал на выходе ПУ и его устойчивости автоматически означает, что необходимо использовать СВЧ-транзисторы, а если при этом нужен еще и малый уровень шума, то среди отечественных биполярных транзисторов на роль головного элемента ПУ могут претендовать лишь два типа: КТ399 и КТ640[2]. Однако у последнего наблюдается больший разброс по величине β, поэтому для массового

производства более пригоден первый, хотя граничная частота f_T у него меньше.

Принципиальная схема ПУ приведена на рис.1. Внутренний усилитель есть пара эмиттерно связанных транзисторов T_2 и T_3. Выходной повторитель на T_4 включен в коллекторную цепь T_3, так что в общую точку R_LC_L и R_fC_f не вносится ничего лишнего (кроме паразитной емкости монтажа и емкости коллектор-база T_3), чтобы проще можно было удовлетворить условию (1). Сопротивления R_1 и R_2 задают ток через T_1 и, если необходимо, изменяются так, чтобы сохранялось $R_1 + R_2$.

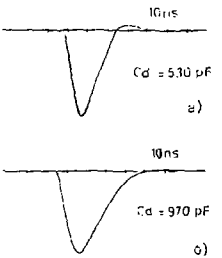

Рис. 2. Осциллограммы выходных сигналов при разной величине емкости детектора C_d.

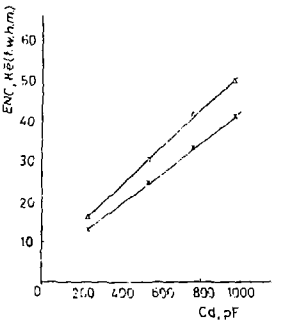

Рис. 3. Зависимость эквивалентного шумового заряда (ENC) от емкости детектора C_d. Величина ENC выражена в единицах полной ширины на половине основания (fwhm). Треугольники соответствуют току коллектора T_1, равному 3,3 мА, кресты - 9,4 мА.

Осциллограммы выходных сигналов для C_d = 530 и 970 пФ показаны на рис.2а и 2б. Если условие (1) не соблюдается, то на осциллограммах видны колебания. Входной сигнал - токовая δ-функция. На рис.3 приведена зависимость эквивалентного шумового заряда ENC от емкости

детектора при токах через T_1, равных 3.3 и 9.4 mA. При измерении ENC выходной сигнал ПЧ усиливался быстрым усилителем со значительно более короткой импульсной характеристикой, чем отклики ПЧ, приведенные на рис.2. Из рис.3 видно, что величина ENC достаточно мала и согласуется с простой оценкой

$$ENC = (2.35\ e/2q_o)\sqrt{kT}\left[\frac{2r_{bb}C_d^2}{\tau_m} + \frac{(C_d + C_b)^2}{g_m\tau_m}\right]^{\frac{1}{2}}, \qquad (3)$$

где $C_b = 1/2\pi r_b f_T$, q_o – заряд электрона, значение длительности формировки τ_m задано из аппроксимации отклика предусилителя импульсной характеристикой формирователя RC-CR-типа. Значения ENC, получаемые из формулы (3), даны в ширине на половине основания функции распределения (fwhm), размерность – количество электронов. При оценке ENC по формуле (3) мы пренебрегаем параллельным шумом, что обосновано для коротких формировок при значительной (100-1000 пФ) величине емкости детектора (см.[2] и [3]). Оценка (3) даст ENC=43,5·10^3 q_o, при C_d = 970 пФ, а измеренное значение – ENC = 42,5·10^3 q_o.

Входное сопротивление, найденное из измерений постоянной времени затухания отклика при больших C_d, равно 9,5 Ом и близко к расчетной величине

$$R_{in} = \frac{(R_f + R_L)(g_{m2} + g_{m3})}{R_L R_1 g_{m1} g_{m2} g_{m3}} = 8\ Ом \qquad (4)$$

при токе коллектора головного транзистора 9,4 mA и R_1 = 51 Ом. Расчетное значение R_{in}, найденное из выражения (4), оказывается заниженным из-за того, что измеренная крутизна транзисторов типа КТ3123, используемых в качестве T_2 и T_3, на 30% меньше того значения g_m, которое задается термическим потенциалом и режимом.

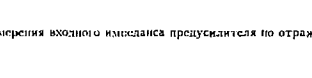

Рис. 4. Схема измерения входного импеданса предусилителя по отражениям в длинную линию.

Однако метод измерений по времени затухания позволяет правильно определить R_{in} лишь на низких частотах. Такая оценка не годится для частот $\omega \simeq \tau_{\phi}^{-1}$ (τ_{ϕ} — время нарастания фронта выходного сигнала). Поэтому для частот $\omega \simeq \tau_{\delta}^{-1}$ мы определили входное сопротивление следующим способом. На вход длинной линии с волновым сопротивлением 50 Ом через емкость $\cong 1$ пФ подавался перепад напряжений (эквивалент токовой δ-функции на дальнем от усилителя конце линии на рис.4) и наблюдался отклик прямого и многократно отраженных от входа ПУ и назад от источника токовой δ-функции в линию сигналов. По величине и форме отраженных сигналов можно определить активную часть входного импеданса (R_{in} = 11,5 Ом) и индуктивность реактивной части. Из-за наличия реактивной индуктивной составляющей во входном импедансе ПУ его нельзя согласовать с длинной линией во всем спектральном интервале, включающем его полосу пропускания.

Заключение

Исследован малошумящий предусилитель, разработанный для использования в измерительном тракте с детекторами большой емкости для работы при высоких загрузках. Схема позволяет осуществлять простую настройку длительности отклика при заданной величине емкости детектора. Значение эквивалентного шумового заряда ПУ определяется последовательным шумом головного транзистора и может оцениваться формулой (3). Величина активной части входного импеданса ПУ определяется выражением (4), что удовлетворительно согласуется с результатами измерений. При корректном применении в измерительном тракте, использующем ПУ при высоких скоростях счета, детектор должен быть представлен сосредоточенной емкостью. Если детектор — цепь с распределенными параметрами (см.[1,5]), то неизбежные отражения затянут отклик.

Список литературы

[1] Краснокутский Р.Н., Курчанинов Л.Л., Федякин Н.Н. и др. // ЭЧАЯ. 1991. Т.22. Вып.1. С.268.

[2] Краснокутский Р.Н., Курчанинов Л.Л., Тихонов В.В. и др. Препринт ИФВЭ 88-116. - Серпухов, 1988.

[3] Gatti E., Manfredi P.F. // La Rivista del Nuovo Cimento. 1986. V.9. P.1

[4] Краснокутский Р.Н., Сушков В.В., Федякин Н.Н. и др. Препринт ИФВЭ 91-48. - Протвино, 1991.

[5] Краснокутский Р.Н., Курчанинов Л.Л., Петухов Ю.П. и др. Препринт ИФВЭ 91-16. - Протвино, 1991.

Рукопись поступила 12 сентября 1991 года.

Краснокутский Р.Н. и др.
Быстрый малошумящий усилитель с малым входным сопротивлением.

Редактор В.В.Гергейн. Технический редактор Л.П.Тимкина.

Подписано к печати 9.10.1991 г. Формат 60 x 90/16.
Офсетная печать. Печ.л. 0,38. Уч.-изд л. 0,50. Тираж 260.
Заказ 535. Индекс 3649. Цена 7 коп.

Институт физики высоких энергий, 142284, Протвино Московской обл.

7 коп. Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 91-135, ИФВЭ, 1991