ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСИМПЕДАНСНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ.

ЧАСТЬ 1

БОННИ БЕЙКЕР (BONNIE BAKER), Maxim Integrated

Медицинским приложениям, в которых используются оптоэлектронные технологии, в т. ч. фоточувствительным схемам, требуется тот же высокий уровень точности и безошибочности, что и аналоговым приложениям. По этой причине разработчики аналоговых приложений часто вспоминают трансимпедансные усилители (ТИУ) и соответствующие схемы их применения. В настоящее время оптоэлектронные методы начинают использоваться в цифровых системах, к которым относятся лидары автомобилей и промышленное оборудование, системы безопасности, а также сельскохозяйственные приложения по управлению освещением и климатом. С помощью аналоговых фоточувствительных схем с использованием ТИУ можно получить ряд схемных устройств, которые мы и рассмотрим далее.

ВЫСОКОТОЧНЫЕ СХЕМЫ С ТИУ

На первый взгляд, создается впечатление, что в схемах с ТИУ нет ничего сложного. И действительно, в их состав входят всего четыре простых компонента: фотодиод, усилитель, резистор обратной связи (ОС) и, как правило, конденсатор ОС. Эти схемы преобразуют поступающий свет в напряжение, величина которого зависит от яркости (см. рис. 1).

На рисунке 1 фотодиод (ФД) установлен между инвертирующим и неинвертирующим входами усилителя. В темноте напряжение на этом фотодиоде является нулевым. Падающий на диод свет генерирует ток, который начинает течь от анода к катоду; при этом выходное напряжение $V_{ВЫХ}$ операционного усилителя (ОУ) увеличивается. В этой ситуации может сложиться впечатление, что ток фотодиода $I_{ФД}$ течет в неверном направлении.

Действительно, ток в рассматриваемом случае течет в направлении, которое является противоположным имеющемуся при стандартной работе диода. Ни в коем случае не следует менять направление $I_{ФД}$. Под влиянием света на поток электронов и дырок в *p-n*-переходе фотодиода возникает ток между катодом и анодом. Этот ток растет с увеличением яркости света. На рисунке 2 представлена зависимость выходного напряжения ОУ от выходного тока фотодиода.

Из рисунка 2 видно, что выходное напряжение ТИУ с нулевым смещением возрастает при увеличении яркости света, падающего на фотодиод. Растет и его выходной ток. При

