

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСИМПЕДАНСНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ. ЧАСТЬ 2

БОННИ БЕЙКЕР (BONNIE BAKER), Maxim Integrated

В предыдущей части этой статьи [1] рассматривалась АЧХ сигналов, которая дает начальное представление о частотной характеристике сигналов переменного тока. Но только одной АЧХ недостаточно – требуется обеспечить стабильную работу схемы трансимпедансного усилителя (ТИУ) (см. рис. 1).

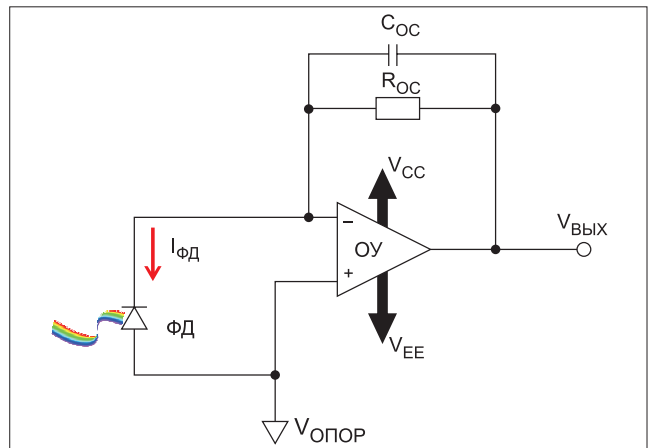


Рис. 1. Стандартная высокочастотная схема ТИУ без паразитных емкостей

Понятно, что это схема позволяет преобразовать падающий свет в ток, но стабильность усилителя с выходным сигналом напряжения определяется в области напряжения. Схема на рисунке 1 может работать нестабильно, но мы можем понять основные причины такой неустойчивости ТИУ. Они заключаются в паразитных компонентах усилителя и цепи обратной связи.

ПАЗАРИТНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ТИУ И ЦЕПИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

В схеме на рисунке 2 имеются четыре паразитных емкости: $C_{РОС}$, $C_{СИНФ+}$, $C_{СИНФ-}$ и $C_{ДИФФ}$.

Паразитными емкостями усилителя являются $C_{СИНФ+}$, $C_{СИНФ-}$ и $C_{ДИФФ}$. $C_{СИНФ+}$, $C_{СИНФ-}$ – входные синфазные емкости усилителя. Поскольку емкость $C_{СИНФ+}$ смещена относительно заземляющего соединения с фактическим заземлением усилителя, мы будем пользоваться только обозначением $C_{СИНФ}$. В силу того, что емкость $C_{ДИФФ}$ параллельна $C_{СИНФ}$, входная емкость усилителя $C_{УСИЛ}$ равна их сумме: $C_{СИНФ} + C_{ДИФФ}$.

В верхней части рисунка 2 показана паразитная емкость $C_{РОС}$, состоящая из емкости дискретного резистора обратной связи R_{OC} и паразитной емкости проводников печатной платы. Как правило, суммарное значение всех этих паразитных емкостей не превышает нескольких пФ. С помощью хорошо продуманной топологии можно уменьшить их до значения ниже 1 пФ. Не следует пренебрегать этими емкостями до расчета емкости обратной связи C_{OC} . На рисунке 2 приняты следующие обозначения:

- C_{OC} – емкость обратной связи ТИУ;
- R_{OC} – резистор обратной связи ТИУ;
- $C_{РОС}$ – паразитная емкость резистора обратной связи ТИУ;
- $C_{СИНФ-}$, $C_{СИНФ+}$ – синфазная емкость ТИУ;
- $C_{ДИФФ}$ – дифференциальная емкость ТИУ;
- $K_{УРК}(j\omega)$ – коэффициент усиления разомкнутого контура;
- $V_{OUT} - V_{ВЫХ}$.

При этом: $C_{СИНФ-} = C_{СИНФ}$ а $C_{УСИЛ} = C_{СИНФ} + C_{ДИФФ}$.

