

Метрологическое обеспечение испытаний космических аппаратов проекта «Луна-Глоб»

Metrological maintain of Luna-Glob space vehicles testing

Ключев / Klyushev P.

Павел Владимирович

(pavel.klyushev@scaegroup.com)

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,
ведущий инженер по метрологии.

г. Санкт-Петербург

Янковский / Yankovsky A.

Александр Анатольевич

(dep253@vniim.ru)

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский
институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,

руководитель отдела.

г. Санкт-Петербург

Алфёров / Alferov I.

Игорь Николаевич

(alferov@laspace.ru)

АО «НПО Лавочкина»,

начальник отдела.

г. Химки, Московская область

Ключевые слова: метрологическое обеспечение – measurement system; методика измерений – measurement technique; передача размера единицы физической величины – systems of metrological assurance; проект «Луна-Глоб» – the project "Luna-Glob".

В статье рассмотрены мероприятия метрологического обеспечения испытаний макетов космических аппаратов проекта «Луна-Глоб». Согласно Федеральной космической программы Российской Федерации на 2016–2025 годы, проект «Луна-Глоб» станет продолжением отечественных лунных миссий. Цель проекта – запуск автоматического зонда для исследований в районе Южного полюса Луны.

The article considers the activities of metrological assurance of tests of models of the spacecraft of the project "Luna-Glob". According to the Federal space program "Luna-Glob" will be a continuation of the domestic lunar missions. The project aims to launch robotic probes to research in the area of the South pole of the moon.

Введение

В 2017 году предприятиями АО «НПО Лавочкина» и АО «НЦ ПЭ» совместно с ведущей организацией Росстандарта ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» была проведена работа, направленная на развитие метрологического обеспечения испытаний макетов космических аппаратов проекта «Луна-Глоб».

Основной целью проведения работ по метрологическому обеспечению испытаний макетов космических аппаратов (далее – КА) проекта «Луна-Глоб» являлась

аттестация стенда для отработки динамики посадки на натурном макете с обезвешиванием (далее – СОДП) и стенда для отработки мягкой посадки на динамически подобной модели (далее – СОМП).

Для выполнения поставленной цели были решены следующие основные задачи:

- был проведен ряд фундаментальных и прикладных исследований по передаче размера единицы физической величины от государственного первичного эталона ГЭТ-94-2001 «Государственный первичный эталон единиц линейного ускорения и плоского угла при угловом перемещении твердого тела» к комплексу средств измерений (далее – комплект СИ), используемых для получения значения мгновенной скорости макетов космических аппаратов;

- на основе экспериментальных исследований разработана и аттестована методика измерений мгновенной скорости макетов космических аппаратов МВИ 18/001-2017 в соответствии с «Порядком аттестации первичных референтных методик (методов) измерений, референтных методик (методов) измерений, методик (методов) измерений и их применения», утвержденным приказом Минпромторга РФ от 15.12.2015 № 4091;

- в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 0008-002 была проведена аттестация стенда для отработки динамики посадки на натурном макете с обезвешиванием и стенда для отработки мягкой посадки на динамически подобной модели.

Аттестация методики измерений

В соответствии с требованиями Федерального закона от 26 июня 2008 года №102-ФЗ «Об обеспечении единства

измерений», ГОСТ РВ 0008-002 комплект СИ, используемый для аттестации СОДП и СОМП, должен был быть внесен в федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений и иметь действующее свидетельство об утверждении типа СИ, а методики (методы) измерений аттестованы в порядке, установленном действующим законодательством РФ в области обеспечения единства измерений.

Для подтверждения ряда характеристик СОДП и СОМП были выполнены прямые измерения с применением средств измерений утвержденного типа.

Однако для подтверждения одного из условий испытаний потребовалась проверка значения вертикальной составляющей скорости V_v в момент первого касания опоры макета СОДП (обезвешенного) о поверхность грунта, а также значения вертикальной составляющей скорости V_v и горизонтальной составляющей скорости V_g в момент первого касания опоры СОМП.

Анализ измерительной задачи показал, что к началу испытаний отсутствовали средства измерения, включенные в федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений РФ, позволяющие выполнить измерения мгновенной скорости макета КА.

