

ПОРТАТИВНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СПЕКТРАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ
ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЖИДКОСТЯМИ© 2019 г. А. В. Филатов^{а,*}, Н. А. Филатов^б^а Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 40^б Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30*e-mail: filsash@mail.ru

Поступила в редакцию 15.02.2019 г.

После доработки 15.02.2019 г.

Принята к публикации 25.02.2019 г.

Описан простой цифровой измеритель спектрального поглощения оптического излучения жидкостями, предназначенный для работы в полевых условиях. Высокая стабильность измерений и линейность передаточной характеристики были достигнуты благодаря применению модификации нулевого метода измерений. Максимальное значение нелинейности передаточной характеристики измерителя для полного диапазона измерения не превысила 3–4 младших разрядов 10-разрядного цифрового кода.

DOI: 10.1134/S0032816219040232

Колориметрия, т.е. измерение избирательного поглощения излучения в слое исследуемой среды, широко применяется для определения концентрации вещества по интенсивности окраски растворов, определяется показатель поглощения (для абсолютно прозрачных сред равен нулю), коэффициент экстинкции мутных сред.

Ниже рассмотрен простой портативный измеритель спектрального поглощения оптического излучения с батарейным питанием, определяющий степень прозрачности жидкостей, обладающий достаточно высокой абсолютной точностью измерений и линейностью передаточной характеристики, предназначенный для работы в полевых условиях. Высокие метрологические характеристики измерителя стали возможными благодаря применению в нем модификации нулевого метода измерений, аналогичной использованной в [1].

Нулевой метод измерений, широко описанный в литературе, например в [2, 3], известен достаточно давно и заключается в выравнивании в разные промежутки времени (этим он отличается от компенсационного метода) входного и подстраиваемого под него опорного сигналов. Тогда измерительное устройство становится инвариантным к коэффициенту усиления измерительного тракта и точность измерения в основном определяется характеристиками изменяемого опорного источника, линейностью его регулировочной характеристики. В современных устройствах с цифровым

управлением нулевой метод измерений, как правило, осуществляется с использованием прецизионных цифроаналоговых преобразователей (ц.а.п.). Рассмотренный в статье измеритель использует в качестве ц.а.п. широтно-импульсный модулятор, т.е. не требует наличия ц.а.п. в составе микроконтроллера.

Для пояснения принципа функционирования измерителя рассмотрим его структурную схему, приведенную на рис. 1. Измеритель содержит линейный усилитель *ЛУ*, фильтр высоких частот *ФВЧ*, компаратор *К*, микроконтроллер *МК*. Линейный усилитель выполнен по схеме инвертирующего преобразователя тока в напряжение [4].

В измерителе используются два вида синхронно выполняемых импульсных модуляций: амплитудная и широтная. Амплитудно-импульсная модуляция (*АИМ*) со скважностью следования управляющих импульсов, равной 2, выполняется по симметричному закону, когда полный период делится на два полупериода равной длительности $t_{АИМ}$ (напряжение типа меандр). По управляющему сигналу *АИМ* замыкается ключ *Кл1* и тем самым модулируется излучение светодиода *СД*, поступающее через исследуемую среду на приемный фотодиод *ФД*, работающий в фотодиодном режиме. Для этого на анод *ФД* подается отрицательное напряжение $-U_{оп}$ от опорного источника.

Широтно-импульсная модуляция (*ШИМ*) выполняется с использованием ключа *Кл2*. По

