

плоскости  $X-Y$ , замена масла затруднена. Вследствие повышенного сопротивления протекания масла, повышаются требования к жесткости конструкции датчика, а также возникает временная задержка при считывании показаний. Для снятия затруднений проточности масел по трем пространственным осям  $X-Y-Z$  существенные преимущества имеет сетчатый и в большей степени спиралевидный датчики.

Измерения  $\text{tg}\delta$  проводили с использованием прибора Е7-25, производства Республики Беларусь (МНИПИ). Прибор позволяет регистрировать значения  $\text{tg}\delta$  при величине измерительного синусоидального сигнала 700 мВ и 40 мВ, а также величины эквивалентных сопротивлений и емкостей для последовательных и параллельных вариантов их соединения.

В диапазоне частот 25 Гц – 1 кГц значения  $\text{tg}\delta$  находятся в пределах 0,25 – 0,025 и убывают с ростом частоты обратно пропорционально.

Характерно, что численные значения  $\text{tg}\delta$  для всех использованных конструкций датчиков отличаются друг от друга не более, чем на 5 %.

Полученные результаты, по нашему мнению, связаны со следующим.

В общем случае величина заряда, накопленного в конденсаторе, может быть отображена следующим образом:

$$Q = CU = \varepsilon_0 \varepsilon \int EdS. \quad (1)$$

Формальное определение величины тока в цепи отображается таким образом:

$$I = U/R = \sigma \int EdS. \quad (2)$$

Разделив (1) на (2), получим

$$RC = \varepsilon_0 \varepsilon / \sigma. \quad (3)$$

Произведение  $RC$  входит в формулу для определения величины  $\text{tg}\delta$  и, как видно из (3), никак не связано с геометрическими размерами датчиков, а определяется лишь диэлектрической проницаемостью ( $\varepsilon$ ) и электропроводимостью ( $\sigma$ ) масла. Незначительные отличия показаний датчиков связаны с краевыми эффектами, которые в вышеприведенных формулах не учитываются.

1. Батурля И.В., Кузьмич А.И., Баранов В.В., Петрович В.А., Серенков В.Ю., Завацкий С.А., Фоменко Н.К., Ковальчук Н.С. Диэлектрические характеристики моторных масел для силовых агрегатов, измеряемые емкостными датчиками // Доклады БГУИР. – 2016, № 3 (97). – С. 103–106.
2. Кузьмич А.И., Радевич Е.И., Петрович В.А., Баранов В.В., Серенков В.Ю. Датчики контроля электрофизических свойств жидких диэлектриков // МНПК «Современные информационные и электронные технологии», 22–26 мая 2017. – Одесса, Украина.

УДК 621.382

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ФОТОПРИЕМНИКОМ КОМПЕНСАЦИОННОГО ТИПА

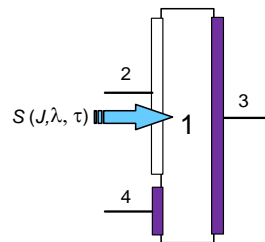
Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Жуковский П.<sup>2</sup>, Опеляк М.<sup>2</sup>, Свистун А.И.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>, Буйневич М.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Люблинский технический университет, Люблин, Польша

Многие измерительные преобразователи выполняются на основе микроконтроллеров со встроенными или внешними модулями аналого-цифрового преобразования (АЦП). Системы дистанционного контроля и диагностики широко используют различные фотоэлектрические преобразователи. Многофункциональные одноэлементные фотоприемники (ФП) с двумя потенциальными барьерами [1], образованные двумя встречно включенными диодами Шоттки и разделенные длинной базой (рисунок 1), позволяют измерять не только интенсивность монохроматического оптического излучения, но и его длину волны [2, 3].

Измерение при этом производится компенсационным способом – измеряемое значение длины волны соответствует величине компенсирующего напряжения  $U_D$ , прикладываемого к фотоприемнику, по достижению условия равенства нулю выходного тока  $j$  (рисунок 2).



- 1 – полупроводник; 2 – полупрозрачный контакт Шоттки; 3 – тыльный контакт Шоттки;
- 4 – управляющий электрод

Рисунок 1 – Структура одноэлементного двухбарьерного фотоприемника

Общий алгоритм измерения интенсивности и длины волны оптического излучения [2], использующий компенсационные способы измерения, описан применительно к аналоговым средствам измерения. Аналого-цифровой измерительный преобразователь характеристик оптического излучения по параметрам: интенсивность и длина

волны, может быть выполнен по схеме, основой которой является микроконтроллер со встроенным аналого-цифровым преобразователем АЦП (рисунок 3). Нормированный сигнал для АЦП микроконтроллера МК формирует согласующее устройство СУ. Микроконтроллер, в зависимости от полярности и амплитуды выходного сигнала фотоприёмника изменяет цифровой код на входе цифро-аналогового преобразователя ЦАП.