Метрологической службой АО «НЦ ПЭ» было принято решение о разработке комплекта СИ в совокупности с методикой измерения (далее – МВИ), используемого для получения значения мгновенной скорости макетов космических аппаратов, который включал в себя:

- систему лазерную координатно-измерительную Leica Absolute Tracker AT960;
- генератор импульсов Г5-56.

Системы лазерные координатно-измерительные Leica Absolute Tracker AT960 способны выполнять измерение координат визирной цели с частотой 1000 Гц, что делает возможным измерение пространственных характеристик объектов и явлений в динамике.

Использование специализированной визирной цели Leica T-Mac, содержащей, помимо трипелъпризменного отражателя, сеть инфракрасных светодиодов, позволило в результате одного измерения определять, помимо декартовых координат визирной цели, углы поворота цели относительно осей выбранной рабочей системы координат.

Дополнительной функцией Leica Absolute Tracker AT960 является точное определение моментов времени измерений в единой системе отсчета времени – меток времени, с погрешностью не более ± 5 мкс. Отсчет времени производится с применением встроенного в контроллер Leica Absolute Tracker AT960 источника опорного сигнала с известной частотой – кварцевого генератора. Также существует возможность подключения и использования внешнего источника опорной частоты для синхронизации измерений с внешним процессом и отсчета времени во внешней системе. Для данной измерительной системы в качестве внешнего источника опорной частоты использовался генератор импульсов Г5-56.

Таким образом, для любого i -го измерения известны 7 параметров: декартовы координаты X_i, Y_i, Z_i , углы Эйлера $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ в момент времени измерений t_i .

Непрерывные измерения визирной цели, закрепленной на движущемся объекте, с частотой 1000 Гц формируют

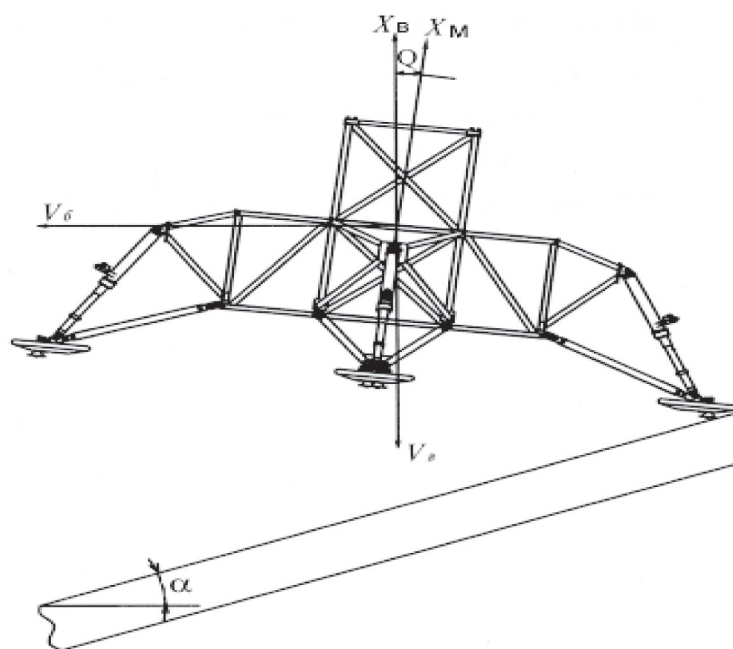


Рис. 1. Общий вид макета космических аппаратов проекта «Луна-Глоб»

в координатном пространстве траекторию перемещения объекта, представленную в виде набора точек.

Для каждого отрезка между точками P_i и P_{i+1} с метками времени t_i и t_{i+1} возможно вычисление линейной скорости по формуле:

$$V = \frac{\sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2 + (Z_{i+1} - Z_i)^2}}{t_{i+1} - t_i} \quad (1)$$

Системы лазерные координатно-измерительные Leica Absolute Tracker AT960 внесены в Государственный Реестр Средств измерений как средство измерения статических пространственных характеристик – декартовых координат через измерение горизонтального, вертикального направлений и наклонного расстояния.

Подтверждение метрологических характеристик при определении мгновенной скорости КА указанным выше способом потребовало проведения испытаний с применением динамического эталона, с обязательным обеспечением прослеживаемости к государственным первичным эталонам РФ.

Данные испытания с целью аттестации методики измерений МВИ 18/001-2017 были проведены в ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» по передаче размера единицы физической величины от государственного

первичного эталона ГЭТ-94-2001 «Государственный первичный эталон единиц линейного ускорения и плоского угла при угловом перемещении твердого тела» к комплексу СИ макетов космических аппаратов.