Заметим, что емкость усилителя параллельна фотодиоду. Если у него имеется некоторая паразитная емкость, с ней скла-

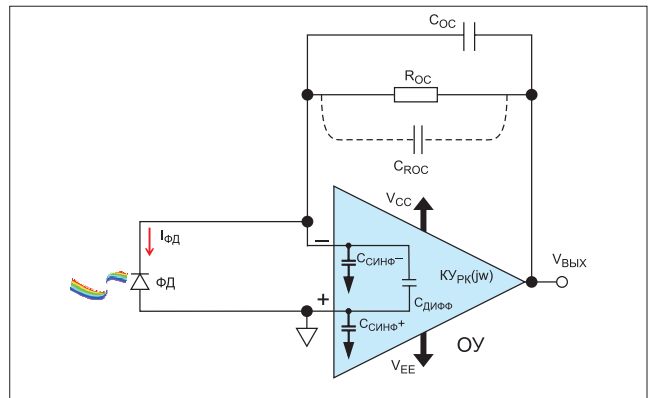


Рис. 2. Паразитные емкости схемы усилителя

дываются емкости усилителя. Чуть позже мы увидим, как это обстоятельство влияет на стабильность схемы.

ПАЗАРИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ФОТОДИОДА

Фотодиод принимает световой сигнал. В рассматриваемой схеме падающий на фотодиод свет способствует появлению

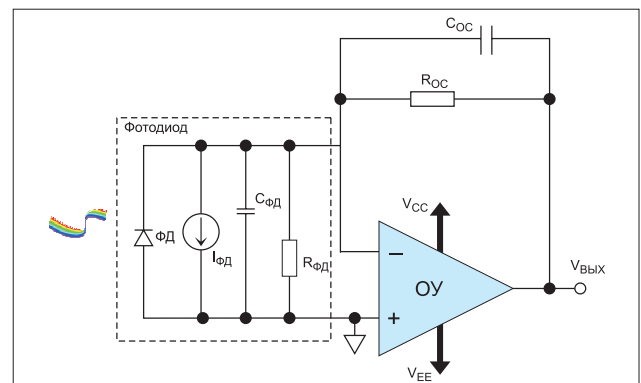


Рис. 3. Паразитные элементы фотодиода: емкость перехода ($C_{ФД}$) и сопротивление перехода ($R_{ФД}$)

