

М. А. Волошина, В. Г. Гергель, Л. А. Ерес, И. М. Курако, А. О. Олейник, В. В. Рогулин

ВЫБОР АЛГОРИТМА ВАЛИДАЦИИ МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТЯГИ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

Измерение силы тяги ракетных двигателей на твердом топливе проводится согласно разработанной методике выполнения измерений, удовлетворение требований которой гарантирует получение результатов с необходимыми показателями точности. Соответствие этой методики предъявляемым требованиям к точности измерений подтверждается путем ее валидации, которая может проводиться по разным алгоритмам. В предлагаемой статье рассматриваются два алгоритма валидации методики выполнения измерений силы тяги ракетных двигателей на твердом топливе до 30 тс – сквозного и позвенного способов валидации. Описаны состав измерительного канала, экспериментальные работы, выполненные при каждом алгоритме валидации, приведены расчетные формулы для оценки границ абсолютной погрешности измерений и полученные численные значения последних. Сравнительный анализ результатов валидации методики выполнения измерений силы тяги ракетных двигателей на твердом топливе, полученных при проведении метрологических исследований измерительного канала силы тяги сквозным и позвенным способами валидации, показывает, что для обеспечения требуемой точности измерений предпочтительным является алгоритм сквозного способа, при котором могут быть получены более низкие значения приведенной погрешности по сравнению с алгоритмом позвенной валидации.

Ключевые слова: измерительный канал, приведенная погрешность, градуировочная характеристика, электрический сигнал.

Вимірювання сили тяги ракетних двигунів на твердому паливі проводять згідно з розробленою методикою виконання вимірювань, задоволення вимог якої гарантує одержання результатів з необхідними показниками точності. Відповідність цієї методики вимогам, що ставлять до точності вимірювань, підтверджується шляхом її валідації, яка може проводитися за різних алгоритмами. У пропонованій статті розглядають два алгоритми валідації методики виконання вимірювань сили тяги ракетних двигунів на твердому паливі до 30 тс – наскрізного і поланкового способів валідації. Описано склад вимірювального каналу, експериментальні роботи, виконані для кожного алгоритму валідації, наведено розрахункові формули для оцінювання меж абсолютної похибки вимірювань і одержано числові значення останніх. Порівняльний аналіз результатів валідації методики виконання вимірювань сили тяги ракетних двигунів на твердому паливі, одержаних під час проведення метрологічних досліджень вимірювального каналу сили тяги наскрізним і поланковим способами валідації, показує, що для забезпечення необхідної точності вимірювань кращим є алгоритм наскрізного способу, за якого можуть бути одержані нижчі значення наведеної похибки в порівнянні з алгоритмом поланкової валідації.

Ключові слова: вимірювальний канал, наведена похибка, градувальна характеристика, електричний сигнал.

The solid rocket motors thrust is measured according to the developed measurement procedure; fulfillment of its requirements guarantees obtaining the results with required accuracy parameters. Compliance of this procedure with the measurement accuracy requirements is confirmed by way of its validation that can be performed according to different algorithms. The proposed article deals with two validation algorithms of measurement procedure for solid rocket motor thrust up to 30 tf – end-to-end and link-by-link validation methods. The composition of measurement channel, the experimental works performed at each validation algorithm are described, the calculation formulas to evaluate the limits of absolute measurement error and the obtained numerical values of the latter are presented. The comparative analysis of the results of validation procedure of solid rocket motor thrust measurement procedure obtained during metrological investigations of thrust measurement channel by end-to-end and link-by-link validation methods shows that to ensure the required measurement accuracy, the algorithms of end-to-end method is preferable, at which the lower values of reduced error can be obtained as compared with the algorithm of link-by-link validation.

Key words: measurement channel, reduced error, calibration characteristic, electric signal.

Постановка проблемы

При подготовке ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) к проведению огневых стендовых испытаний должна быть

разработана методика выполнения измерений (МВИ), которая регламентирует технические средства в составе измерительного канала (ИК) силы тяги и гарантированно обеспечивает получение результатов изме-

рений силы тяги с допустимыми характеристиками погрешности или показателями неопределенности, предусмотренными требованиями программы проведения огневых стендовых испытаний.

