

ЛАБОРАТОРНЫЙ ОБРАЗЕЦ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО МНОГОПороГОВОГО ПРИБОРА КОНТРОЛЯ АВАРИЙНЫХ И ПРЕДАВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ВО ВЗРЫВООПАСНОЙ АТМОСФЕРЕ

Е.С. Повернов, Д.А. Герасимов, Е.В. Сыпин, Н.Ю. Тупикина, А.Н. Павлов

В статье рассматривается процесс разработки лабораторного образца быстродействующего многопорогового прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций. Приведено описание оптической системы прибора и электронной части. Рассмотрена методика определения времени срабатывания прибора с помощью экспериментальной установки для проведения взрывов пылегазовоздушных смесей. Представлены результаты экспериментов.

Ключевые слова: обнаружение взрывов в газодисперсных средах, оптико-электронная система, прибор многопороговый.

Введение

Современное техническое оснащение потенциально опасных производств ориентировано в немалой степени на обеспечение безопасности и предотвращение аварийных ситуаций. Возгорание и взрывы – наиболее распространенный тип аварийных ситуаций. Большинство современных датчиков ориентированы на регистрацию уже начавшегося процесса горения. Не смотря на то, что этому процессу предшествует ряд других (в частности, локальный разогрев), их анализ не ведется. В то же время, оперативный контроль позволил бы не только обнаружить возгорание, но и предотвратить его. Таким образом, создание быстродействующих приборов, ориентированных на обнаружение очага взрыва и пожара на ранней стадии, с возможностью прогнозирования аварийных си-

туаций и принятия превентивных противоаварийных мер, является важной и актуальной задачей. Целью работы является разработка лабораторного образца быстродействующего многопорогового прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций.

При этом необходимо решить ряд частных задач:

- разработать структурную схему прибора;
- выполнить проектирование и расчет оптической системы;
- определить состав комплектующих, используемых для реализации прибора;
- провести эксперименты по определению времени срабатывания.

Описание установки

На рисунке 1 представлена структурная схема лабораторного образца быстродей-

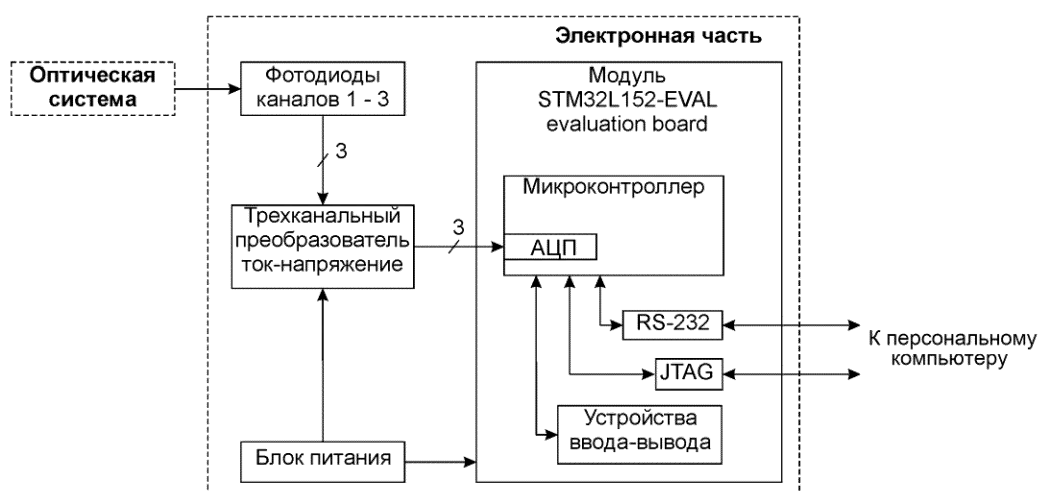


Рисунок 1 - Структурная схема лабораторного образца быстродействующего многопорогового прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ОБРАЗЕЦ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО МНОГОПороГОВОГО ПРИБОРА КОНТРОЛЯ
АВАРИЙНЫХ И ПРЕДАВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ВО ВЗРЫВООПАСНОЙ АТМОСФЕРЕ