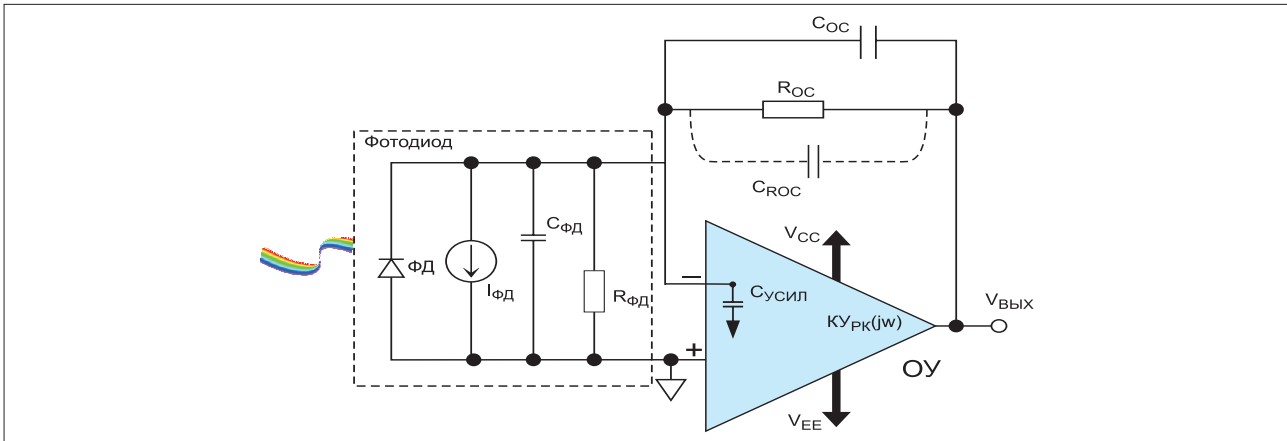


Рис. 4. Полная схема ТИУ с паразитными элементами

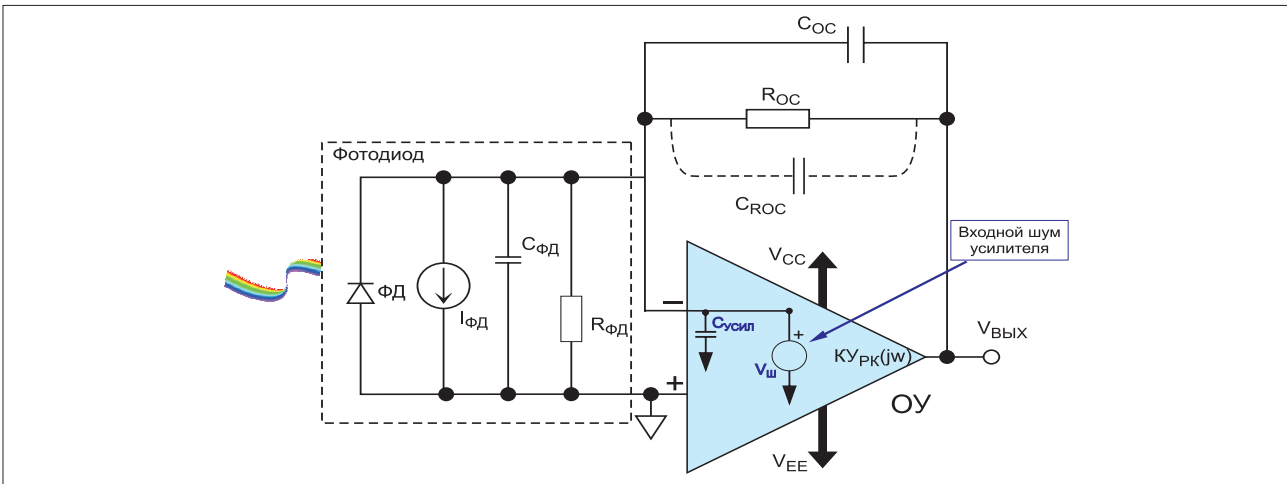


Рис. 5. Полная электрическая схема ТИУ с паразитными конденсаторами, резисторами и источником шума усилителя

тока $I_{ФД}$, который течет от катода к аноду диода. Импеданс инвертирующего входа усилителя очень велик, что вынуждает ток фотодиода протекать через резистор обратной связи $R_{ОС}$ (см. рис. 3).

На рисунке 3 приняты следующие обозначения:

- ФД – идеальный фотодиод;
- $I_{ФД}$ – ток, генерируемый падающим на фотодиод светом;
- $C_{ФД}$ – паразитная емкость фотодиода;
- $R_{ФД}$ – паразитное параллельное сопротивление фотодиода.

При падении света на фотодиод ток начинает течь от катода к аноду. Например, если $R_{ОС} = 1$ МОм и $C_{ОС} = 2,5$ пФ, а постоянный ток фотодиода $I_{ФД} = 1$ мА, то полюс передаточной функции сигнала $1/(2\pi R_{ОС} C_{ОС}) = 63,7$ кГц. Выходное напряжение усилителя $V_{ВЫХ} = I_{ФД} R_{ОС} = 1$ В. Чем меньше $R_{ОС}$, тем выше частота и меньше напряжение.

В детализованную схему ТИУ включены все компоненты наряду с их паразитными емкостями и сопротивлениями (см. рис. 4).

На рисунке 4 входные токи смещения должны быть ниже минимального тока фотодиода. Это эмпирическое правило действует в отношении усилителей с входным дифференциальным каскадом на полевых транзисторах или усилителей, полностью реализованных по КМОП-технологии, у которых входные токи смещения не превышают 10 пА. К таким усилителям относится, например, MAX44260, у которого типовой входной ток смещения равен 0,01 пА. Погрешность, вызванная напряжением смещения конкретного усилителя, может стать проблематичной, что зависит от схемы приложения. Усилитель с большим напряжением смещения (несколько десятков мВ) может серьезно ухудшить линейность схемы и динамический

диапазон.

