

Исследование характеристики фотодиода для разработки оптоэлектронного многопараметрового фотоколориметра

Н.Р. Рахимов, Е.Ю. Кутенкова, А.Н. Серьезнов, О.К. Ушаков

Оптоэлектронные колориметры (фотоколориметры) применяются в различных областях народного хозяйства для непрерывного или дискретного контроля физико-химических параметров веществ и материалов в металлургической, химической, пищевой промышленности, на предприятиях водоснабжения и в сельском хозяйстве. Самое широкое использование фотоколориметры получили в медицине для анализа биопрепаратов в биологических жидкостях и для контроля за состоянием человека.

Фотоэлектрические колориметры (фотоколориметры) обеспечивают большую точность измерений, чем визуальные; в качестве приёмников излучения в них используются фотоэлементы (селеновые и вакуумные), фотоэлектронные умножители, фотосопротивления и фотодиоды. Сила фототока приёмников определяется интенсивностью падающего на них света и, следовательно, степенью его поглощения в растворе (тем большей, чем выше концентрация). Помимо фотоэлектрического колориметра (фотоколориметра) с непосредственным отсчетом силы тока, распространены компенсационные колориметры, в которых разность сигналов, соответствующих стандартному и измеряемому растворам, сводится к нулю (компенсируется) электрическим или оптическим компенсатором (например, клином фотометрическим); отсчет в этом случае снимается со шкалы компенсатора. Компенсация позволяет свести к минимуму влияние условий измерений (температуры, нестабильности свойств элементов колориметра) на их точность. Показания колориметра не дают сразу значений концентрации исследуемого вещества в растворе — для перехода к ним используют градуировочные графики, полученные при измерении растворов с известными концентрациями.

Главной частью традиционного фотоколориметра, определяющей энергопотребление, надёжность и массогабаритные показатели является оптический блок на основе ламп накаливания, который практически во всех фотометрических приборах имеет конструктивную защиту от влияния условий внешней освещённости.

Эксплуатация таких приборов сопряжена с неудобством эксплуатации и, соответственно, с существенными затратами времени при проведении массовых измерений. Отсутствие математического описания для кювет такого типа ограничивает их применение и заставляет использовать приближённую фотометрическую компенсацию ошибки измерения. Однако, данные фотоколориметры имеют низкую чувствительность и сложность конструкции, неточность за счёт несовершенства кюветы и кюветодержателя, когда для каждого последующего анализа необходимо извлекать кювету из прибора, заполнять её очередной пробой, мыть и протирать оптические поверхности кювет от потоков исследуемой жидкости. [1]

Разработка принципиально нового автоматического малогабаритного оптоэлектронного фотоколориметра [2, 3, 4] на основе оптрона открытого канала и переход от конструктивных средств защиты оптического канала к схемотехническим позволит кардинально уменьшить массу и габариты прибора повысить его надёжность, автоматизировать контроль и увеличить срок службы. В связи с этим особую значимость приобретает разработка электронной измерительной части прибора, позволяющей эффективно работать в условиях меняющейся внешней освещённости.

Для проведения данных исследований необходимо использовать кюветы специальной формы, например, в виде линзы-шара или линзы-цилиндра. Отсутствие математического описания для кювет такого типа ограничивает их применение и заставляет использовать приближённую фотометрическую компенсацию ошибки измерения.

Многие измерения проводятся в области длин волн, далеко отстоящих от максимума спектральной чувствительности приёмника оптического излучения (ПОИ), поэтому актуальность приобретают исследования их световой характеристики в области малых фототоков, что позволит повысить метрологические характеристики прибора. Особую актуальность данная задача приобретает для измерения концентраций растворов в широком диапазоне оптических плотностей, что позволит охватить весь спектр

исследований, в основе которых лежит фотоколориметрический метод измерения.

Применение в оптическом канале предлагаемого фотоколориметра светодиода в качестве источника светового потока и измерение концентраций растворов в широком диапазоне оптической плотности связано с необходимостью работать в области малых световых потоков на начальном участке световой характеристики фотоприемника. Кроме того, большое количество фотоколориметрических исследований приходится на область длин волн видимого спектра, тогда как максимум чувствительности фотодиодов лежит в инфракрасной области, что приводит к уменьшению полезного сигнала и необходимости работать с малыми фототоками.