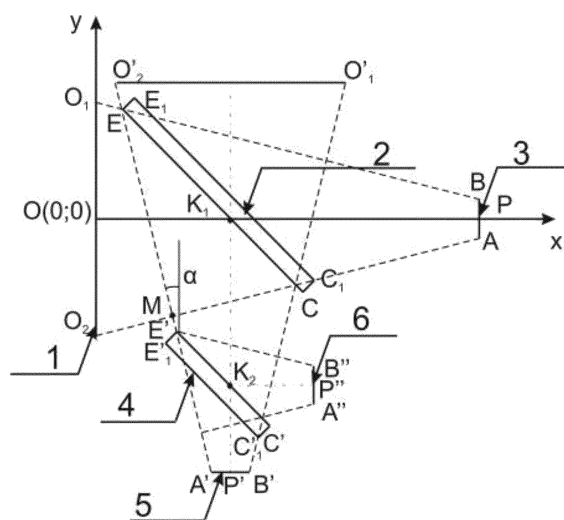
ствующего многопорогового прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций (далее – лабораторного образца).

Лабораторный образец состоит из двух частей:

- оптической системы;
- электронной части.

Оптическая система

Структурная схема оптической системы представлена на рисунке 2. В целях реализации многопороговости, оптическая схема прибора является трехканальной. Трехканальная реализация обеспечивает быстрое и точное обнаружение очага возгорания или взрыва пирометром спектральных отношений (каналы с приемниками 3 и 5) и обнаружение нагретых объектов радиационным пирометром (канал с приемником 6).



1 – собирающая линза; 2, 4 – полосовые интерференционные светофильтры; 3, 5, 6 – приёмники излучения

Рисунок 2 - Структурная схема оптической части многопорогового прибора на базе интерференционных полосовых светофильтров

С целью уменьшения количества элементов в оптической системе прибора в схеме использованы интерференционные полосовые светофильтры.

Был выполнен расчет оптической схемы. Цели расчета: найти размеры светофильтров (высоту и ширину) и их положение относительно собирающей линзы, а также положение фотоприёмников в оптической системе.

При расчетах и построении необходимо рассмотреть все возможные положения точек, находящихся в поле зрения прибора. Поэтому будем считать, что изображение, проецируется линзой не в точку, а некоторую совокупность точек, расположенную на чувствительной площадке фотоприёмника. При этом

характерные размеры фотоприёмника (диаметр или длина стороны) должны быть одинаковыми для всех каналов для того, чтобы обеспечить одинаковые световые пучки для каждого канала прибора. Поэтому предположительно в каждом канале будут использоваться одинаковые фотоприёмники.

Для упрощения расчётов можно представить световой пучок, формируемый линзой в пространстве, как прямой усеченный конус с основанием O_1O_2 и вершиной АВ (рисунок 2). Это верно в случае, если чувствительная площадка фотоприёмника представляет собой круг. В этом случае в сечении светофильтра будет формироваться эллипс. Очевидно, что если изготовить светофильтр прямоугольной формы, так, чтобы в него был вписан данный эллипс, то в этом случае при любой форме фотоприёмника с характерным размером АВ (например, квадрат со стороной АВ) весь световой поток, попадающий на фотоприёмник, будет проходить через светофильтр. Поэтому предлагаемая методика расчета будет справедлива как для фотоприёмника, имеющего чувствительную площадку в форме круга, так и для приёмника с квадратной чувствительной площадкой.

Положение светофильтров в оптической системе и их габаритные размеры определяются для светофильтров, установленных под углом к оптической оси, точками пересечения передней и задней плоскостей светофильтра с образующими светового конуса. Для светофильтра, установленного перпендикулярно оптической оси, такими точками будут точка пересечения передней (или задней) плоскости светофильтра с образующей светового конуса и точка прохождения оптической оси через центр передней (или задней) плоскости светофильтра. Применительно к рисунку, такими характерными точками будут:

- для светофильтра 2 – E и C1;
- для светофильтра 4 – E' и C'1.

Положение фотоприёмников определяют точки прохождения оптической оси системы через центр чувствительной площадки фотоприёмников – точки P, P' и P''.

Расчет положения и размеров ведётся последовательно для всех светофильтров. На положение светофильтров и их размеры накладываются следующие ограничения (рисунок 2):

- светофильтр 4 не должен пересекать световой пучок, формируемый линзой 1 на отрезке между линзой и светофильтром 2;
- светофильтры 2 и 4 не должны соприкасаться друг с другом;

РАЗДЕЛ 4. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

- светофильтр 2 не может быть расположен левее плоскости расположения линзы 1.