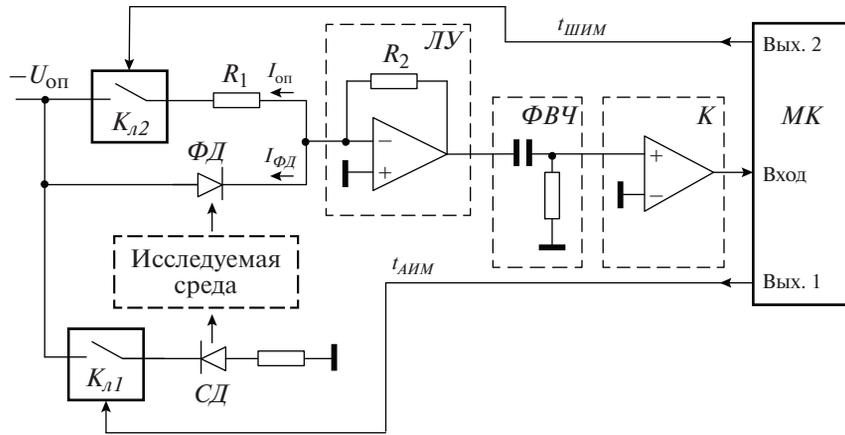


Рис. 1. Структурная схема измерителя поглощения оптического излучения жидкими средами. *Кл1, Кл2* – ключи, *СД* – светодиод, *ФД* – фотодиод, *ЛУ* – линейный усилитель, *ФВЧ* – фильтр верхних частот, *К* – компаратор, *МК* – микроконтроллер.

управляющему импульсу *ШИМ* длительностью $t_{ШИМ}$ ключ замыкается, и ток $I_{оп}$, протекающий через резистор R_1 от опорного источника, суммируется с током фотодиода $I_{ФД}$ на инвертирующем входе усилителя. Ток фотодиода является суммой двух токов: темнового тока I_T , зависящего также от внешней засветки, и сигнального фототока I_c , возникающего от поступающего на *ФД* излучения светодиода *СД* через среду исследования. Конструктивно *СД* и *ФД* представляют собой

оптопару с открытым каналом, в который помещается кювета с исследуемым веществом.

Для осуществления в измерителе модификации нулевого метода измерений в схему включены фильтр высоких частот *ФВЧ*, основное назначение которого заключается в исключении постоянной составляющей в модулированных сигналах, и компаратор *К*, определяющий полярность напряжения на выходе фильтра, работающий в режиме нуль-органа. Выходной логический сигнал компаратора является управляющим и поступает на вход микроконтроллера.

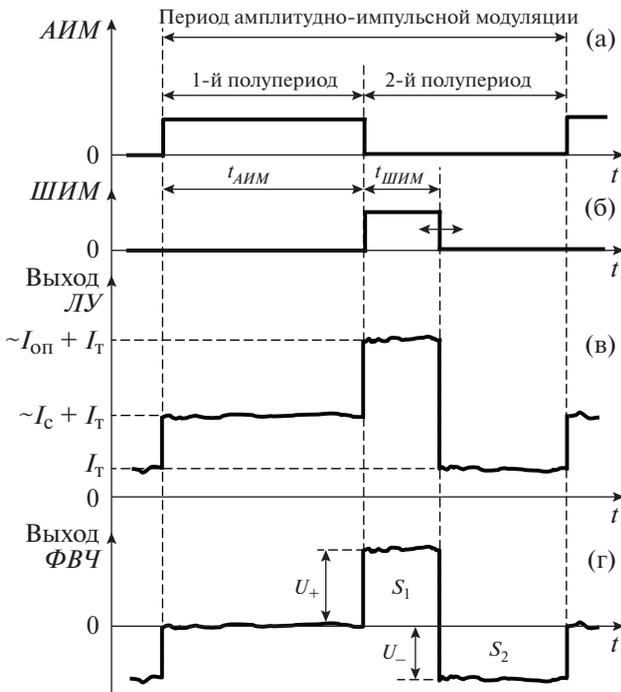


Рис. 2. Временные диаграммы работы измерителя.

На рис. 2 приведены временные диаграммы сигналов, поясняющие принцип функционирования измерителя. Диаграммы приведены для случая, когда в измерительном тракте установлен нулевой баланс. Импульс управления *ШИМ* длительностью $t_{ШИМ}$ вырабатывается микроконтроллером во втором полупериоде амплитудно-импульсной модуляции синхронно с окончанием управляющего импульса *АИМ* длительностью $t_{АИМ}$.