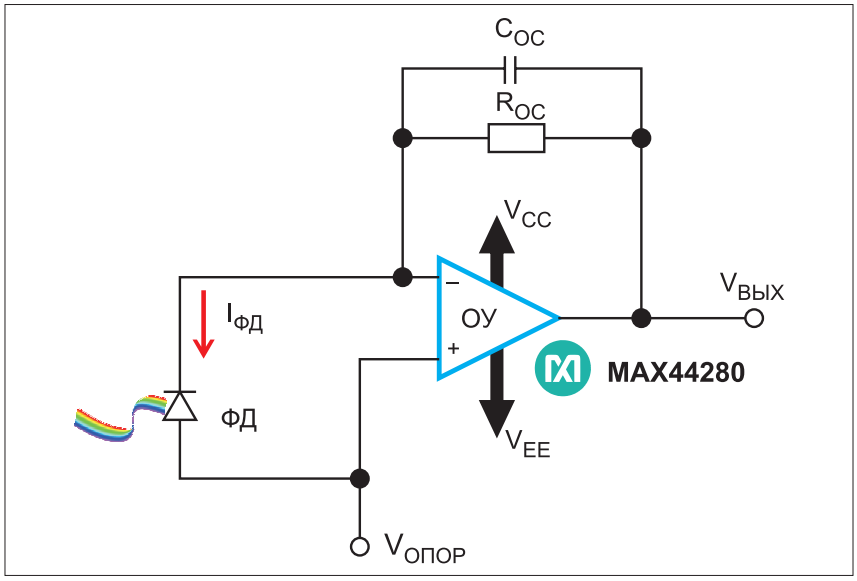

Рис. 1. **ТИУ с нулевым напряжением на входном фотодиоде**

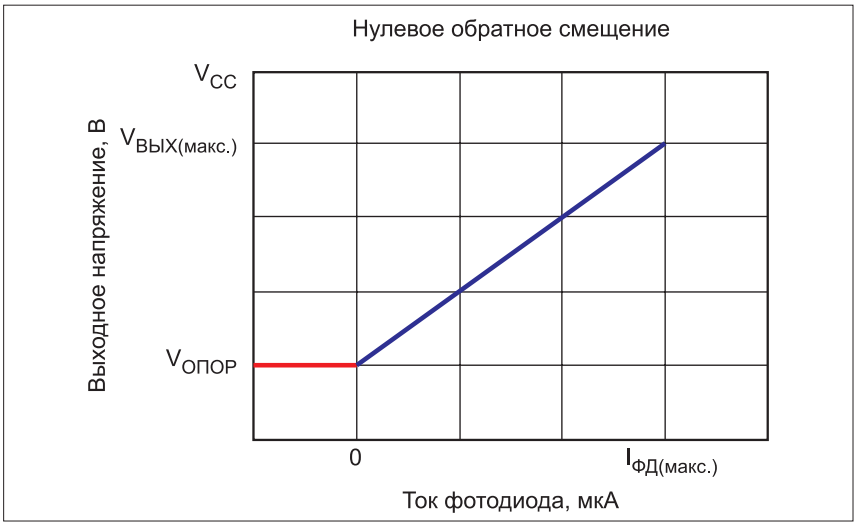

Рис. 2. **Зависимость выходного напряжения ОУ $V_{ВЫХ}$ от выходного тока фотодиода $I_{ФД}$**

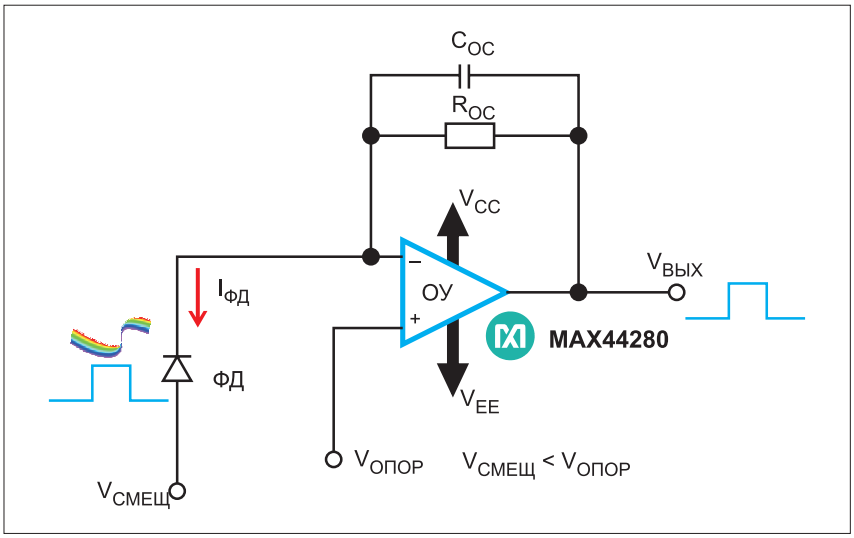

Рис. 3. **ТИУ с отрицательным обратным смещением на входном фотодиоде**

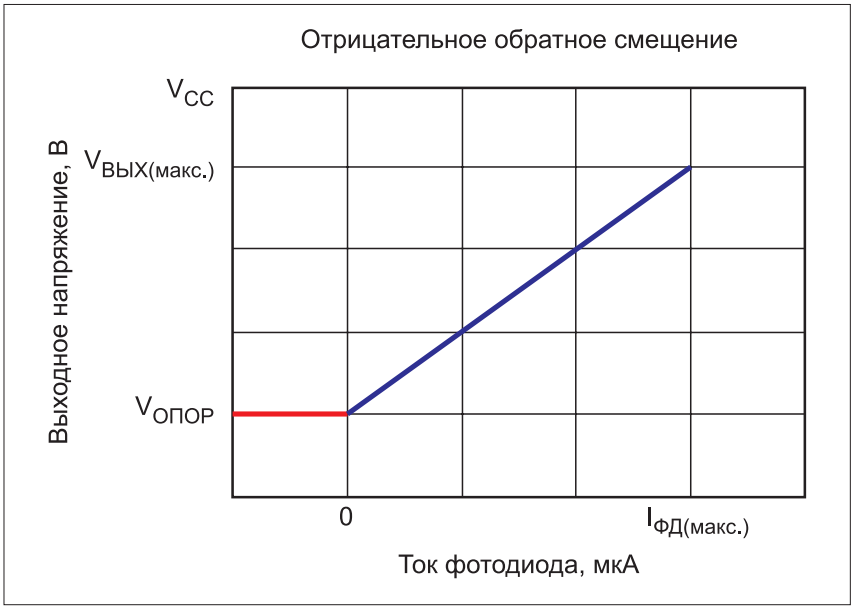

Рис. 4. **Зависимость выходного напряжения от выходного тока фотодиода**

необходимости обеспечить высокую точность измерений с помощью этой схемы возникают существенные проблемы. Выходной ток фотодиода зависит от интенсивности света. Типичные значения максимального выходного тока находятся в микроамперном диапазоне. С другой стороны, при измерении световых сигналов малой интенсивности выходной ток фотодиода исчисляется пикоамперами. В этих диапазонах глюкометру или компьютерному измерительному устройству, например, во всем выходном диапазоне напряжения усилителя требуется чувствительность, свойственная аналоговым приборам.