Из выбранной оптической системы (рисунок 2) следуют следующие требования:

- расположение фотоприёмников в задней фокальной плоскости собирающей линзы должно быть симметрично относительно оптической оси линзы, что обеспечивает максимальный размер зоны полного излучения и достаточно большое угловое поле прибора;
- светофильтры необходимо расположить под углом 135° с положительным направлением оси x , что позволяет минимизировать габаритные размеры оптической системы. При выборе угла между оптической осью и фильтром 2 учитывалось проведенные ранее расчёты по расположению элементов в аналогичных системах: угол 135° является оптимальным с точки зрения минимизации габаритных размеров оптической системы и уменьшения отражения потока излучения обратно через линзу. Фильтр 4 необходимо располагать под углом 45° или 135° к оси оптической системы, так как расположение под другим углом может привести к увеличению габаритных размеров или отражению потока излучения на фильтр 2

Исходными данными для габаритного расчёта оптической системы являются:

- диаметр (D) и фокусное расстояние (F) собирающей линзы;
- характерный размер (диаметр или длина стороны) чувствительной площадки фотоприёмников (L);
- толщина всех светофильтров (t);
- технологические зазоры s_1 и s_2 (технологический зазор s_1 определяется как минимальное расстояние от светофильтра 2 до плоскости линзы 1, а технологический зазор s_2 – как минимальное расстояние между образующей светового конуса, формируемого линзой и ближайшей точкой E' светофильтра 4).

Исходя из опыта выполнения работ по проектированию оптико-электронных приборов [1, 2] в качестве исходных данных были выбраны следующие значения:

- диаметр собирающей линзы, D : 60 мм;
- фокусное расстояние собирающей линзы, F : 100 мм;
- длина стороны фотоприёмника, L : 10 мм;
- толщина светофильтров, t : 4 мм;
- технологические зазоры s_1 и s_2 : 6 мм.

В результате проведенных расчётов были полученные конструктивные размеры и характерные точки расположения элементов оптической системы прибора:

- размеры светофильтра 2, высота×ширина: 65,76×46,5 мм;
- размеры светофильтра 4, высота×ширина: 32,65×23,09 мм;
- координаты точки K_1 : (36; 0)
- координаты точки K_2 : (36; -43,9)
- координаты точки P : (100; 0)
- координаты точки P' : (36; -64)
- координаты точки P'' : (56,1; -43,9)

После выполнения компоновки и расчёта основных габаритных размеров и координат характерных точек элементов оптической системы прибора была разработана рабочая конструкторская документация прибора.

Для упрощения изготовления оптической части прибора была разработана ее 3D-модель (рисунок 3).

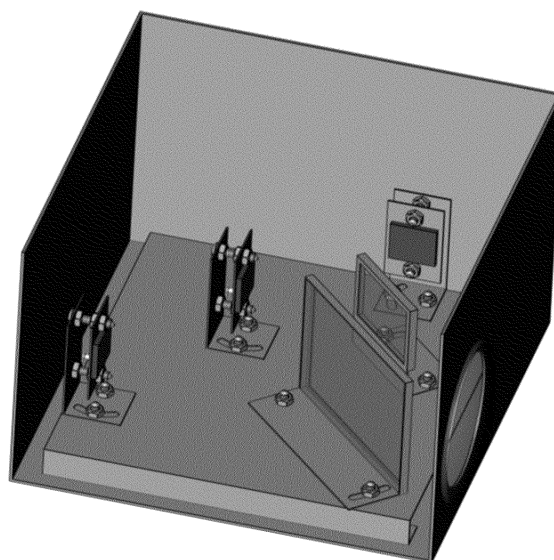


Рисунок 3 - 3D-модель оптической части прибора

Электронная часть лабораторного образца

Разработка структурной схемы электронной части (рисунок 1) выполнена с учетом того, что в качестве блока обработки информации используется модуль STM32L152-EVAL evaluation board [3].