Подтверждение соответствия разработанной МВИ предъявляемым требованиям проводится путем ее валидации по алгоритму, позволяющему при минимальных финансовых затратах получить желаемый результат.

Опыт разработок МВИ на ГП «КБ «Южное» свидетельствует, что выбор алгоритма валидации МВИ зависит от состава ИК, наличия рабочего эталона и его вида, а также от технической возможности проведения сквозных или позвенных исследований для определения характеристик погрешности или показателей неопределенности измерений используемого ИК.

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящий момент имеются публикации [1–3], посвященные общим вопросам валидации методик испытаний и методик калибровки, которые рассматривают валидацию как процедуру, состоящую из четырех этапов:

- детализация требований к МВИ;
- валидация МВИ;
- сопоставление результатов валидации МВИ с предъявляемыми к ней требованиями;
- вывод о пригодности МВИ.

В частности, публикации [1, 2] посвящены анализу требований к методикам испытаний и калибровки и ограничиваются рекомендациями о том, что при их валидации должна быть оценена точность измерений. Публикация [3] посвящена валидации методик калибровки мер физических величин. В данной работе делается вывод о подобии валидации рассматриваемых в ней методик калибровки валидации МВИ физических величин и дается рекомендация о проведении валидации МВИ в процессе ее разработки.

Публикации, анализирующие факторы влияния на выбор алгоритма валидации МВИ, на сегодняшний день не найдены.

Постановка задачи

Целью настоящей статьи является рассмотрение условий, влияющих на выбор возможного алгоритма валидации МВИ силы тяги РДТТ, на примере реально разработанной МВИ, прошедшей валидацию двумя разными способами.

Изложение основного материала исследований

Сила тяги – один из основных параметров РДТТ, измерение которого проводится для контроля его соответствия предъявляемым требованиям.

При экспериментальной отработке РДТТ устанавливается на огневой испытательный стенд, в составе которого сформирован ИК силы тяги, позволяющий при огневом пуске РДТТ измерять и регистрировать развиваемую силу тяги.

Наиболее предпочтительным алгоритмом валидации МВИ силы тяги является прямое нагружение собранного ИК силы тяги известным усилием с помощью рабочего эталона. В случаях, когда весь ИК силы тяги может быть доставлен к месту размещения силоизмерительной машины, она традиционно используется в качестве рабочего эталона. При отсутствии такой возможности применяется алгоритм валидации, при котором по данным технической документации или по результатам экспериментального оценивания характеристик погрешности или показателей неопределенности измерений отдельных звеньев ИК силы тяги определяются численные значения этих характеристик, а затем расчетным способом статистически оцениваются соответствующие суммарные характеристики измерений всего ИК силы тяги по данным, полученным относительно его отдельных звеньев.

На ГП «КБ «Южное» разработана МВИ силы тяги РДТТ, которая прошла процесс валидации по обоим вышепредставленным алгоритмам.

При огневых испытаниях испытуемый РДТТ развивает усилие до 30000 кгс. В ходе испытаний с заданной частотой опроса ИК производится измерение и регистрация результатов наблюдений развиваемой силы тяги и их обработка. Согласно программе

огневых испытаний допускаемая приведенная погрешность для данной МВИ не должна превышать $\pm 0,5\%$ в диапазоне от 0 до 30000 кгс. Требования к допускаемому значению неопределенности измерений силы тяги этой программой не предусмотрены. Следовательно, при проведении валидации должна быть подтверждена способность разработанной МВИ силы тяги обеспечивать выполнение требований только к допускаемой погрешности измерений.

Структурная схема ИК силы тяги, используемого в составе разработанной МВИ, представлена на рис. 1.

