ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 55, № 9/3 ФИЗИКА 2012

УДК 544.45; 53.083.4; 536.46

А.С. МАМАЕВ, А.Б. КИСКИН**, В.Е. ЗАРКО***, И.К. ЖАРОВА***, В.В. КОЛОДЕЙ*, Э.Г. МИХАЛЬЦОВ**

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ МАЛЫХ СИЛ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГАЗИФИКАЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ[1]

Представлено краткое описание прецизионного измерителя малых сил, предназначенного для исследования процессов газификации конденсированных систем. Рассмотрены конструкция датчика и способ компенсации влияния вариаций диэлектрических характеристик среды на информационный сигнал при проведении экспериментов в замкнутом объеме. Приведена структурная схема прибора, на основе которой изложен принцип его работы.

Ключевые слова: *нестационарная массовая скорость горения, датчик малых сил, измерительный прибор.*

Введение

На сегодняшний день достигнут большой прогресс в моделировании горения высокоэнергетических веществ [1]. Однако остается ряд задач, решение которых с необходимой для практического применения степенью достоверности невозможно получить с помощью математических моделей. Одной из таких задач является определение нестационарной массовой скорости горения конденсированных систем. Причиной, по которой этот важнейший параметр не может быть определен на основании известных теоретических моделей с требуемой точностью, является отсутствие детального понимания механизмов физико-химических процессов, протекающих вблизи поверхности горения в слое конденсированной фазы [2, 3]. Для решения этой задачи применяют различные экспериментальные методы: скоростную киносъемку, ультразвуковую, микроволновую или лазерную интерферометрию. Каждый из указанных методов обладает как преимуществами, так и недостатками – идеального во всех отношениях метода не существует. Сложность регистрации нестационарной скорости газификации связана с тем, что фронт газификации реальных объектов не является плоским – различные участки поверхности даже гомогенного конденсированного вещества могут газифицироваться с разной скоростью, переменной во времени (очаговое выгорание, газификация компонент конденсированного вещества, образование и горение металлических агломератов и пр.). Таким образом, нестационарная скорость горения, приписываемая объекту исследования, является осредненной по поверхности характеристикой. Для регистрации характеристик такого типа оказывается более эффективным применение интегральных методов измерения, в частности метода измерения реактивной силы продуктов горения [4]. При этом следует учитывать, что существующие системы регистрации реактивной силы продуктов горения обладают рядом недостатков, главными из которых являются недостаточная разрешающая способность для ряда опытов и влияние диэлектрических характеристик окружающей датчик среды на величину выходного сигнала. В связи с этим возникает необходимость усовершенствования методики динамической регистрации малых сил и создания соответствующих измерительных приборов.

В настоящей работе представлено описание прибора нового поколения, предназначенного для динамической регистрации реактивной силы при газификации энергетических веществ, отличительными особенностями которого являются низкий уровень шума, высокая разрешающая способность, расширенная функциональность и возможность работы в полуавтоматическом режиме.

Датчик малых сил

Основным элементом конструкции датчика (внешний вид датчика представлен на рис. 1) является закрепленный при помощи пары консолей шток, движимый строго в продольном направлении. На одном конце штока размещается исследуемый образец, на другом – одна из обкладок основного конденсатора, вторая обкладка является неподвижной. Такая конструкция датчика обеспечивает преобразование реактивной силы продуктов горения исследуемого образца в соответст-

[1] Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 12-01-90704-моб_ст, 10-03-00118.

вующее изменение емкости основного конденсатора. При проведении экспериментов в замкнутом объеме в датчике возникает неконтролируемая зависимость сигнала реактивной силы от диэлектрических характеристик окружающей среды. Связанная с этим эффектом ошибка может составлять несколько процентов от уровня реактивной силы [5], что является существенным фактором, снижающим точность измерений, особенно при исследовании нестационарных процессов горения.