На временной диаграмме рис. 2в приведены три уровня напряжения на выходе усилителя, повторяющиеся через период амплитудно-импульсной модуляции. Первый уровень относится ко времени действия импульса управления *АИМ*, включающего светодиод, и напряжение на выходе усилителя пропорционально сумме сигнального (вызванного излучением *СД*) и темнового токов, т.е. $I_c + I_T$. При действии управляющего импульса *ШИМ* выходное напряжение усилителя (второй уровень) пропорционально сумме двух токов: тока от опорного источника, протекающего через замкнутый ключ *Кл2*, и темнового тока фотодиода, т.е. $I_{оп} + I_T$. По окончании импульса *ШИМ* во втором полупериоде *АИМ* размыкается ключ *Кл2* и, поскольку светодиод выключен, на

вход усилителя поступает только темновой ток фотодиода I_T (третий уровень напряжения).

Далее в сигналах с выхода усилителя исключается постоянная составляющая фильтром высоких частот (разделительная RC -цепь в $\Phi ВЧ$), что приводит к сдвигу периодической последовательности сигналов относительно нулевой оси времени вниз, как это показано на диаграмме рис. 2г. Особенностью применяемой здесь модификации нулевого метода измерений является то, что измеритель работает в следящем режиме под управлением $МК$ и поддерживает на входе компаратора нулевое напряжение в первом полупериоде $АИМ$ (индикатор нулевого баланса в измерительном тракте) соответствующим изменением длительности широтно-импульсного сигнала управления $ШИМ$. Так как последовательность сигналов периодическая, тогда для второго полупериода амплитудно-импульсной модуляции на входе компаратора при установленном нулевом балансе выполняется равенство вольт-секундных площадей положительного и отрицательного импульсов (S_1 и S_2 на рис. 2г), т.е. выполняется равенство

$$U_+ t_{ШИМ} = U_-(t_{АИМ} - t_{ШИМ}), \quad (1)$$

где U_+ и U_- – амплитуды положительного и отрицательного импульсов:

$$\begin{aligned} U_+ &= (I_{оп} + I_T - I_c - I_T)R_2 = (I_{оп} - I_c)R_2, \\ U_- &= (I_c + I_T - I_T)R_2 = I_c R_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где R_2 – сопротивление в цепи обратной связи линейного усилителя.

Подставляя (2) в (1), после несложных преобразований относительно I_c получим:

$$I_c = I_{оп}(t_{ШИМ}/t_{АИМ}). \quad (3)$$

В полученное выражение (3) не входит значение сопротивления R_2 . Следовательно, результат измерений не зависит от коэффициента усиления усилителя, свидетельствуя, что в устройстве реализован нулевой метод измерений. Нестабильность коэффициента передачи усилителя (дрейф и медленные флуктуации, частота которых меньше частоты выполняемой в измерителе амплитудно-импульсной модуляции) не влияет на точность измерений. Накладываются только ограничения на максимальное значение коэффициента усиления, при котором должен сохраняться линейный режим работы усилителя.

В формуле (3) имеет место линейная связь между сигнальным током I_c фотодиода и длительностью широтно-импульсного сигнала $t_{ШИМ}$. Так как ток $I_{оп}$ и длительность $t_{АИМ}$ являются неизменными опорными величинами, следовательно, через длительность $t_{ШИМ}$ можно косвенно определить фотодиодный сигнальный ток. Этот ток непосредственно связан с поглощением излу-

чения исследуемой средой в спектральном окне работы светодиода и линейность преобразования светового потока в выходное напряжение почти полностью определяется не измерительным трактом, а приемником излучения, его характеристической “освещенность–фототок”.

Минимальное и максимальное значения шкалы измерений определяются при подстановке в (3) значений $t_{ШИМ} = 0$ и $t_{ШИМ} = t_{АИМ}$. При $t_{ШИМ} = 0$ ток $I_c = 0$ (полное поглощение излучения $СД$ исследуемым веществом). При $t_{ШИМ} = t_{АИМ}$ ток $I_c = I_{оп}$. Величина тока $I_{оп}$ определяет верхнее значение шкалы измерителя и настраивается в процессе калибровки соответствующей регулировкой сопротивления R_1 .