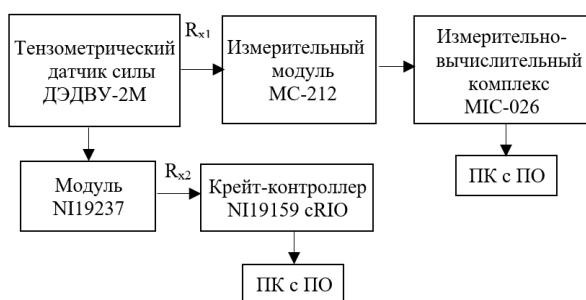


Рис. 1. Структурная схема ИК силы тяги

В качестве первичного преобразователя силы тяги используется тензометрический датчик силы ДЭДВУ-2М (двухмостовой). Текущие значения развиваемой РДТТ силы тяги преобразуются каждой мостовой схемой датчика в напряжение постоянного тока на их выходах, которое измеряется двумя параллельными независимыми ИК, условно обозначенными на структурной схеме как R_{x1} и R_{x2} .

Использование параллельных независимых ИК обеспечивает:

- повышенную надежность получения измерительной информации при проведении дорогостоящих огневых испытаний;
- возможность сравнения и совместной обработки измерительной информации двух каналов.

Состав ИК силы тяги R_{x1} :

- датчик силы тяги ДЭДВУ-2М (первая мостовая схема);
- измерительный модуль МС-212;
- измерительно-вычислительный комплекс МИС-026;

– персональный компьютер (ПК) со специальным программным обеспечением (СПО).

При экспериментальных исследованиях ИК R_{x1} был выбран алгоритм сквозного способа валидации МВИ силы тяги. Выбор этого алгоритма обусловлен возможностью доставки всего ИК R_{x1} к установленной стационарно силоизмерительной машине за счет мобильности его частей.

Экспериментальные исследования ИК R_{x1} проводились по структурной схеме, представленной на рис. 2. При этом ИК R_{x1} нагружался силой сжатия в точках 0, 6000, 12000, 18000, 24000, 30000 кгс пять раз по прямому и обратному ходу.



Рис. 2. Структурная схема экспериментальных исследований ИК R_{x1}

Оценка верхней Δ_h и нижней Δ_l границ абсолютной погрешности измерений силы тяги ИК R_{x1} проводилась по формуле

$$\Delta_{h,l} = \Delta_s \pm K_t \cdot M[\xi_t] \pm \pm 1,96 \sqrt{D\left(\overset{\circ}{\Delta}\right) + K_t^2 \cdot D(\xi_t) + \frac{H^2}{12}} \pm \Delta_{\text{эт}}, \quad (1)$$

где Δ_s – систематическая составляющая погрешности измерений; K_t – температурный коэффициент функции влияния ξ_t изменения температуры на погрешность ДЭДВУ-2М; $M[\xi_t]$ – математическое ожидание влияющей величины ξ_t ; $D(\xi_t)$ – дисперсия влияющей величины ξ_t ; $D\left(\overset{\circ}{\Delta}\right)$ – дисперсия случайной составляющей погрешности измерений силы тяги; H – вариация показаний ИК силы тяги R_{x1} ; $\Delta_{\text{эт}}$ – абсолютная погрешность эталонной силоизмерительной машины.

Приведенная к диапазону измерений датчика силы погрешность измерений силы тяги ИК R_{x1} рассчитывалась по формуле

$$\delta_{h,l} = \frac{\Delta_{h,l}}{F_n} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где F_n – номинальное значение диапазона измерений ДЭДВУ-2М, численно равное 30000 кгс.

Сведения по расчетам значений границ абсолютной и приведенной погрешностей измерений силы тяги ИК R_{x1} представлены в табл. 1. Очевидно, что максимальное значение приведенной погрешности измерений силы тяги не превысило $\pm 0,3\%$. После внесения поправок (исправлений результатов измерений) оно составило $\pm 0,2\%$, что подтверждает способность разработанной МВИ силы тяги обеспечить измерение с допускаемой погрешностью $\pm 0,5\%$.

Состав ИК силы тяги R_{x2} :

- датчик силы тяги ДЭДВУ-2М (вторая мостовая схема);
- модуль усилителя сигналов NI9237;
- крейт-контроллер NI9159 cRIO;
- ПК с СПО.