Поскольку ОУ напрямую соединен с фотодиодом, уровень входного тока смещения этого усилителя должен быть как можно ниже. Входной ток смещения усилителей на основе технологий КМОП или МОП исчисляется пикоамперами. Например, максимальный входной ток смещения ОУ MAX44280 (см. рис. 1) составляет 0,5 пА.

ЦИФРОВЫЕ СХЕМЫ ТИУ

Цифровые схемы ТИУ являются высокоскоростными. В них используется цифровой сигнал фотодиода «включено – выключено» и входной сигнал (см. рис. 3).

В схеме на рисунке 3 отрицательное напряжение смещения на фотодиоде уменьшает его паразитную емкость и в то же время увеличивает ток утечки. Чем меньше емкость, тем выше быстродействие ТИУ. Однако всегда имеется возможность повысить эффективность любой системы. Повышение быстродействия ТИУ приводит к уменьшению точности измерений из-за появления тока утечки фотодиода. Однако на самом деле это сравнительно небольшой компромисс, т. к. импульсный сигнал проходит по схеме, работающей в цифровой области, а погрешность из-за тока утечки значительно меньше допусков на цифровой шум.

На рисунке 4 представлена зависимость выходного напряжения ОУ, показанного на рисунке 3, от тока фотодиода.

Из рисунка 4 видно, что выходное напряжение ТИУ с отрицательным обратным смещением увеличивается с ростом яркости света, падающего на фотодиод, в результате чего возрастает выходной ток фотодиода.

Фотодиод в этом случае непосредственно не подключен к операционному усилителю. Теперь определяющими характеристиками усилителя являются входная емкость и ширина полосы пропускания. На рисунке 3 входная емкость ОУ MAX44280 составляет 0,4 пФ, а ширина полосы – 20 МГц.