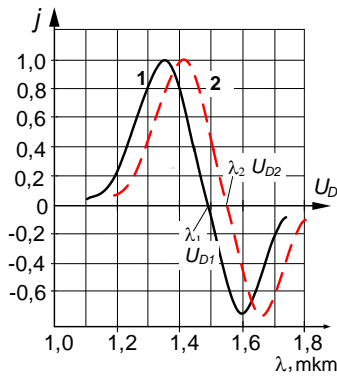


Рисунок 2 – Спектральная характеристика чувствительности двухбарьерного фотоприемника (Ni-nGe(Cu)-Ni)

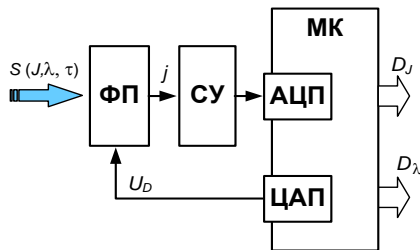


Рисунок 3 – Измерительный преобразователь с фотоприемником компенсационного типа

При достижении условия равенства нулю выходного сигнала ФП  $j$  микроконтроллер фиксирует код на входе ЦАП и передает его в порт выхода данных длины волны излучения  $D_\lambda$ . Таким образом, измерительный преобразователь формирует два выходных сигнала, соответствующих длине волны измеряемого оптического сигнала  $S$ : аналоговый – в виде величины компенсирующего напряжения  $U_D$ , и цифровой – в виде цифрового кода  $D_\lambda$ .

При использовании традиционных методик и алгоритмов измерения такой измерительный преобразователь будет иметь различное время преобразования, в зависимости от разности значений формируемых кодов: в предыдущем и текущем измерениях. При этом будут формироваться и различные периоды между отсчетами, либо период между отсчетами нужно будет выбирать по наихудшему значению.

Устранить этот недостаток позволяет использование «преобразования с предсказанием», применяемого, например, в каналах связи с дифференциальной импульсно-кодовой модуляцией

[4]. Применение этого метода тем эффективнее, чем сильнее корреляционные связи между близкими отсчетами, следовательно, можно точнее сформировать сигнал предсказания. При сильных корреляционных связях значение принимаемого информационного сигнала может быть предсказано по одному предыдущему отсчёту.

В этом случае измерительный преобразователь на базе МК фактически представляет собой адаптивную систему, в которой для уменьшения времени преобразования используют переменный шаг формирования входного кода для ЦАП уравнивания в зависимости от текущих статистических характеристик измерительного сигнала. Величиной шага квантования управляет микроконтроллер, который сейчас вырабатывает код для ЦАП не с нуля, а с предыдущего значения. При этом, управляющим фактором изменения кода является знак приращения.

Если измерительный сигнал не изменяется, то в подряд следующих отсчетах знак приращения  $u(k)$  постоянно меняется, код через каждый отсчет попеременно изменяется на  $\pm 1$ , выходной код в среднем остается неизменным с шумом квантования  $\pm 1$  младшего значащего разряда (МЗР). Время преобразования минимально и соответствует одному такту формирования кода для ЦАП.

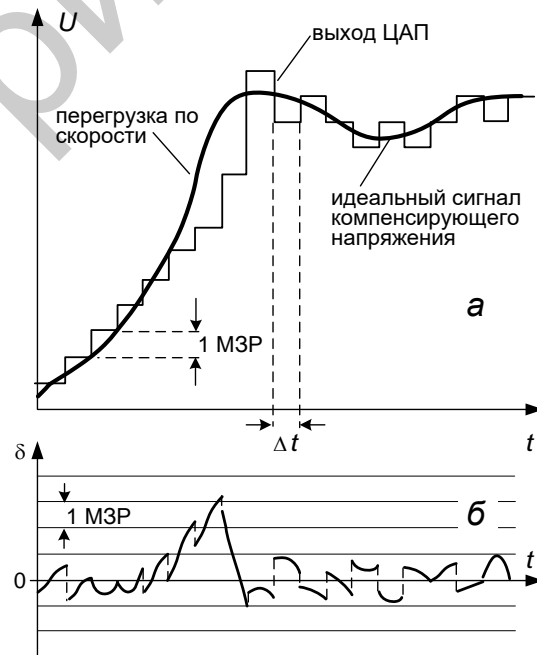


Рисунок 4 – Диаграмма работы адаптивного измерительного преобразователя компенсационного типа (а) и ошибка преобразования (б)