Непосредственное подключение фотодиодов ко входам модуля STM32L152-EVAL evaluation board невозможно по следующим причинам:

- аналогово-цифровой преобразователь микроконтроллера ориентирован на преобразование в код значения напряжения, а не тока;

ЛАБОРАТОРНЫЙ ОБРАЗЕЦ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО МНОГОПороГОВОГО ПРИБОРА КОНТРОЛЯ
АВАРИЙНЫХ И ПРЕДАВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ВО ВЗРЫВООПАСНОЙ АТМОСФЕРЕ

- ток, формируемый фотодиодами, имеет малое значение (согласно результатам предварительного энергетического расчёта прибора, минимальная величина тока составляет порядка 1 пА, максимальная – порядка 0.1 мА) [4].

Как следствие, его непосредственное преобразование в цифровой код приведет к высокой погрешности, значение которой может достигать 100%.

Таким образом, для подключения фотодиодов необходим преобразователь ток-напряжение, который в данной схеме является нестандартным элементом. Схема электрическая принципиальная преобразователя разработана в среде KiCad EDA Suite [5].

Сигналы с выходов преобразователя поступают на входы аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера. После преобразования в двоичный код и обработки результаты передаются на персональный компьютер через последовательный порт по протоколу RS-232. Детальная обработка данных осуществляется на персональном компьютере с помощью специального разработанного программного обеспечения.

Следующим этапом работ было экспериментальное определение времени срабатывания прибора при обнаружении очага возгорания.

Определение времени срабатывания

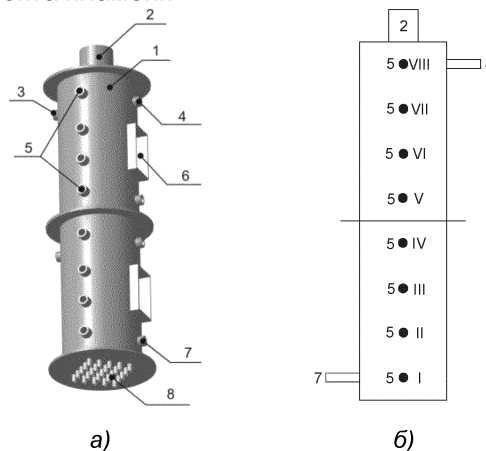
Для определения времени срабатывания использовалась экспериментальная установка для проведения взрывов пылегазовоздушных смесей [6]. Ниже представлены 3D-модель установки (рисунок 4, а) и схема расположения датчиков (рисунок 4, б).

При определении времени срабатывания испытываемый многопороговый прибор устанавливается в полость крышки реакционного сосуда 2 направлением объектива в сторону дна реакционного сосуда.

По длине реакционного сосуда расположены восемь патрубков 5 для установки блоков датчиков (рисунок 5) регистрации параметров горения газовой смеси (температуры, интенсивности излучения и динамики движения фронта пламени).

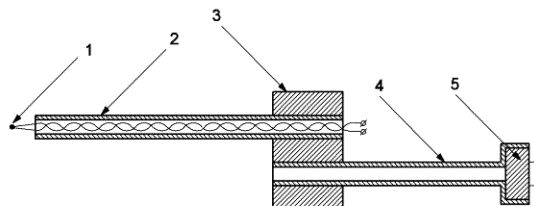
Датчик, устанавливаемый в патрубок I (см. рисунок 4, б), обеспечивает регистрацию параметров начала развития очага горения. Электровоспламенитель располагается на одном уровне с этой точкой и вводится через патрубок 7 (см. рисунок 4). Датчик, устанавливаемый в патрубок VIII, служит для оценки параметров горения вблизи испытываемого прибора. В остальные патрубки (II – VII, на рисунке 4, б) установлены датчики, которые

используются для оценки скорости движения фронта пламени



1 – реакционный сосуд; 2 – крышка для установки датчика; 3 – патрубок для впуска пыли; 4 – патрубок для впуска газа; 5 – патрубки для установки измерительных датчиков; 6 – окна для сброса давления; 7 – патрубок для ввода поджигателя; 8 – зарезервированные для дальнейших исследований патрубки

Рисунок 4 – Установка для определения времени срабатывания



1 – спай термопары; 2 – гильза для термопары; 3 – пробка; 4 – гильза для фотоприемника; 5 – фотоприемник.