В данном измерителе длительность широтно-импульсного сигнала $t_{ШИМ}$ представлена в микроконтроллере цифровым кодом. Микроконтроллер для поддержания измерительного тракта в состоянии нулевого баланса (на измерения не оказывают влияния изменения коэффициента усиления) осуществляет следящий режим функционирования измерителя. Для этого он контролирует напряжение на входе компаратора в первом полупериоде амплитудно-импульсной модуляции и поддерживает это напряжение равным нулю соответствующим изменением длительности сигнала, управляющего широтно-импульсной модуляцией.

Алгоритм работы микроконтроллера по поддержанию нулевого баланса в измерительном тракте достаточно прост и заключается в следующем. Фазировка входов компаратора выполнена так, что если напряжение на входе компаратора имеет положительную полярность, длительность $t_{ШИМ}$ уменьшается соответствующим уменьшением ее цифрового кода в $МК$. Это приводит к тому, что периодическая последовательность сигналов после $\Phi ВЧ$ сдвигается вниз относительно нулевой оси времени. Если напряжение отрицательное, то длительность широтного сигнала увеличивается и на выходе $\Phi ВЧ$ сигналы смещаются вверх относительно нулевой оси времени.

Для устойчивой работы цепи авторегулирования нулевого баланса в измерительном тракте увеличение или уменьшение длительности $t_{ШИМ}$ происходит в каждом полупериоде амплитудно-импульсной модуляции на 1 младший разряд кода и тогда в следующем полупериоде $АИМ$ произойдет изменение длительности широтно-импульсного сигнала на 1 младший дискрет, величина которого определяется из формулы: $\Delta t_{ШИМ} = t_{АИМ}/2^n$, где n – число разрядов цифрового кода длительности $t_{ШИМ}$, от которых зависит разрешающая способность измерений.

На рис. 3 приведена принципиальная схема измерителя поглощения оптического излучения жидкими средами. Питание измерителя осу-

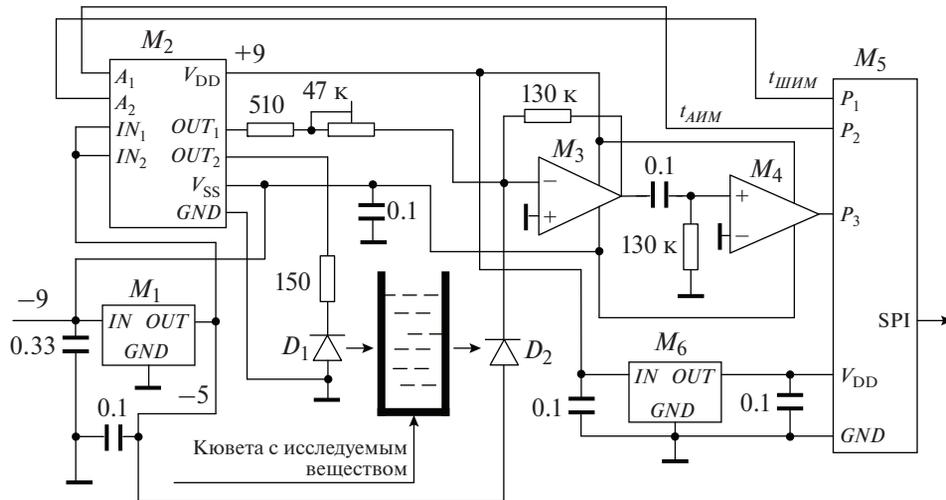


Рис. 3. Принципиальная схема измерителя. M_1 – LM79L05, M_2 – ADG436, M_3 – AD797, M_4 – AD790, M_5 – STM8L001, M_6 – AMS1117; D_1 – PD438C, D_2 – PD423-3C.

шестьвается от двух батареек с напряжением каждой 9 В. Напряжение опорного источника M_1 через ключ микросхемы M_2 (с помощью данного ключа в измерителе осуществляется амплитудно-импульсная модуляция, $t_{AIM} = 500$ мкс) подается на светодиод D_1 (PD438C), имеющий максимум излучения на длине волны 570 мкм. В корпусе светодиода имеется оптическая линза $\varnothing 5$ мм для обеспечения направленного излучения с углом раскрытия 30° .

