

УДК 681.2.08

О. А. Аксюта, С. И. Брынза, П. П. Завьялов

ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ РАКЕТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Приведены конструктивные предложения для датчиковой аппаратуры системы измерения, применяемой при газодинамических модельных испытаниях элементов ракетных комплексов.

Наведено конструктивні пропозиції для датчикової апаратури системи вимірювання, застосовуваної під час газодинамічних модельних випробувань елементів ракетних комплексів.

The design proposals for sensor equipment of the measurement system used during gas dynamic model tests of rocket systems elements are presented.

При наземной отработке элементов ракет и ракетных комплексов решаются среди прочих задачи контроля газодинамических процессов. Такими процессами являются, например, воздействие струи ракетного двигателя при старте на стартовое оборудование и разброс боевых элементов отсека боевого оснащения оперативно-тактической ракеты взрывным способом. Для решения задач используются системы измерений, в данном случае, газодинамических параметров – давления и температуры потока. Конструктивное оформление датчиковой аппаратуры имеет при этом свои особенности.

Первой особенностью является ограничение на размеры обрабатываемых элементов. Вследствие трудности реализации реального процесса стендовая отработка старта ракеты проводится на моделях стартового оборудования с уменьшением его действительных размеров в 10-25 раз. Отсек боевого оснащения оперативно-тактической ракеты имеет небольшие размеры. Он достаточно плотно заполнен боевыми элементами и сопровождающей аппаратурой. А количество датчиков, размещаемых в элементах ракет, для осуществления качественного контроля должно быть достаточно большим. Использование пневмотракта отбора давления позволяет вынести датчики давления за пределы обдуваемой модели, что могло бы снять ограничения на размеры датчиков. Однако при этом быстродействие датчиков уменьшается до недопустимых пределов.

В указанных условиях размещение датчиковой аппаратуры с ее стандартными габаритами становится проблематичным. Уменьшение размеров датчика давления можно осуществлять различными способами. Во-первых, уменьшением размеров самого чувствительного элемента. Для этого необходимо отказаться от динамической конструктивной схемы чувствительного элемента в пользу монокристалла. Во-вторых, исключением из схемы вторичного преобразователя сигнала, реализовав его функцию непосредственно в регистраторе. В-третьих, кабель, идущий к регистратору измерений, следует выводить из датчика без разъема. Наличие разъема на корпусе датчика требует дополнительной конструкции, что существенно увеличивает его размеры.

Второй особенностью является быстрота протекающих процессов. Время воздействия струи ракетного двигателя на стартовое оборудование в модельной постановке сокращается до 1-2 с. Взрыв, включая процесс последствия, происходит в течение 0,05-0,1 с. Поэтому регистрация измерений должна проводиться с частотой порядка 1-5 кГц. Наиболее критична ситуация с измерениями температуры. Идеальным вариантом был бы оптический измеритель. Однако он измеряет температуру поверхности плоского элемента, а в рассматриваемом случае необходимы измерения газового потока в назначенных точках. Поэтому приходится использовать обычные термпары, но провода спая в целях уменьшения

инертности прогрева выбирать как можно тоньше. Температуру потока они выдерживают, но после его воздействия материал спая в нагретом состоянии реагирует с кислородом воздуха, и со временем измеритель выходит из строя. В этом случае проконтролировать последствие газодинамического процесса не удастся. При многократных испытаниях приходится заменять такие измерители новыми.

Указанные идеи (миниатюризация датчиков) были реализованы в системах измерений, применяемых при газодинамических испытаниях (ГДИ) модели стартового комплекса РН «Циклон-4» [1] и при испытаниях разлета боевых элементов отсека боевого оснащения (ОБО) оперативно-тактической ракеты «Гром-2». Датчики подбирались по таким условиям: отечественная разработка, достаточная точность измерений, умеренная стоимость.

Давления измеряли датчиками типа ААЕИ.406929.002 разработки предприятия «Специальное конструкторско-технологическое бюро с опытным производством Института физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева» (СКТБ с ОП) [2, 3]. В качестве чувствительного элемента в них использовался полупроводниковый кремниевый пьезо-ЭДС-элемент, благодаря чему стало возможным выполнить конструкцию датчика с размерами 10-12 мм. При этом конструкция датчика позволила вывести кабель непосредственно через корпус без разъемов, не увеличивая его размеров. Поскольку значение ЭДС на выходе составляло 20-40 мВ, а кабель имел экранирование, то его длина могла не превышать 5 м, что позволяло соединить датчики с регистратором без вторичного преобразователя.

Температура измерялась датчиками разработки того же предприятия на основе термопар по ГОСТ Р 8.585-2001. При этом толщина проводов термопар δ составила во время ГДИ 0,5 мм, а при испытаниях ОБО – $\delta = 0,2$ мм (минимальная из предоставляемого ряда).

На рис. 1 показаны сравнительные размеры типовых датчиков давления и датчиков разработки СКТБ с ОП. Очевидно, что

без миниатюризации датчиков давления проведение испытаний было бы весьма затруднительным.



Рис. 1. Сравнительные размеры типовых датчиков давления и датчиков разработки СКТБ с ОП (справа)

Картина газодинамических процессов в виде графиков параметров давления и температуры приведена на рис. 2-4. Как следует из анализа графиков, постоянную времени датчиков давления можно оценить значением 1-3 мс. Быстродействие датчиков температуры существенно увеличивается при уменьшении толщины провода. Тем не менее при минимальной толщине провода постоянная времени имеет большее, чем у датчиков давления, значение – порядка 6 мс.