Рисунок 5 – Схема блока датчиков

Для обработки сигналов с фотодиодов и термопар выбран модуль АЦП, выпускаемый компанией ООО «Л Кард» [7] LTR11, устанавливаемый в крейт LTR U-1-4. Указанный модуль удовлетворяет всем выдвигаемым к АЦП техническим требованиям.

Для полноценного функционирования системы сбора и обработки измерительной информации в состав экспериментальной установки введено звено, обеспечивающее автоматизированный запуск эксперимента (поджигание газозвоздушной смеси в реакционном сосуде), синхронизацию всех блоков системы, а также опрос термопар. Для реализации указанных функций оптимальным решением является использование программируемого логического контроллера. В ходе анализа предложений на рынке предпочтение было отдано продукции российской компании ОВЕН [8]. В качестве контроллера использу-

РАЗДЕЛ 4. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

ется ПЛК 150-AM. Для получения сигналов с измерительных датчиков контроллером ПЛК 150-AM применяются специальные модули ввода сигналов. Структурная схема автоматизированной системы управления установкой представлена на рисунке 6.

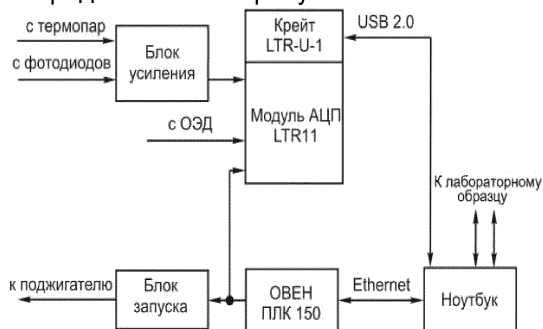


Рисунок 6 – Структурная схема автоматизированной системы

Центральным звеном системы является ноутбук с установленным специальным программным обеспечением для управления экспериментом, сбора и обработки измерительной информации.

В зависимости от вида проводимого эксперимента система комплектуется необходимым количеством измерительных датчиков (термопар и фотодиодов). Сигнал на запуск эксперимента подается с ноутбука, после чего управление передается контроллеру ПЛК 150-AM. ПЛК 150-AM, согласно управляющему алгоритму, выставляет сигнал высокого уровня на дискретном выходе, к которому подключен блок запуска и вход внешней синхронизации модуля АЦП, а также запускает преобразование сигнала с термопар. Таким образом, синхронизируется момент поджигания рабочей смеси и момент начала преобразования информации с измерительных датчиков. Измерительная информация поступает по стандартным интерфейсам на ноутбук для дальнейшей обработки.

Внутренний объем реакционного сосуда равен 400дм^3 . При каждом эксперименте в трубу закачивался (через патрубок 4) определенный объем пропана (достигалась стехиометрическая смесь пропана с воздухом [9]), а перед воспламенением выдерживалось время для равномерного смешивания пропана с воздухом. Общий объем закачиваемого в установку пропана составляет 16 л.

В качестве инициатора горения использовался электровоспламенитель ЭВФ-1[10].

При прохождении пламени наибольшие температуры (в диапазоне от 850 до 950 °С) были зафиксированы в нижней точке. Распределение температур по другим точкам

показало тенденцию к снижению температуры при удалении от источника возгорания. Это может быть объяснено охлаждением газа и продуктов горения за счет теплопереноса к стенкам трубы по мере движения по трубе, а также конвекцией. К такому же выводу можно прийти, анализируя измеренные скорости движения фронта пламени на различных участках. Обработка сигналов от оптических датчиков организована таким образом, что на диаграмме отображаются моменты максимальной интенсивности излучения, зарегистрированные оптическими датчиками. Средние скорости движения фронта пламени по реакционному сосуду приведены в таблице 1.

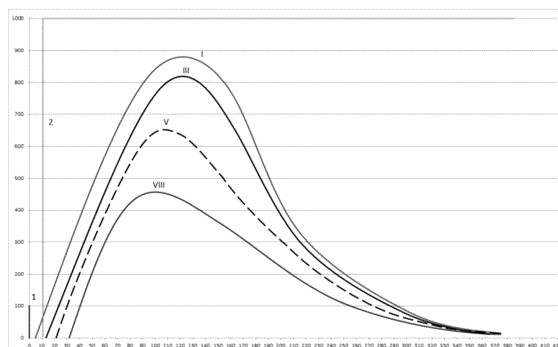
Таблица 1. Средние скорости фронта пламени на участках реакционного сосуда

Участок между точками контроля	Средняя скорость фронта (м/с)
I-II	84,9
II-III	78,4
III-IV	70,3
IV-V	64,8
V-VI	60,6
VI-VII	58,1
VII-VIII	57,2

Из таблицы видно, что по мере удаления от источника возгорания скорость движения фронта пламени снижается.