Рис. 1. Датчик малых сил

Для компенсации этого эффекта в датчик встроен опорный конденсатор условно постоянной емкости. При постоянных характеристиках окружающей датчик среды емкость этого конденсатора – величина постоянная. Однако емкость опорного конденсатора, как и емкость основного конденсатора, изменяется пропорционально диэлектрической постоянной окружающей среды. Таким образом, на выходе датчика получается два сигнала, один из которых пропорционален только диэлектрическим характеристикам среды, другой – сигналу реактивной силы, зависящей от диэлектрических характеристик среды. Устранение нежелательного эффекта осуществляется в измерительном мосту Уитстона, где опорный и основной конденсаторы образуют два плеча, соединенных вместе в узле измерительной диагонали, а другие два узла образуют диагональ питания. В такой «идеальной» измерительной схеме вариация диэлектрических характеристик среды не оказывают влияния на полезный сигнал [4, 6]. На практике же используются соединительные проводники, обладающие емкостью 1–2,5 пФ, что при емкости измерительного конденсатора 16–25 пФ накладывает ограничения на соотношение параметров емкостей датчика при его изготовлении.

Тестирование датчика показало смещение нулевого уровня сигнала в процессе эксперимента. Анализ результатов экспериментальной отработки прибора позволил установить, что причиной возникновения систематической погрешности является изменение геометрических размеров деталей датчика, изготовленных из разных типов материалов. Для устранения выявленного недостатка была изменена механическая конструкция датчика малых сил (ДМС).

Электронный блок емкостного преобразователя

Структурная схема прибора приведена на рис. 2.

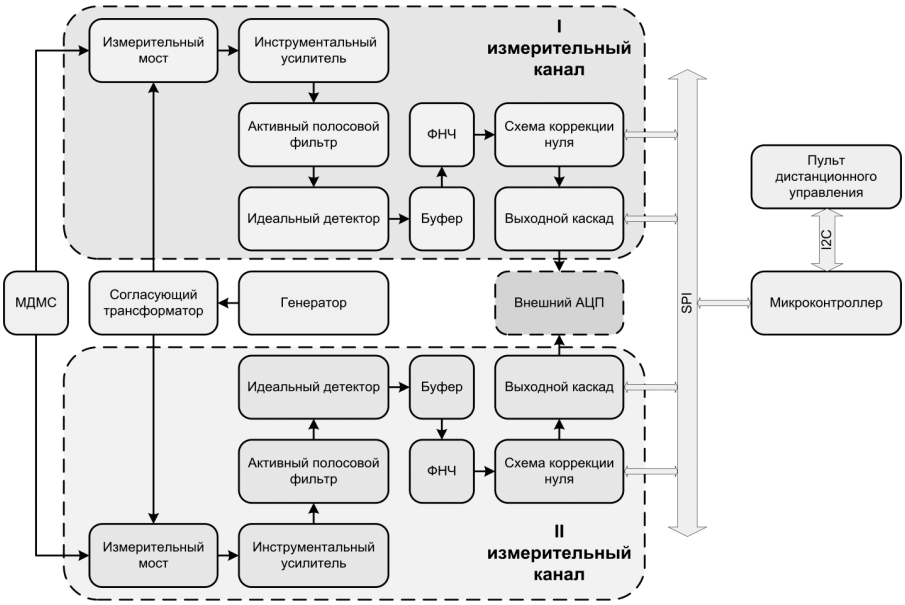


Рис. 2. Структурная схема электронного блока емкостного преобразователя

Прибор имеет два независимых идентичных измерительных канала. При подключении первого измерительного канала к основному конденсатору датчика в выходном каскаде канала формируется напряжение, пропорциональное реактивной силе продуктов газификации, зависящее от диэлектрических параметров среды. При подключении второго измерительного канала к опорному

конденсатору получаемое на выходе напряжение пропорционально диэлектрическим характеристикам среды. В результате оцифровки сигналов получается два временных графика, анализ которых дает возможность получить информацию о реактивной силе и об изменении диэлектрических характеристик среды в процессе опыта (при проведении экспериментов в замкнутом объеме).