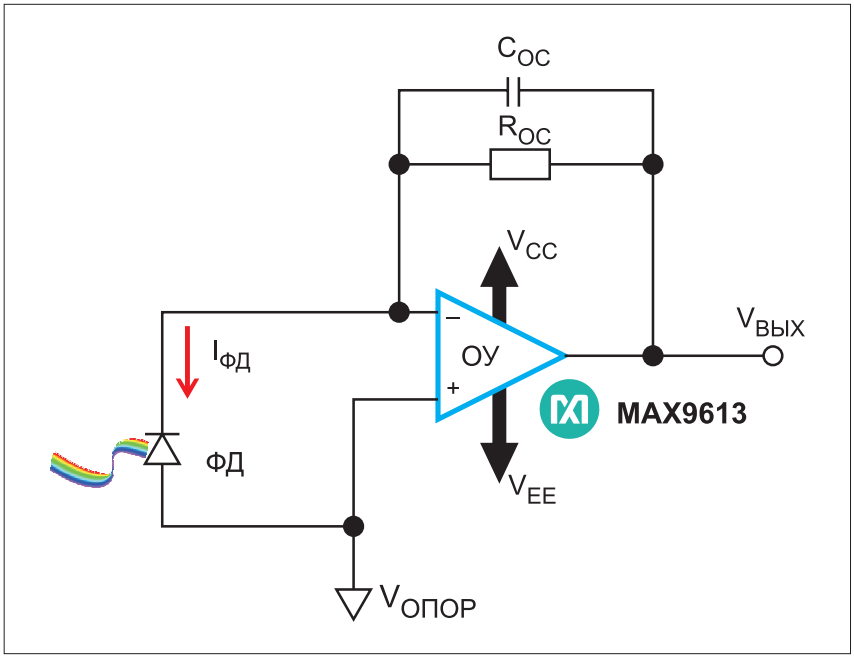

Рис. 5. **Стандартная высокоточная измерительная схема с использованием ТИУ**

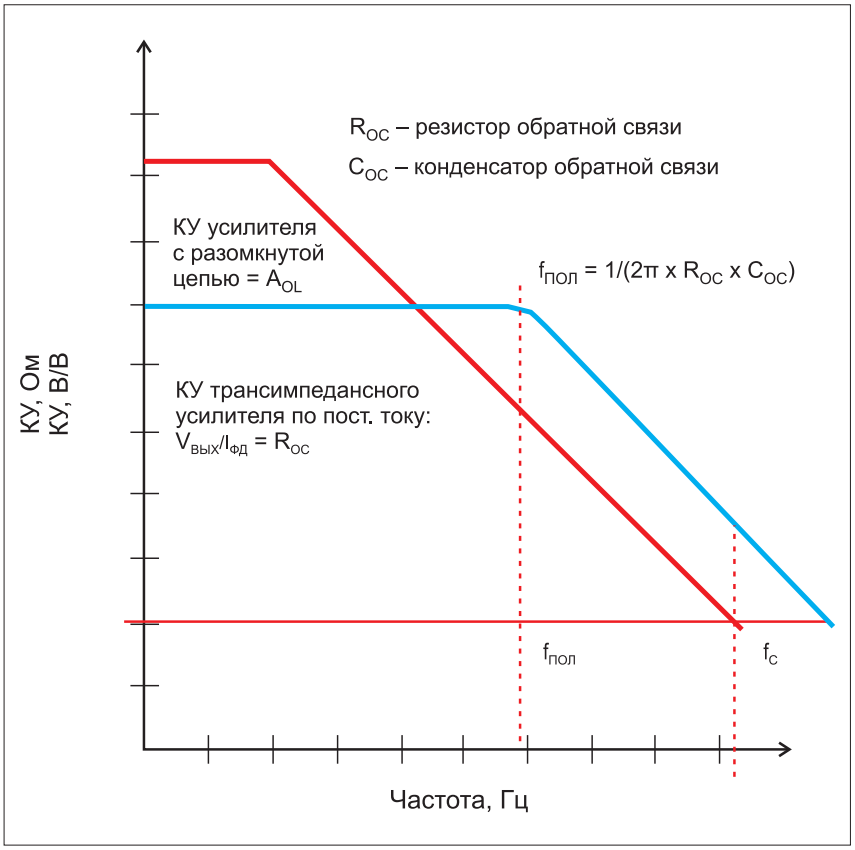

Рис. 6. **Частотная характеристика ТИУ**

Итак, базовая схема ТИУ предназначена для высокоточных систем, а цифровой ТИУ – для высокоскоростных цифровых цепей; определяющими характеристиками этого усилителя являются входной ток смещения и высокая добротность.

Далее мы подробно рассмотрим частотную характеристику сигналов переменного тока.

ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИГНАЛОВ

На рисунке 5 представлена высокоточная схема ТИУ с нулевым напряжением на фотодиоде с пикоамперным входным током смещения и милливольтовым входным смещением.

Для обеспечения высокой точности входной ток смещения и напряжение смещения усилителя, представленного на рисунке 5, очень малы. Чтобы погрешности, вызванные входным током смещения, были меньше минимального значения $I_{ФД}$, определяемое спецификацией значение входного тока смещения ОУ MAX9613 равно 1 пкА (тип.). Чтобы линейность ОУ как можно в большей степени отвечала характеристике фотодиода, напряжение смещения MAX9613 выбирается очень малым – 150 мВ (макс.).

С учетом фактической и паразитной емкостей стабильность ТИУ вызывает сомнения. Однако, к счастью, имеются возможности обойти эти трудности.

На рисунке 5 коэффициент усиления (КУ) сигнала определяется цепью обратной связи и паразитным сопротивлением фотодиода согласно уравнению (1):

$$V_{ВЫХ}/I_{ФД} \approx (R_{OC} \,||\, C_{OC}). \quad (1)$$

Если предположить, что в этом уравнении C_{OC} – емкость разомкнутой цепи, коэффициент усиления по постоянному току этой трансимпедансной схемы равен R_{OC}.

Из уравнения (1) можно получить частоту полюса (2):

$$f_{ПОЛ} = 1/(2\pi R_{OC} C_{OC}). \quad (2)$$

На рисунке 6 сигнал усиливается на инвертирующей стороне усилителя. КУ по постоянному току ТИУ равен $V_{ВЫХ}/I_{ФД}$. Для удобства этот КУ выбран равным значению резистора обратной связи R_{OC}. С ростом частоты КУ не меняется вплоть до частоты среза, когда R_{OC} и C_{OC} образуют низкочастотный фильтр.