Предлагается методика, использующая неэталонный источник излучения с постоянным световым потоком и необходимой длиной волны, выступающий в качестве относительной единицы измерения падающего на фотоприемник излучения. При этом измеряется реакция фотоприемника на постоянный световой поток при кратных ему уровнях фоновой засветки. Предлагается, по сути, способ задания оптической рабочей точки фотоприемника, позволяющий с фиксированным шагом изменять падающий на него световой поток без использования градуированного источника. Процесс построения статической характеристики является итеративным и поясняется рисунком 1.

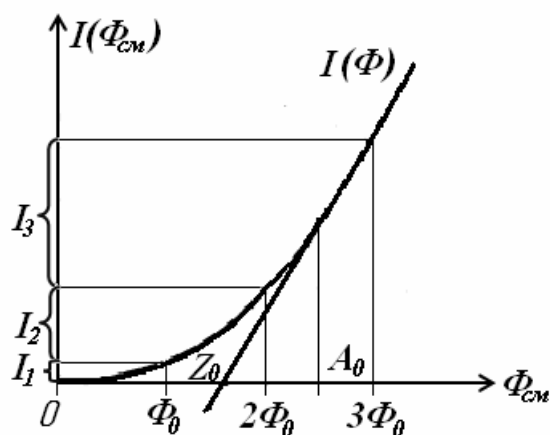


Рисунок 1 - Способ измерения световой характеристики фотоприемника

На первом шаге на фотоприемник воздействует постоянный световой поток Φ_0 который создает на его выходе фототок величиной I_0 . На следующем шаге источник Φ_0

отключается и замещается источником потока смещения $\Phi_{см}$, создающим фототок, равный величине I_1 , в результате рабочая точка фотоприемника перемещается вправо по оси светового потока на величину Φ_0 . Возобновление потока Φ_0 вызывает появление уже суммарного фототока $I_1 + I_2$. Далее источник $\Phi_{см}$ замещает удвоенный поток Φ_0 и создает фототок, равный данной сумме токов и т.д.

Таким образом, по оси абсцисс последовательно откладываются значения светового потока, кратные величине Φ_0 . Это позволяет равномерно двигаться по оси светового потока с шагом Φ_0 , независимо от характера и степени нелинейности световой характеристики фотоприемника. Каждая точка статической характеристики $I(\Phi_{см})$ на i -шаге может быть определена из следующего выражения

$$I_i = \sum_{j=1}^i \{F(i \cdot \Phi_0) - F[(i-1) \cdot \Phi_0]\}, \quad (1)$$

где F - характеристика чувствительности фотоприемника, $\Phi_{см}$ световой поток смещения, i - номер шага.

Прямая Z_0 является аппроксимацией линейного участка характеристики, а точка A_0 - верхней границей нелинейной зоны по оси светового потока. Величина Φ_0 выбирается такой, чтобы на нелинейном участке (отрезок 0 - A_0) выполнялось максимальное число итераций.

Таким образом, были исследованы различные типы фотодиодов и определено аналитическое описание световой характеристики фотодиодов в области малых фототоков следующего вида

$$I(\Phi) = C_1 \cdot \Phi + C_2 \cdot (e^{\Phi/\tau} - 1). \quad (2)$$

Величины C_1 , C_2 , τ - константы, соответствующие конкретному виду фотодиода.

Для уменьшения ошибки измерения от нелинейности световой характеристики фотоприемника предложены два варианта поправки по уровню засветки Φ_3 , при этом линейная поправка имеет вид

$$\Delta_L = k \cdot \Phi_3 + b, \quad (3)$$

а гиперболическая поправка

$$\Delta_H = \frac{k}{\Phi_3} + b. \quad (4)$$

Здесь k - коэффициент, b - константа.

Так на примере экземпляра фотодиода типа ФДК-155 в результате введения линейной поправки максимальная ошибка от нелинейности может быть уменьшена в 13.2 раза, а введение гиперболической поправки позволяет уменьшить эту ошибку в 45 раз.