Однако на этом функциональность устройства не исчерпана – в измерительном канале предусмотрена возможность одновременного подключения основного и опорного конденсаторов в измерительный мост. Благодаря этому достигается автоматическая компенсация зависимости реактивной силы от диэлектрических характеристик среды.

Ввиду идентичности измерительных каналов рассмотрим устройство на примере первого канала. Датчик подключается непосредственно к измерительному мосту через штыревые разъемы. При этом исключаются проводные соединения и минимизируются «паразитные» емкости, оказывающие негативное влияние на точность измерения. В начале работы необходимо выполнить балансировку измерительного моста при помощи подстройки переменного конденсатора. В сбалансированном состоянии чувствительность мостовой схемы максимальна, а напряжение в измерительной диагонали равно нулю. Под воздействием реактивной силы, или веса образца, или их суммы (в зависимости от взаимной ориентации датчика и образца при проведении измерений) изменяется емкость основного конденсатора датчика, что приводит к возникновению дисбаланса моста. В измерительной диагонали моста формируется соответствующее напряжение на уровне десятков микровольт. Дальнейшее преобразование осуществляется инструментальным усилителем.

Инструментальный усилитель собран на базе трех операционных усилителей (ОУ) по схеме, представленной на рис. 3. Достоинством выбранной схемы является высокое входное сопротивление, благодаря чему она не оказывает влияния на измерительный мост. Во избежание перехода в режим насыщения ОУ DA1 на входах инструментального усилителя установлены резисторы (R1 и R2) номиналом 1 МОм, соединенные с общим проводом. Под действием входного тока ОУ на этих резисторах формируется постоянное напряжение, которое смещает полезный сигнал в сторону отрицательных напряжений на величину порядка нескольких вольт. Поскольку рассмотренная схема обладает высоким значением величины КОСС (коэффициент ослабления синфазного сигнала), которая слабо чувствительна к точности подбора резисторов, то это смещение эффективно компенсируется в схеме дифференциального усилителя на базе ОУ DA2. В результате на выходе ОУ DA2 получаем усиленное синусоидальное напряжение с измерительного моста, поступающее на активный полосовой фильтр (АПФ).

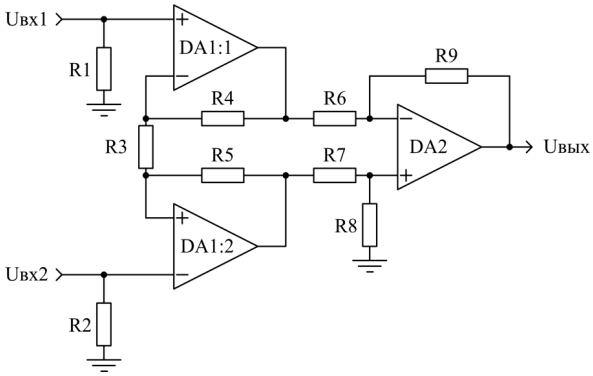


Рис. 3. Схема инструментального усилителя

Дополнительное усиление и основная фильтрация информационного сигнала от шумовой составляющей осуществляются в схеме АПФ, собранного на базе ОУ. В цепь обратной связи АПФ включен параллельный колебательный LC-контур. Во избежание перехода АПФ в режим генерации синусоидального сигнала в цепь колебательного контура добавлен постоянный резистор.

С АПФ сигнал поступает на идеальный детектор, собранный на основе ОУ и диодов Шоттки, в котором происходит его выпрямление без потери напряжения. Далее через буферный элемент выпрямленный сигнал подается на фильтр низких частот, где полоса сигнала ограничивается на уровне 2 кГц с целью минимизация шумовой составляющей и повышения отношения сигнал/шум.

Ввиду неидеальности используемых ОУ информационный сигнал может быть смещен относительно «нулевого» уровня. Скомпенсировать это смещение позволяет схема коррекции нуля. Далее сигнал поступает на выходной каскад с регулируемым коэффициентом усиления, где он масштабируется, после чего оцифровывается внешним аналого-цифровым преобразователем.