ГЭТ-94-2001 представляет собой центрифугу, период обращения которой известен с погрешностью 10^{-4} с. Зная период обращения T , возможно вычислить угловую скорость ω перемещения всех точек на плече центрифуги.

В случае если радиус окружности R , по которой перемещается точка, известен, то возможно вычисление линейной скорости точки с относительной погрешностью не более $\pm 0,1 \%$.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

$$V = R \cdot \omega \quad (3)$$

Установка на плечо центрифуги визирной цели и выполнение измерений ее координат в процессе вращения позволяет вычислить фактическую линейную скорость и провести оценку точности данного метода.

Измерения при экспериментальной апробации методики измерений проводились для двух ориен-

Таблица 1

Математическая модель МВИ 18/001-2017

№ п/п	Диапазон расчетной скорости $\bar{v}$, м/с	Допустимая абсолютная погрешность измерения, м/с	Расчетное значение t , с	Максимальная расчетная абсолютная погрешность измерения, м/с
1	2	3	4	5
1	от 0 до 1 вкл.	0,015	0,010	0,001
2	от 1 до 2 вкл.	0,030	0,010	0,002
3	от 2 до 3 вкл.	0,045	0,008	0,004
4	от 3 до 4 вкл.	0,060	0,008	0,005
5	от 4 до 5 вкл.	0,075	0,006	0,008
6	от 5 до 6 вкл.	0,090	0,006	0,010
7	от 6 до 7 вкл.	0,105	0,004	0,015
8	от 7 до 8 вкл.	0,120	0,004	0,020
9	от 8 до 9 вкл.	0,135	0,002	0,045
10	от 9 до 10 вкл.	0,150	0,002	0,050

Таблица 2

Экспериментальные данные апробации МВИ 18/001-2017

№ п/ п	Показания эталонной установки ГЭТ 94-2001				Показания Leica Absolute Tracker AT960			Абсолютная погрешность измерения, м/с
	Количество оборотов, об/мин	Фактический период обращения, с	Радиус (расстояние от центра эталонной установки до центра отражателя), м	Расчетная мгновенная скорость, м/с	Временной интервал, пройденного пути, с	Путь (длина отрезка пройденного за временной интервал), м	Расчетная мгновенная скорость, м/с	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	3	20,0040	0,746428	0,234	0,002	0,000468	0,234	0,000
	3	20,0040	0,746428	0,234	0,010	0,002330	0,233	0,001
2.	30	2,0004	0,746428	2,344	0,002	0,004686	2,343	0,001
	30	2,0004	0,746428	2,344	0,010	0,023440	2,344	0,000
3.	40	1,5003	0,746428	3,126	0,002	0,006250	3,125	0,001
	40	1,5003	0,746428	3,126	0,010	0,031260	3,126	0,000
4.	50	1,2002	0,746428	3,908	0,002	0,007818	3,909	0,001
	50	1,2002	0,746428	3,908	0,010	0,039050	3,905	0,003
5.	60	1,0002	0,746428	4,689	0,002	0,009372	4,686	0,003
	60	1,0002	0,746428	4,689	0,010	0,046880	4,688	0,001
6.	70	0,8573	0,746428	5,471	0,002	0,010926	5,463	0,008
	70	0,8573	0,746428	5,471	0,010	0,054710	5,471	0,000
7.	80	0,7502	0,746428	6,252	0,002	0,012504	6,252	0,000
	80	0,7502	0,746428	6,252	0,010	0,062530	6,253	0,001
8.	95	0,6317	0,746428	7,423	0,002	0,014842	7,421	0,002
	95	0,6317	0,746428	7,423	0,010	0,074200	7,420	0,003
9.	105	0,5715	0,746428	8,206	0,002	0,016412	8,206	0,000
	105	0,5715	0,746428	8,206	0,010	0,082030	8,203	0,003

таций Leica Absolute Tracker AT960 над плоскостью вращения центрифуги – под углом 19° и 90° с использованием двух видов отражателей (трипельпризменные и шестиосевые). Линейные скорости вращения при этом составили от 0,20 м/с до 9,62 м/с.

Для каждого цикла измерений для выбранной линейной скорости, результаты измерений сохранялись на протяжении минимум 10 оборотов центрифуги.