Еще одним вариантом уменьшения погрешности измерения является способ, при котором рабочая точка фотоприемника фиксируется отдельным контуром обратной связи по уровню внешней засветки при помощи дополнительного источника потока смещения. Это позволяет задать и стабилизировать рабочую точку фотоприемника на линейном участке и, соответственно, устранить влияние нелинейности его световой характеристики при изменении условий внешней освещенности.

Показано, что наиболее эффективным вариантом измерительного усилителя, предназначенного для работы с открытым оптическим каналом, является усилитель фототока с автоматической коррекцией нулевого уровня и токовой компенсацией сигнала засветки фотоприемника. Функциональная схема такого усилителя приведена на рисунке 3.

Она содержит преобразователь фототока в напряжение (OY_1), масштабирующий усилитель (OY_2), устройство интегрирования - хранения (OY_3), аналоговый ключ (K_1), устройство выборки - хранения (VBX), ключ (K_2), элементы

(R_6, C_4), фильтр низких частот ($\Phi НЧ$) (элементы R_7, C_5). Сигналы управления ключами и светодиодом VD_1 формируются устройством управления. Временные диаграммы работы усилителя приведены на рисунке 3. Период дискретизации усилителя равен T_{ψ} (рабочий цикл), время формируемого светодиодом VD_1 светового импульса составляет $0.2T_{\psi}$, такт выборки VBX - $0.1 T_{\psi}$, такт коррекции нулевого уровня - $0.6T_{\psi}$.

В режиме коррекции нулевого уровня усилителя, когда светодиод VO_1 обесточен, фотодиод VO_2 генерирует ток, равный сумме темнового тока и фототока, определяемого величиной фоновой засветки. Тогда для входной цепи OY_1 справедливо равенство

$$I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{\phi л}}{U_T}\right) - 1 \right] + I_3 = \frac{U_{\Pi}}{R_1} + I_{ВХ} + I_{ОС}, \quad (5)$$

где I_s - ток насыщения обратносмешанного перехода фотодиода,

$U_{\phi л}$ - падение напряжения на фотодиоде, равное напряжению смещения операционного усилителя OY_1 ;