Если знак приращений  $u(k)$  остаётся неизменным в течение трёх-четырёх интервалов дискретизации, то это означает наличие перегрузки преобразования по скорости (рисунок 4). Микроконтроллер удваивает амплитуду импульсов. Если и в этом случае знак приращения (сигнала ошибки) не изменится, то размер шага снова

удваивается и т.д. [4]. При изменении знака приращения размер шага квантования уменьшается. Таким образом, микроконтроллер управляющий размером шага квантования должен анализировать плотность сигнала знака приращений  $y(k)$ . На выходе ЦАП при изменении коэффициента усиления в зависимости от плотности сигнала знака приращений  $y(k)$  будет формироваться ступенчатое напряжение с адаптивно изменяющимся шагом квантования. При этом, время преобразования не будет превышать нескольких интервалов дискретизации, но придется мириться с эпизодически появляющейся ошибкой до четырёх значений МЗР.

Преобразователь с фотоприемником компенсационного типа и использование «преобразования с предсказанием» характеризуется малым временем преобразования (несколько интервалов дискретизации) и шумом дискретизации около  $\pm 2$  МЗР.

Описанный измерительный преобразователь может использоваться не только с

фотоприемниками, но и с другими сенсорами, использующими компенсационные способы формирования измерительного сигнала.

1. Vorobey, R.I. / R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky, A.I. Svistun, L.I. Shadurskaya, N.V. Yarzhebetskaya, K. Kierczynski // Photoelectric semiconductor converters with a large dynamic range. // Przegląd elektrotechniczny, – Nr 5/2014, – Pp. 75–78.
2. Гусев, О.К. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / О.К. Гусев [и др.]; под общ. ред. О.К. Гусева. – Минск: БНТУ, 2010. – 582 с.
3. Гусев О. К., Тявловский К. Л., Воробей Р. И., Свистун А. И., Шадурская Л. И. Фотоприемники на основе собственных полупроводников для построения измерительных преобразователей. // Метрология и приборостроение. – 2017. – № 2. – С. 34–42.
4. Зюко, А.Г. Теория электрической связи. А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, В.И. Коржик, М.В. Назаров; под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 1998. – 432 с.

УДК 621.382

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПАРАТОР НА БАЗЕ ДВУХБАРЬЕРНОГО ФОТОПРИЕМНИКА С ДЛИННОЙ БАЗОЙ

Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Жуковский П.<sup>2</sup>, Зданович С.В.<sup>1</sup>, Колтунович Т.<sup>2</sup>, Опеляк М.<sup>2</sup>, Свистун А.И.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>, Шадурская Л.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Люблинский технический университет, Люблин, Польша

Оптические компараторы применяют для контроля изделий методом сравнения изображения изделия с эталонным изображением. Применяя светофильтры, ошибки разного знака можно характеризовать различными цветами, что обеспечивает повышение чувствительности, но не снижает утомляемости и не исключает субъективных оценок оператора [1]. В оптико-электронных компараторах сравниваются не собственно изображения, а сигналы, несущие информацию о наиболее важных свойствах изображения. В простейшем случае используются два фотоприёмника, сигналы с выхода которых поступают на входы обычного электронного компаратора для формирования признака равенства оптических сигналов в виде выходного электрического сигнала заданного уровня. Недостатком таких компараторов является низкое быстродействие и невозможность сравнения оптических сигналов по нескольким параметрам одновременно. Оптические компараторы, образованные связанными волноводными разветвлениями [2], характеризуются высоким быстродействием, но имеют сложную конструкцию, приводящую к оптическим потерям и также не позволяют сравнивать изображения по нескольким параметрам.

Некоторые многофункциональные одноэлементные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) [3], например, поверхностно-барьерные структуры с двумя потенциальными барьерами, сформированные с противоположных сторон приборной структуры, и образующие два встречно включенных диода Шоттки разделенных длинной базой (рисунок 1,а), демонстрируют немонотонную зависимость (рисунок 1,б) выходного сигнала от длины волны  $\lambda$ , интенсивности света  $I$ , величины приложенного напряжения  $V$  и геометрического смещения  $\Delta z$ , спроецированного изображения от фронтальной к тыльной плоскости структуры [4]. Такая структура представляет собой по существу функциональный преобразователь, в котором взаимосвязь четырех параметров  $I$ ,  $\lambda$ ,  $V$ ,  $\Delta z$  дает возможность функционального выражения одной физической величины через другую (или совокупность нескольких величин) и использования прибора в качестве фотоприемника для сравнения интенсивностей излучения в разных спектральных диапазонах, детектора длины волны монохроматического излучения и др. приема и передачи информации, координатно-чувствительного элемента.