В процессе обработки результатов фактическая линейная скорость вычислялась для дуг окружности, опирающихся на угловые сектора в 360° (полный оборот), 180° , 90° , 45° , 10° , 5° , 1° , а также для дуг окружности, опирающихся на угол, равный $(\varphi_{i+1} - \varphi_i)$ – разницы координат в цилиндрической системе для двух последовательных измерений i и $i+1$.

$$V = \frac{R \cdot (\varphi_{i+1} - \varphi_i)}{t_{i+1} - t_i} \quad (4)$$

Перед проведением экспериментальной апробации методики измерений был произведен математический расчет абсолютной погрешности результата измерения мгновенной скорости макета космического, пользуясь формулой в соответствии с требованиями [4]:

$$\Delta v = \frac{s \cdot \Delta t + \Delta s \cdot t}{t^2} \quad (5)$$

где Δs – предел допускаемой абсолютной погрешности измерения Leica Absolute Tracker AT960, м;

Δt – предел допускаемой абсолютной погрешности установки длительности основных импульсов генератора, с;

s – длина пути (проекция вектора), пройденного объектом за временной интервал t , м;

t – временной интервал от 0,001 до 0,010 с.

Результаты математического расчета максимальной абсолютной погрешности измерения по МВИ 18/001-2017 в таблице 1.

На основе экспериментальных исследований была разработана и аттестована методика измерения мгновенной скорости макетов космических аппаратов МВИ 18/001-2017 в соответствии с «Порядком аттестации первичных референтных методик (методов) измерений, референтных методик (методов) измерений, методик (методов) измерений и их применения», утвержденным приказом Минпромторга РФ от 15.12.2015 № 4091.

Экспериментальные данные апробации МВИ 18/001-2017 приведены в таблице 2.

Примечание – Экспериментальные данные апробации МВИ 18/001-2017 представлены только для шестиосевого отражателя, входящего в Leica Absolute Tracker AT960.

В процессе оценки точности, была вычислена СКО измерения линейной скорости для различных эталонных скоростей (трипельпризменные отражатели).

График зависимости СКО измерения скорости в зависимости от скорости:

Анализ экспериментальных данных и результатов математического расчета показал, что МВИ 18/001-2017 позволяет выполнить измерения при аттестации СОДП и СОМП с относительной погрешностью измерений мгновенной скорости не превышающей $\pm 1,5\%$, что удовлетворяет требованиям технической документации по метрологическому обеспечению испытаний космических аппаратов проекта «Луна-Глоб».

Аттестация СОДП и СОМП

В ходе проведения доводочных и предварительных испытаний СОДП и СОМП на территории АО «НПО Лавочкина» была выполнена работа по аттестации



СОДП и СОМП в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 0008-002, ГОСТ Р 8.568 силами и средствами АО «НЦ ПЭ», ФГУП «ВНИИМ им Д. И. Менделеева».

Основной целью аттестации стендов СОДП и СОМП являлось подтверждение характеристик стендов и возможности воспроизведения условий испытаний в заданных пределах с допускаемыми отклонениями, а также установление годности использования стендов для испытаний посадочного устройства макетов космических аппаратов проекта «Луна-Глоб».

Заключение

Сопоставив полученные результаты проведения работ по аттестации СОДП и СОМП с начальными целями, можно выделить следующее:

- экспериментальная апробация методики измерений мгновенной скорости макетов КА проекта «Луна-Глоб» полностью подтвердила результаты математических расчетов ожидаемых метрологических характеристик, удовлетворяющих требованиям технической документации по метрологическому обеспечению испытаний СОДП и СОМП.

- разработанный комплект СИ и МВИ 18/001-2017 имеет практическое применение в дальнейших работах по метрологическому обеспечению изделий ракетно-космической отрасли.

В настоящее время АО «НЦ ПЭ» продолжает работы, направленные на создание и развитие средств метрологического обеспечения продукции ракетно-космической промышленности на различных этапах жизненного цикла.

Литература

1. Федеральный закон от 26 июня 2008 года №102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (с изменениями на 13 июля 2015 года).
2. ГОСТ РВ 0008-002-2013. ГСИ. Аттестация испытательного оборудования, применяемого при оценке соответствия оборонной продукции. Организация и порядок проведения.
3. ГОСТ Р 8.568-97. ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения.
4. МИ 1317-2004. ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.