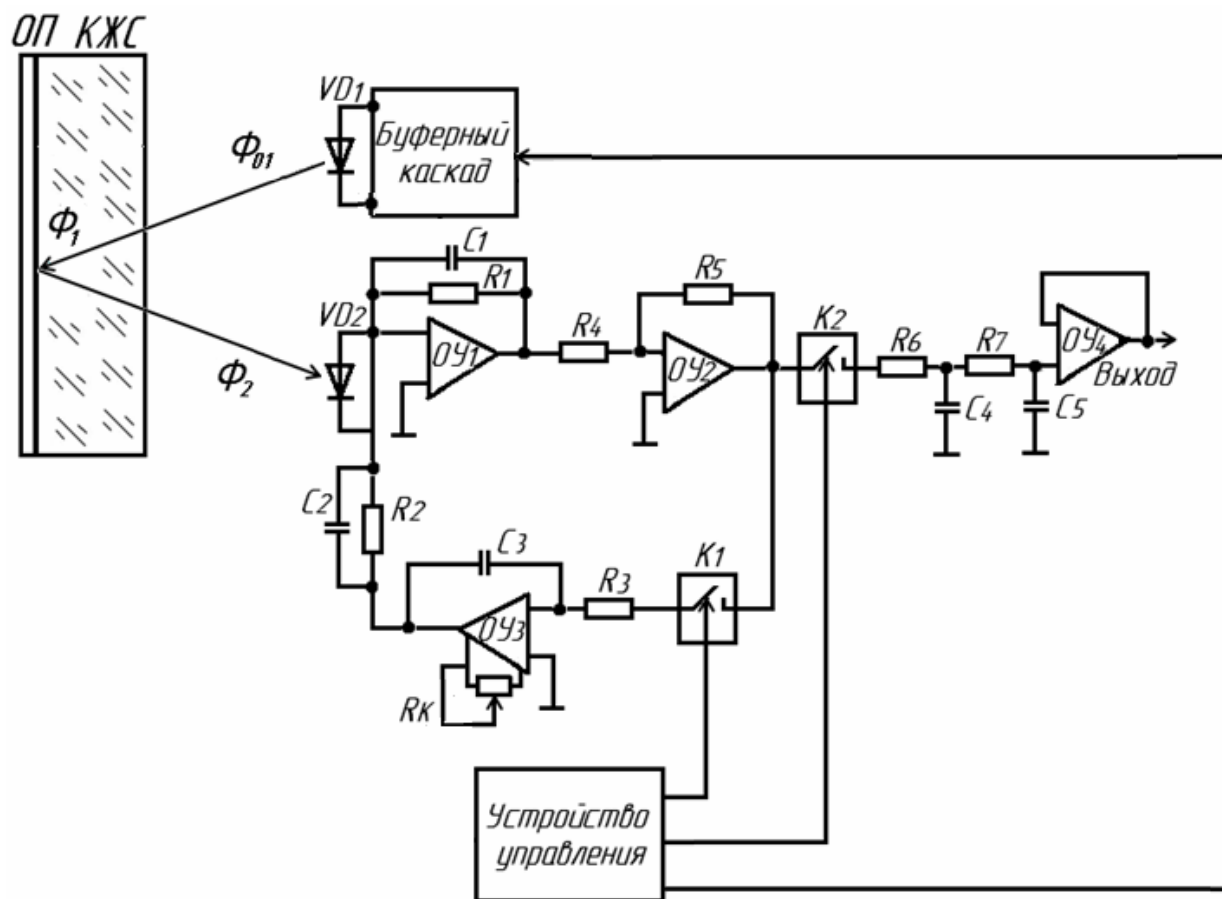


Рисунок 3 - Функциональная схема усилителя фототока

U_T - температурный потенциал;
 I_3 - ток фотодиода, пропорциональный величине фоновой засветки;
 U_H - выходное напряжение интегратора;
 I_{BX} - входной ток OY_1 ;
 I_{OC} - ток обратной связи OY_1 .

Суммарный ток фотодиода преобразуется в напряжение и усиливается, что приводит к появлению на выходе OY_2 ненулевого потенциала, который при замыкании ключа K_1 поступает на вход интегратора OY_3 . При этом замыкается петля отрицательной обратной связи, в результате по окончании переходных процессов выходной сигнал интегратора достигает величины, при которой напряжение на выходе OY_2 оказывается равным нулю с точностью до напряжения смещения OY_3 . В данном случае имеет место токовая компенсация, действующая в суммирующую точку OY_1 .

По истечении времени коррекции ключ K_1 размыкает петлю обратной связи, интегратор переходит в режим хранения, поддерживая при этом установившуюся величину тока компенсации до очередной выборки. В момент

размыкания ключа K_1 включается источник излучения, а сигнал на выходе OY_2 будет определяться только величиной светового потока светодиода.

Ключ K_1 замыкается через $0.2T_{\text{ц}}$ после выключения светодиода, что позволяет уменьшить возмущение в контуре коррекции в начальный момент времени, связанное с переходным процессом в усилителе при отключении светодиода.

Открытие ключа K_2 происходит с задержкой $0.1T\gamma$, необходимой для запоминания в UBX уже установившегося значения выходного напряжения OU_2 .

Соединенные последовательно *УВХ* и *ФНЧ* представляют собой импульсный элемент с интерполятором нулевого порядка, предназначенные для восстановления амплитуды полезного сигнала из модулированной последовательности.

На последней диаграмме (выход OY_2) приведена форма реального импульса на выходе усилителя. В условиях действующей, медленно изменяющейся помехи, вершина импульса лежит на ее огибающей.