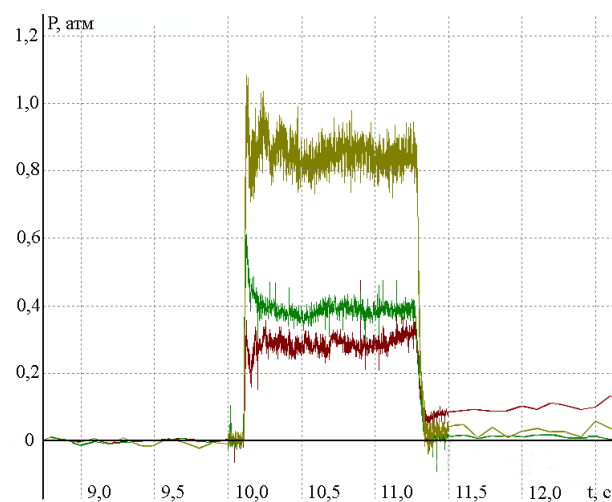


Рис. 2. Графики давлений при ГДИ

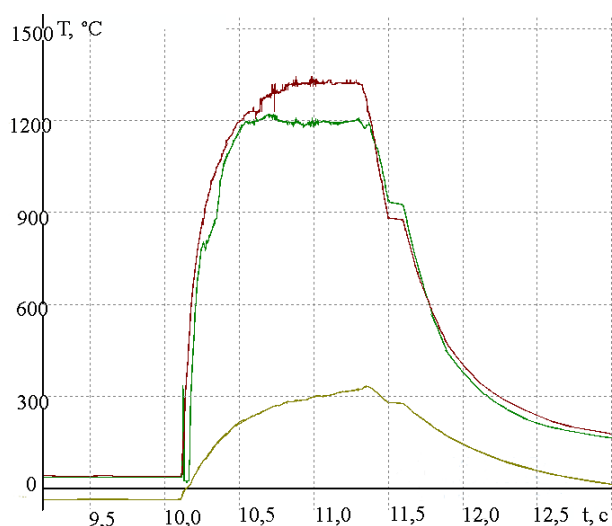


Рис. 3. Графики температур при ГДИ ($\delta = 0,5$ мм)

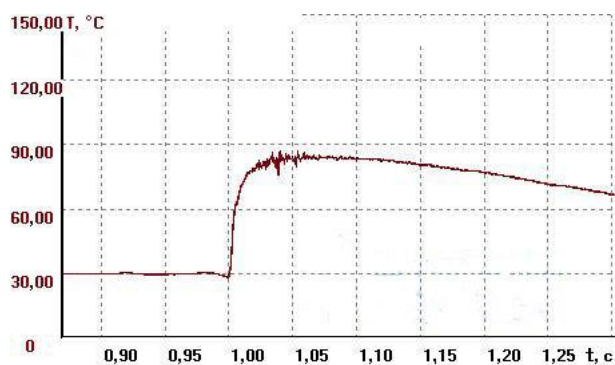


Рис. 4. Графики температур при испытаниях ОБО ($\delta = 0,2$ мм)

Знание постоянной времени датчиков, в данном случае – датчика температуры, позволяет уточнить параметры потока. Для уточнения температуры потока можно воспользоваться, например, уравнением прогрева спая термопары

$$x = y + \alpha \cdot dy/dt,$$

где x – температура потока; y – показания датчика температуры; α – коэффициент прогрева спая термопары.

Коэффициент α можно определить при моделировании измеряемого процесса в виде мгновенного включения постоянного значения x_m в момент времени $t = 0$. Решение уравнения прогрева в таком случае выглядит как

$$y = x_m(1 - \exp(-t/\alpha)).$$

Отсюда, зная постоянную времени τ , можно выразить искомый коэффициент

$$\alpha = -\tau/\ln(1-0,632).$$

В результате при использовании датчиков температуры с минимальной толщиной провода быстродействие уточненного процесса с учетом методической погрешности уточнения становится такого же порядка, как быстродействие датчика давления. Это позволяет использовать измерения давления и температуры приведенными к единому времени.

Указанные конструктивные рекомендации используются при разработке универсальной системы измерений для универсального газодинамического модельного стенда, который разрабатывается в настоящее время по теме «Гром-2».

Список использованной литературы

1. «Циклон-4». 21.17827.122ОТ: Отчет о НИР / ГП «КБ «Южное». – Днепропетровск, 2014. – С. 12.
2. Криворотов Н. П. Микроэлектронные сенсоры давления/Н. П. Криворотов, Т. И. Изаак, Л. М. Ромась, Ю. Г. Свинолулов, С. С. Щеголь//Вестн. Том. гос. ун-та. – 2005. – № 285. – С. 139-147.
3. Zhadko I.P. Silicon pressure transducer with differential sensitive element based on transverse electromotive force effect / I. P. Zhadko, G. G. Babichev, S. I. Kozlovskiy, V. A. Romanov, N. N. Sharan, E. A. Zinchenko // Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of the Ukraine. – K., 2001. – 7 p.

Статья поступила 20.07.2016