В высокоточных приложениях напряжение смещения на фотодиоде влияет на линейность схемы при поступлении света небольшой интенсивности, т.к. генерируется ток, который не обусловлен реакцией фотодиода на излучение.

Напряжение смещения влияет также на динамический диапазон ТИУ. Например, коэффициент усиления напряжения в схеме на рисунке 1 составляет $(1 + R_{ОС}/R_{ФД})$. Эта величина, помноженная на КУ, определяет выходное напряжение усилителя. В рассматриваемом примере $R_{ОС} = 1$ МОм, а $R_{ФД} = 1$ ГОм, что дает 1,001 В/В. Если напряжение смещения усилителя равно 10 мВ, его погрешность по постоянному току на выходе составляет 10,01 мВ. В системе с напряжением питания 5 В такая погрешность уменьшает динамический диапазон примерно на 0,2%.

На рисунке 4 максимальная величина напряжения смещения на входе MAX44260 равна 50 мВ, что приводит к погрешности динамического диапазона 0,001%.

Далее мы рассмотрим передаточную функцию коэффициента усиления шума, чтобы оценить, как паразитные компоненты влияют на устойчивость ТИУ.

КУ ШУМА ТИУ

Добавим в схему трансимпедансного усилителя источник шума с напряжением $V_{Ш}$. Элементы, показанные в схеме ТИУ на рисунке 5, позволяют проанализировать критические частотные составляющие. Между входами усилителя установлена модель источника шума.

При анализе характеристики коэффициента шума любой схемы усилителя необходимо оценить КУ сигнала между неинвертирующим входом усилителя и его выходом. Пере-

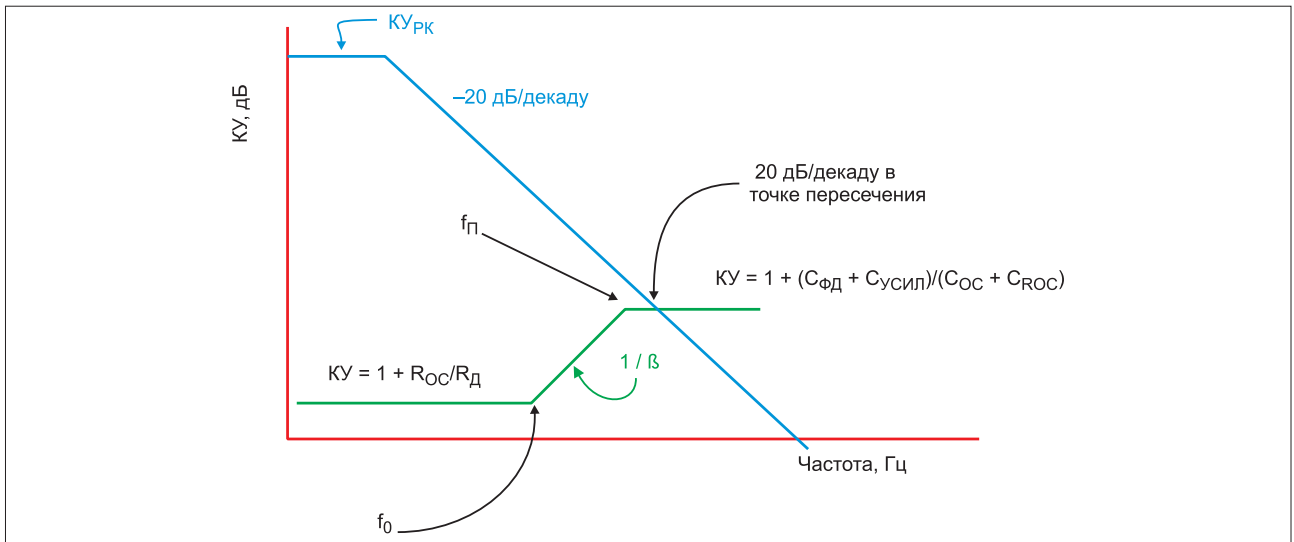


Рис. 6. Скорость сближения между КУ закрытого контура (1/β) и КУ открытого контура усилителя (КУ_РК) равна 20 дБ/декаду