Кювета с размерами $20 \times 10 \times 50$ мм устанавливается в канале между излучателем (светодиодом D_1) и приемником (фотодиодом D_2), оптические оси которых совпадают. Рабочий спектральный диапазон фотодиода PD423-3C составляет 0.4–1.2 мкм. Сопротивления, через которые протекают опорный ток и ток питания светодиода, относятся к классу прецизионных компонентов с низким значением температурного коэффициента сопротивления.

Усилитель M_3 преобразовывает поступающие на его инвертирующий вход токи в выходное напряжение. С выхода усилителя сигналы через разделительную RC-цепь (фильтр высоких частот) подаются на компаратор M_4 , определяющий полярность, для чего его другой вход соединен с общей точкой схемы. Так как основной функцией разделительной цепи является исключение в сигналах постоянной составляющей с меньшими искажениями формы передаваемых сигналов, постоянную времени цепи выбирают в 10 раз большей длительности управляющего АИМ-импульса.

Управление модуляциями и функционирование прибора по описанному выше алгоритму осуществляет микроконтроллер M_5 . 10-разрядный цифровой код широтно-импульсного сигнала с

выходов МК по последовательному интерфейсу SPI передается на персональный компьютер для отображения результатов измерения.

Микроконтроллер также позволяет произвести настройку на максимальное значение шкалы измерителя (крутизна передаточной характеристики) в полуавтоматическом режиме по следующему алгоритму. Кювета заполняется калибровочным раствором, определяющим верхнюю границу диапазона измерения. Микроконтроллером длительность широтно-импульсного сигнала $t_{ШИМ}$ устанавливается равной t_{AIM} . Далее, регулировкой подстроечного резистора в цепи протекания опорного тока достигается равенство напряжений на входе компаратора в разные полупериоды амплитудно-импульсной модуляции, что вызывает на его выходе частые (случайно повторяющиеся) переходы между состояниями логического нуля и единицы. Момент равенства напряжений также можно наблюдать на экране осциллографа, подключенного к входу компаратора, как исчезновение напряжения с частотой АИМ.

Характеристики измерителя проверялись с использованием калибровочных растворов с постоянно изменяющейся концентрацией вещества (ионов железа в водных растворах, 0.1, 0.2 мг и т.д.). В расчетах результатов измерений использовался дифференциальный метод: сначала регистрировался сигнал кюветой с дистиллированной водой, затем – кюветой, заполненной исследуемой жидкостью, и бралась разность показаний. Достоинства этого метода заключаются в том, что исключается влияние на точность измерений таких факторов, как медленное изменение мощности излучения светодиода и чувствительности фотодиода. Максимальное значение нелинейности передаточной характеристики измерителя

для полного диапазона измерения не превысила 3–4 младших разрядов 10-разрядного кода длительности $t_{\text{ШИМ}}$.

В зависимости от устанавливаемого в схему светодиода могут выполняться измерения в том или ином спектральном диапазоне. Если измерения необходимо выполнять в различных участках спектра, можно либо использовать светодиоды, имеющие в одном корпусе несколько излучателей с различными длинами волн (например, с двумя или тремя светоизлучающими переходами), и применением фотодиода с достаточной чувствительностью в широком диапазоне волн, либо построением нескольких измерительных автономных каналов, подобных рассмотренному в статье, и установкой в каждом канале излучателя с заданным спектральным составом.

Описанная модификация нулевого метода измерений может использоваться не только в портативных, малогабаритных измерителях, но и в более сложных автономных и стационарных приборах для исследования спектральных свойств различных прозрачных и полупрозрачных сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Филатов А.В.* // ПТЭ. 1996. № 3. С. 87.
2. *Мирский Г.Я.* Электронные измерения. М.: Радио и связь, 1986.
3. *Мейзда Ф.* Электронные измерительные приборы и методы измерений. М.: Мир, 1990.
4. *Достал И.* Операционные усилители. М.: Мир, 1982.