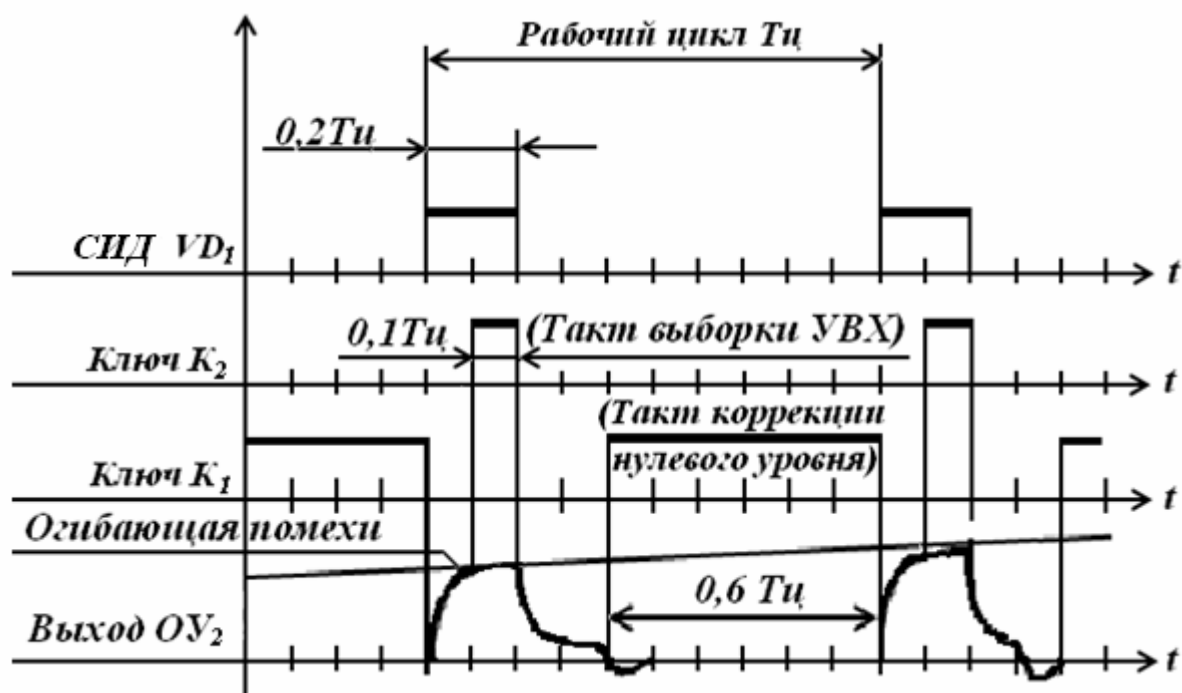


Рисунок 8 - Временные диаграммы работы усилителя

Наличие двух каскадов в усилителе позволяет за счет перераспределения усиления между ними уменьшить сопротивление обратной связи R_1 в преобразователе фототока и, следовательно, сопротивление нагрузки фотодиода. При этом снижается влияние сопротивления R_1 на точность измерения и увеличивается быстродействие цепи фотодиода.

Светодиод включается со скважностью 0,2, что при среднем токе 10 мА позволяет увеличить его светоотдачу в пять раз. При этом возрастает отношение полезного сигнала к сигналу фоновой засветки и становится возможным уменьшить общий коэффициент передачи усилителя, а значит повысить его помехозащищенность.

Точность работы контура коррекции полностью определяется температурной и временной стабильностью нуля ОУЗ в интеграторе, начальное смещение которого компенсируется с помощью потенциометра R_k .

Главным преимуществом усилителя с токовой компенсацией является возможность варьировать в

самых широких пределах диапазон компенсации фоновой засветки и темнового тока, который задается максимальным выходным напряжением ОУЗ в интеграторе и сопротивлением резистора R_2 .

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Неразрушающий контроль: справочник: В 7т./под общ.ред. В.В. Клюева. Т. 6: Магнитные методы контроля, Оптический контроль, Радиоволновый контроль / И.Н. Ермолов. – М.: Машиностроение, 2004.
- [2] Рахимов, Б.Н. Оптоэлектронный автоматический колориметр/Б.Н. Рахимов, О.К. Ушаков, Е.Ю. Кутенкова, Т.В. Ларина//Приборы и техника эксперимента, 2011. - № 5. - С. 161 – 162.
- [3] Заявка № 2011153209 Российская федерация. Оптоэлектронный многопараметровый колориметр/Б.Н. Рахимов и др.; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»