доточная функция КУ шума полной схемы ТИУ определяется из уравнения (1):

$$V_{\text{ВЫХ}}(j\omega) = \frac{I_{\text{ОС}} R_{\text{ОС}}}{1 + 1 / (K_{\text{УЗК}}(j\omega) \cdot \beta)} + V_{\text{Ш}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{ОС}}$ – ток через $R_{\text{ОС}}$; β – коэффициент обратной связи системы равный $1 / (1 + Z_{\text{ВХ}} / Z_{\text{ОС}})$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ 1/β

Если предположить, что $K_{\text{УЗК}}(j\omega)$ бесконечен, передаточная функция КУ шума усилителя на рисунке 6 определяется из уравнения (2):

$$V_{\text{ВЫХ}}(j\omega) = \left(1 + \frac{Z_{\text{ОС}}(j\omega)}{Z_{\text{ВХ}}(j\omega)} \right) \cdot V_{\text{Ш}}, \quad (2)$$

где $Z_{\text{ОС}}(j\omega)$ – комплексный импеданс контура обратной связи; $Z_{\text{ВХ}}(j\omega)$ – комплексный входной импеданс.

Такое упрощение позволяет рассчитать передаточную функцию 1/β 1-го уровня, где:

$$Z_{\text{ОС}}(j\omega) = R_{\text{ОС}} \parallel j\omega (C_{\text{РОС}} + C_{\text{ОС}}); \quad (3)$$

$$Z_{\text{ВХ}}(j\omega) = R_{\text{Д}} \parallel j\omega (C_{\text{Фд}} + C_{\text{УСИЛ}}). \quad (4)$$

Суммарный импеданс элементов цепи обратной связи определяется величиной $Z_{\text{ОС}}(j\omega)$, а входные элементы – величиной $Z_{\text{ВХ}}(j\omega)$. Объединим их так, чтобы определить полюса и нули схемы ТИУ.

Чтобы представить уравнение (2) в виде полюсов и нулей, воспользуемся передаточной функцией на диаграмме Бode с одним полюсом и одним нулем (5):

$$V_{\text{ОУТ}}(j\omega) = \frac{1 + R_{\text{ОС}}(C_{\text{Фд}} + C_{\text{УСИЛ}} + C_{\text{ОС}} + C_{\text{РОС}})j\omega}{1 + C_{\text{ОС}}(R_{\text{ОС}} + C_{\text{РОС}})j\omega} \cdot V_{\text{Ш}}. \quad (5)$$

ДИАГРАММА БОДЕ ШУМА ТИУ

График Бode представляет собой эффективное средство определения устойчивости. Давайте сначала обсудим некоторые основные методические рекомендации по проектированию. Обычно считается, что величина запаса устойчивости

по фазе больше 0°, но это не так. На практике становится понятно, что этот параметр должен быть не меньше 45°. Подав ступенчатый сигнал в схему на печатной плате с положительным запасом по фазе около 0°, можно увидеть, что в ней появляются неконтролируемые колебания. Эта нестабильность является результатом влияния паразитных элементов или неучтенных емкостей топологии. Подача ступенчатого сигнала в аналоговую схему с запасом по фазе 45° приведет к появлению выброса, который примерно на 30% выше входного сигнала. Появится также затухающий сигнал, который со временем устанавливается.

Соответствующая диаграмма Бode такой схемы учитывает КУ замкнутого контура усилителя и кривую 1/β. Частотную характеристику КУ шума (1/β) определяют паразитные элементы фотодиода, входная емкость операционного усилителя $Z_{\text{ВХ}}$ и элементы контура ОС ($R_{\text{ОС}}$, $C_{\text{РОС}}$ и $C_{\text{ОС}}$) (см. рис. 6).