Помимо регистрации контролируемых параметров газовой смеси, также проводилась регистрация сигнала, подаваемого на воспламенитель, и сигнала, формируемого исследуемым прибором при обнаружении очага возгорания. Анализ совокупности этих сигналов позволяет определить быстродействие прибора.

На рисунке 7 представлены графики температур для датчиков I, III, V, VIII, полученные после математической обработки значений, полученных в ходе проведения серии из 10 испытаний прибора.



1 – активация воспламенителя; 2 – момент регистрации прибором начала возгорания.

Рисунок 7 – Графики изменения температур для датчиков I, III, V, VIII

ЛАБОРАТОРНЫЙ ОБРАЗЕЦ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО МНОГОПороГОВОГО ПриБОРА КОНТРОЛЯ АВАРИЙНЫХ И ПРедАВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ВО ВзРывОопасной АтмосФЕРЕ

Максимальная температура термопар, зарегистрированная при испытании, представлена в таблице 2.

Таблица 2. Температуры термопар в контролируемых точках

Номер точки контроля	Максимальная температура, °С
I	880
II	860
III	820
IV	790
V	650
VI	590
VII	510
VIII	460

Очевидно, что температуры спаев термопар не соответствуют действительным значениям температуры газа, однако при помощи специального математического аппарата (в данной работе не рассматривается) можно с достаточной точностью оценить действительные значения и динамику их изменения [11].

Заключение

В результате проделанной работы был спроектирован и изготовлен лабораторный образец быстродействующего многопорогового прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций во взрывоопасной атмосфере, при этом решен ряд частных задач:

- разработана структурная схема прибора;
- спроектирована и рассчитана оптическая система;
- определен состав комплектующих, используемых для реализации прибора;
- проведены эксперименты по определению времени срабатывания.

Многочисленное проведение экспериментов показало высокую повторяемость результатов. При этом среднее время регистрации очага возгорания тестируемым прибором составляет порядка 11 миллисекунд.

Данное время соответствует работе прибора в режиме обнаружения потенциально опасного локального разогрева. В данном режиме программно ведется не только определение температуры, но и отслеживание динамики ее изменения. Данный процесс занимает большую часть времени (порядка 8-10мс) и поэтому в режиме обнаружения очага возгорания не выполняется. При этом время регистрации возгорания составляет 1,8 миллисекунд, что соответствует требованиям, предъявляемым к прибору.

Работа выполнена в рамках программы «СТАРТ» (государственный контракт №10042р/17056 от 01.02.2012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сыпин, Е.В. Оптическая система датчика двумерных координат очага возгорания на основе волоконно-оптического преобразователя / Е.В. Сыпин [и др.]. // Датчики и системы. – 2010 – №7. – С. 15–17.
2. Сыпин, Е.В. Построение пирометрического датчика очага возгорания на основе спектроделителя / Е.В. Сыпин [и др.]. // Современные техника и технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С.172–173.
3. STMicroelectronics group of companies. STM32L152-EVAL evaluation board – data brief. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.st.com/internet/com/technical_resources/technical_literature/data_brief/cd00294551.pdf
4. Терентьев, С.А. Проектирование Лабораторного образца пирометрического датчика с цилиндрическими линзами / Терентьев С.А., Герасимов Д.А., Сидоренко А.И., Павлов А.Н., Сыпин Е.В. // Ползуновский вестник. -2012. -№ 3/2. - С.93-95.
5. KiCad // Википедия, свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/KiCad>
6. Сидоренко, А.И. Автоматизированная система управления экспериментальной установкой для проведения взрывов пылегазовоздушных смесей / А.И. Сидоренко, И.С. Зорин, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин // Измерение, контроль, информатизация: Материалы XIV международной научно-технической конференции. Том 2 / под. ред. Л.И. Сучковой. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. – С. 110–116.
7. ООО «Л КАРД». Индустриальные системы управления и сбора данных [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.lcard.ru/>.
8. ОВЕН. Оборудование для автоматизации. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.owen.ru/>.- (заглавие с экрана) (дата обращения: 27.06.2013)
9. Справочник газоснабжения. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://fas.su/index.php?page=513> (дата обращения: 10.01.2013).
10. Комплексные системы. Средства для зажигания изделий светопиротехники. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.complexsyst.ru/catalog/sredstva_initsirovaniya/dlia_svetopirotehniki/20666210 (дата обращения 19.02.2013).
11. Ярышев, Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры / Н.А. Ярышев. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