Для экспериментальных исследований ИК R_{x2} был выбран алгоритм позвонного способа валидации МВИ силы тяги. В качестве первого звена рассматривался датчик силы ДЭДВУ-2М, в качестве второго – модуль усилителя сигналов NI9237, крейт-контроллер NI9159 cRIO и ПК с СПО. Погрешность первого звена была оценена по данным технической документации фирмы-производителя датчика силы тяги. Погрешность второго звена оценивалась экспериментально – путем подачи на его вход электрического сигнала, имитирующего выходной сигнал датчика силы тяги ДЭДВУ-2М. Этот алгоритм валидации был выбран из-за невозможности доставки второго звена ИК R_{x2} к эталонной силоизмерительной машине, поскольку крейт-контроллер NI9159 cRIO установлен стационарно и перемещению не подлежит.

Для проведения экспериментальных исследований второго звена ИК R_{x2} на трех магазинах сопротивлений Р-33 были установлены значения электрического сопротивления 800 Ом, численно равные электрическому сопротивлению тензорезисторов датчика

силы ДЭДВУ-2М (рис. 3). На калибраторе электрических сигналов Fluke 726 последовательно устанавливались значения электрического сопротивления, вызывающие появление на выходе собранной мостовой схемы постоянных напряжений, равных напряжениям на выходе датчика силы ДЭДВУ-2М в точках 0, 6000, 12000, 18000, 24000, 30000 кгс согласно его градуировочной характеристике. Эти напряжения измерялись вторым звеном ИК R_{x2} пять раз по прямому и обратному ходу.

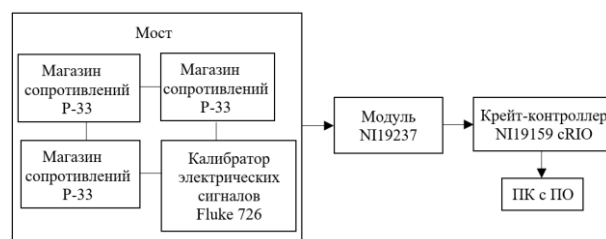


Рис. 3. Структурная схема экспериментальных исследований второго звена ИК R_{x2}

Оценка верхней Δ_h и нижней Δ_l границ абсолютной погрешности измерений силы тяги ИК R_{x2} проводилась по формуле

$$\Delta_{h,l} = \Delta_D + \Delta_s \pm K_t \cdot M[\xi_t] \pm \pm 1,96 \sqrt{D\left(\Delta\right) + K_t^2 \cdot D\left(\xi_t\right) + \frac{H^2}{12}} \pm \Delta_{\text{эт1}}, \quad (3)$$

где Δ_D – абсолютная погрешность датчика силы тяги ДЭДВУ-2М; $\Delta_{\text{эт1}}$ – абсолютные погрешности магазина сопротивлений Р-33 и калибратора электрических сигналов Fluke 726.

Приведенная к диапазону измерений датчика силы погрешность измерений силы тяги ИК R_{x2} рассчитывалась по формуле (2).

Сведения по расчетам значений границ абсолютной и приведенной погрешностей измерений силы тяги ИК R_{x2} представлены в табл. 2. Согласно ее данным максимальное значение приведенной погрешности измерений силы тяги не превысило $\pm 0,4\%$. После внесения поправок (исправлений результатов измерений) оно составило $\pm 0,3\%$, что подтверждает способность разработанной МВИ силы тяги обеспечить измерение с допускаемой погрешностью $\pm 0,5\%$.

Значения приведенной погрешности при позвенном способе валидации обычно превышают значения, полученные при сквозном способе. Это объясняется тем, что согласно (3) погрешность отдельных звеньев суммируется арифметически или статистически в предположении о равновероятном законе распределения этих погрешностей. При сквозном способе валидации отклонение погрешности одного из звеньев в пределах допуска в одну сторону может компенсироваться отклонением погрешности другого звена в пределах своего допуска в противоположную сторону, что приводит к получению более низкого экспериментального значения суммарной погрешности ИК по сравнению с позвенным способом валидации.

В случае дефицита резерва по допускаемой погрешности могут возникать ситуации, когда количественная оценка погреш-

ности, полученная при позвенном способе валидации, превышает значение допускаемой погрешности измерений, в то время как результаты сквозной валидации это значение не превышают.

Выводы

Сравнительный анализ результатов валидации МВИ силы тяги РДТТ, полученных при проведении метрологических исследований ИК силы тяги сквозным и позвенным способами валидации, показывает, что для обеспечения требуемой точности измерений предпочтительным является алгоритм сквозного способа, при котором могут быть получены более низкие значения приведенной погрешности по сравнению с алгоритмом позвенной валидации.