Конфигурирование и отображение состояния электронного блока осуществляется при помощи пульта дистанционного управления (ПДУ), выполненного на базе микроконтроллера Atmega168. Пульт дистанционного управления выполнен в пластиковом корпусе SOFT-CASE компании OKW (рис. 4). На дисплее ПДУ (буквенно-цифровой жидкокристаллический модуль MT-08S2A, имеющий 2 строки по 8 символов) отображаются конфигурационные коэффициенты схемы коррекции нуля и выходного усилительного каскада, которые могут варьироваться в диапазоне от 0 до 256. Оператору предоставляется выбор ручной или автоматической установки этих

коэффициентов. Также на дисплей ПДУ выводится информация об уровне заряда аккумуляторной батареи, номере конфигурируемого измерительного канала, режиме установки конфигурационных коэффициентов. При помощи выведенных на корпус ПДУ светодиодов выполняется индикация сбалансированности измерительного моста и конфигурируемого параметра.



Рис. 4. Пульт дистанционного управления



Рис. 5. Электронный блок

На рис. 5 представлено изображение электронного блока прибора, выполненного в литом алюминиевом корпусе aluCase компании «ROLEC». Для повышения отношения сигнал/шум при проектировании электронного блока применен принцип разделения «быстрых» цифровых схем, используемый в высокочувствительных аналоговых схемах. С этой целью все аналоговые элементы, отвечающие за преобразование информационного сигнала, размещены на плате аналогового модуля, а цифровые схемы, с помощью которых выполняется управление блоком, – на плате микропроцессорного модуля контроля и управления.

Заключение

Использование рассмотренного прецизионного измерителя малых сил для исследования процессов газификации высокоэнергетических веществ позволяет повысить предельную разрешающую способность электронной измерительной системы измерения малых сил до уровня $6 \cdot 10^{-7}$ Н или $4 \cdot 10^{-5}$ пФ (в абсолютных единицах). В настоящее время получена разрешающая способность на уровне $4.2 \cdot 10^{-6}$ Н, что в 7 раз превосходит аналогичный показатель прототипа с рабочей полосой 400 Гц [5, 7]. При этом рабочая полоса частот нового прибора составляет 2 кГц.

Одним из основных преимуществ данного прибора является возможность дальнейшего совершенствования его конструкции с целью улучшения технических характеристик, в том числе перспектива создания полностью автоматизированной системы измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекстед М.В. // ФГВ. – 2006. – Т. 42. – № 6. – С. 4–24.
2. Зарко В.Е., Вдовин Д.В., Перов В.В. // ФГВ. – 2000. – Т. 36. – № 1. – С. 68-78.
3. Гусаченко Л.К., Зарко В.Е. // ФГВ. – 2008. – Т. 44. – № 1. – С. 35–48.
4. Мамаев А.С., Кискин А.Б., Зарко В.Е. и др. // Вестник Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика. – 2011. – Т. 6. – Вып. 1. – С. 92–94.
5. Кискин А.Б., Симоненко В.Н. // ФГВ. – 2000. – Т. 36. – № 1. – С. 52–58.
6. Зарко В.Е., Кискин А.Б., Колодей В.В., Мамаев А.С., Михальцов Э.Г. // Патент на полезную модель № 105451 от 12 января 2011 г.
7. Михеев В.Ф., Борин С.М. // ФГВ. – 1973. – Т. 9. – № 2. – С. 327–329.

*Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН, г. Новосибирск, Россия
**Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия
***НИИ прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета, г. Томск, Россия
E-mail: Aleksej.Mamaev@gmail.com

Поступила в редакцию 10.07.12.

Мамаев Алексей Сергеевич, м.н.с.;
Кискин Александр Борисович, к.ф.-м.н., с.н.с.;
Зарко Владимир Егорович, д.ф.-м.н., зав. лабораторией;
Жарова Ирина Константиновна, д.ф.-м.н., в.н.с.;
Колодей Виктор Васильевич, с.н.с.;
Михальцов Эдуард Григорьевич, к.т.н., зав. лабораторией.