На рисунке 6 следует обратить внимание на значения кривой КУ 1/β и частоты. Значение 1/β по постоянному току определяется как $(1 + R_{\text{ОС}}/R_{\text{Д}})$, где величина сопротивления обратной связи ТИУ, как правило, находится в диапазоне 10 кОм...10 МОм.

Паразитный элемент $R_{\text{Д}}$ представляет собой сопротивление p-n-перехода фотодиода с нулевым смещением. Для изготовления фотодиода используется кремний (190–1100 нм), германий (400–1700 нм), арсенид галлия-индия (800–2600 нм), сульфид свинца (< 1000–3500 нм) или теллурид кадмия-ртути (400–14000 нм). Значения паразитных шунтирующих сопротивлений фотодиода находятся в диапазоне между десятками Ом и тысячами МОм.

Комбинация двух резисторов $R_{\text{ОС}}$ и $R_{\text{Д}}$, как правило, дает почти нулевое значение, в результате чего коэффициент усиления ТИУ по постоянному току равен 1 В/В.

Вторым определяющим значением коэффициента усиления 1/β является то, с которого характеристика становится плоской на более высоких частотах. Величина КУ в этой области равна $1 + (C_{\text{Фд}} + C_{\text{УСИЛ}}) / (C_{\text{ОС}} + C_{\text{РОС}})$. Заметим, что КУ на высоких частотах определяется частным от деления суммы входных емкостей на сумму выходных емкостей

Третьей важной характеристикой КУ 1/β являются значения частот среза f_0 и $f_{\text{П}}$. Эти значения рассчитываются с помощью формул (6–7):

$$f_0 = \frac{2\pi}{1 + (R_{\text{ОС}} \cdot R_{\text{Д}})(C_{\text{ОС}} + C_{\text{РОС}} + C_{\text{УСИЛ}} + C_{\text{Фд}})}; \quad (6)$$

$$f_{\Phi} = \frac{2\pi}{1 + R_{OC} \cdot (C_{OC} + C_{ROC})} \cdot (7)$$

Наконец, последней интересующей нас частью графика на рисунке 6 является точка пересечения кривой $1/\beta$ с кривой KU_{PK} . Скорость сближения этих двух кривых, как правило, определяет величину запаса по фазе ТИУ. Схема устойчиво работает, если скорость сближения равна 20 дБ. Это значит, что запас по фазе составляет 45° . Если кривая $1/\beta$ пересекается на частоте полюса f_{Γ} , запас по фазе равен 45° . Схема работает неустойчиво, если скорость сближения превышает 20 дБ; при этом запас по фазе меньше 45° . Устойчивость схемы можно определить по запасу по фазе.

Известны три способа коррекции нестабильно работающей схемы: 1) увеличить емкость обратной связи C_{OC} ; 2) увеличить ширину полосы усилителя с единичным усилением; 3) воспользоваться другим фотодиодом с иной величиной входной емкости.

Мы же прибегнем к более простому решению. Уравнение (8) определяет отклик фильтра Баттерворта при большом запасе по фазе 65° ; выброс напряжения при входном ступенчатом воздействии равен 5%:

$$C_{OC} = 2\pi ((C_{\text{фд}} + C_{\text{усил}})/(2\pi R_{OC} f_{\text{ушп}})) - C_{ROC} \quad (8)$$

где $f_{\text{ушп}}$ – ширина полосы (ШП) стабильно работающего усилителя с единичным усилением.

Уравнение (8) позволяет варьировать не только ширину полосы или величину входной емкости усилителя, но и величину резистора обратной связи.

ВЫВОДЫ

Итак, мы рассчитали устойчиво работающую схему ТИУ и четко определили способ выбора емкости обратной связи C_{OC} . Из уравнения (8) видно, что две переменные требуют дальнейшего определения – R_{OC} и $f_{\text{ушп}}$. В следующей части этой статьи мы рассмотрим фотодиод и узнаем, как определяется его выходной диапазон, что позволит нам определить величину резистора обратной связи и выбрать усилитель. \Rightarrow

ЛИТЕРАТУРА

1. Бонни Бейкер. Применение трансимпедансных усилителей в цифровой электронике. Электронные компоненты. № 9. 2020.