РАЗДЕЛ 4. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Ст. пр. **Е.С. Повернов** – evgeniy@bti.secna.ru;
аспирант **Д.А. Герасимов** – gda@bti.secna.ru;
к.т.н., проф. кафедры **Е.В. Сыпин** –
sev@bti.secna.ru; ст. пр. **Н.Ю. Тупикина** –
tnu@bti.secna.ru; к.т.н., доцент **А.Н. Павлов** –

pan@bti.secna.ru. - Бийский технологический институт АлтГТУ (БТИ АлтГТУ) кафедра методов средств измерений и автоматизации, (385-4)43-24-50.

УДК: 621.317

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ, ВЫЗВАННОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ АЦП

А.Н. Серов, А.А. Шатохин

Выполнен сравнительный анализ методов оценки погрешности измерения действующего значения напряжения, вызванной нелинейностью функции преобразования АЦП. Рассмотрены методы аппроксимации интегральной нелинейности АЦП. Получены условия для нелинейности, при которых погрешность измерения действующего значения максимальна. Показано, что метод, основанный на аппроксимации нелинейности полиномиальной функцией третьего порядка, дает меньшее (по сравнению с другими методами) завышение оценки погрешности. Достоверность полученных аналитических выражений подтверждена результатами имитационного моделирования, выполненного в программном пакете Matlab.

Ключевые слова: действующее значение напряжения, интегральная нелинейность АЦП, погрешность измерения, динамические параметры АЦП, полиномиальная аппроксимация.

Введение

Погрешность измерения действующего значения (ДЗ) периодического сигнала зависит от выбранного алгоритма измерения (методическая погрешность) и неидеальности элементов, на основе которых реализована измерительная цепь (инструментальная погрешность). Одним из основных источников инструментальной погрешности при измерении ДЗ сигнала является интегральная нелинейность используемого АЦП. В отличие от других источников инструментальной погрешности, данная погрешность не может быть скорректирована установкой нуля или калибровкой измерительной цепи. В дальнейшем будем считать, что инструментальная погрешность вызвана исключительно нелинейностью функции преобразования АЦП.

Для удобства представления последующих выражений примем следующие обозначения: $x = u / U_{norm}$ – нормированное мгновенное напряжение; u – мгновенное значение напряжения; U_{norm} – нормирующее значение входного напряжения (обычно соответствует входному диапазону АЦП); $y = N / N_{norm}$ – нормированный результат преобразования (код) АЦП; N – результат преобразования (код) АЦП; $N_{norm} = 2^{M-1}$ – номинальный код АЦП, соответствующий

U_{norm} (выражение записано для биполярного АЦП), N_{ADC} – число разрядов АЦП, включая знаковый.

Функции преобразования соответственно идеального и реального АЦП могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{cases} y_{ид} = x, \\ y = x + \gamma_{INL}(x); \end{cases} \quad (1)$$

где $y_{ид}$ и y – нормированные на N_{norm} выходные сигналы идеального и реального АЦП, $\gamma_{INL}(x) = \Delta_{INL}(x) / N_{norm}$ – приведенная погрешность линейности АЦП, Δ_{INL} – абсолютная погрешность линейности АЦП в единицах младшего разряда (е.м.р.).

Тогда относительная погрешность измерения ДЗ может быть представлена в следующем виде:

$$\delta = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i + \gamma_{INL}(x_i))^2} - X_{rms}}{X_{rms}}, \quad (2)$$

где ДЗ входного нормированного сигнала x :

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i^2}. \quad (3)$$

Упрощая выражение (2) и заменяя приближенно корень линейной формой, получаем следующее выражение:

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2, 2013