Таблица 1

Сквозной способ валидации МВИ силы тяги

Уровни нагружения, кгс	Δ_s , кгс	$K_t \cdot M[\xi_i]$, кгс	$K_t^2 \cdot D(\xi_i)$, кгс ²	$D\left(\Delta\right)$, кгс ²	H , кгс	$\Delta_{эт}$, кгс	Δ_h , кгс	Δ_l , кгс	δ_h , %	δ_l , %
0	2,0	0,0	8,3	1,4		0,0	10,8	-6,2		
6000	-10,0	0,0	8,3	0,8	-3,1	12,0	10,9	-30,8	0,1	-0,1
12000	15,1	0,0	8,3	3,0	-2,7	24,0	48,3	-18,2	0,2	-0,1
18000	20,2	0,0	8,3	1,2	-2,9	36,0	65,1	-24,7	0,2	-0,1
24000	14,9	0,0	8,3	6,3	5,9	48,0	73,2	-43,5	0,2	-0,2
30000	17,3	0,0	8,3	8,6		60,0	87,6	-52,9	0,3	-0,2

Таблица 2

Позвенный способ валидации МВИ силы тяги

Уровни нагружения, кгс	Δ_D , кгс	Δ_s , кгс	$K_t \cdot M[\xi_i]$, кгс	$K_t^2 \cdot D(\xi_i)$, кгс ²	$D\left(\Delta\right)$, кгс ²	H , кгс	$\Delta_{эт1}$, кгс	Δ_h , кгс	Δ_l , кгс	δ_h , %	δ_l , %
0	30,0	0,0	0,0	8,3	0,0		0,0	34,0	-34,0	0,1	-0,1
6000	30,0	-12,5	0,0	8,3	9,6	0,2	12,0	31,4	-56,3	0,1	-0,2
12000	30,0	9,1	0,0	8,3	8,0	1,0	24,0	71,5	-53,4	0,2	-0,2
18000	30,0	-8,4	0,0	8,3	11,5	2,5	36,0	63,6	-80,4	0,2	-0,3
24000	30,0	16,8	0,0	8,3	9,8	31,6	48,0	102,3	-68,7	0,3	-0,2
30000	30,0	-21,8	0,0	8,3	3,9		60,0	72,2	-115,7	0,2	-0,4

Характерной особенностью сквозного способа валидации является экспериментальный способ ее проведения, в то время как позвенный способ позволяет наряду с экспериментальными исследованиями использовать расчетные методы оценки погрешности измерений, а в ряде случаев – ограничиться последними.

Алгоритму позвенного способа валидации можно отдать предпочтение в тех случаях, когда суммирование оценок погрешности измерений отдельных звеньев позволяет получить суммарную оценку погрешности всего ИК силы тяги, удовлетворяющую требованиям по допускаемой погрешности измерений при огневых испытаниях РДТТ.

Таким образом, выбор алгоритма валидации МВИ силы тяги РДТТ определяется:

- практической возможностью применения сквозного способа валидации, особенно при отсутствии исходных данных по отдельным звеньям ИК силы тяги;

- наличием необходимых исходных данных по отдельным звеньям ИК силы тяги, позволяющих применить позвенный способ валидации МВИ с максимальной долей расчетных и минимальной долей экспериментальных исследований.

Дальнейшие работы направлены на уменьшение приведенной погрешности измерений силы тяги ИК R_{x2} путем замены рабочих эталонов на более точные.

Список использованной литературы

1. Коцюба А. М., Згуря В. І. Оцінювання придатності (валідація) методик випробування та калібрування: деталізація вимог. *Метрологія та прилади*. 2013. № 6. С. 22–24.

2. Коцюба А. М., Домницька В. К., Коцюба Л. Г. Валідація методик калібрування. *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2016. № 1. С. 41–45.

3. Коцюба А. М. Валідація методик калібрування мір фізичних величин. *Системи обробки інформації*. 2015. № 2 (127). С. 35–39.

Статья поступила 20.05.2019