

М.А. Бондарь, Л.А. Ерес, И.М. Курако, Ю.Н. Петренко, А.С. Гольцев

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА СТЕНДАХ НЕВЕСОМОСТИ

Рассмотрен пример расчетной оценки погрешности измерений линейных ускорений при свободном падении кинематической модели. Сделан вывод о возможности замены проведения экспериментальных исследований погрешности измерений расчетными работами для тех параметров, для которых имеются достаточные исходные данные о метрологических характеристиках применяемых средств измерительной техники.

Розглянуто приклад розрахункового оцінювання похибок вимірювань лінійних прискорень при вільному падінні кінематичної моделі. Зроблено висновок про можливість заміни експериментальних досліджень похибок вимірювань розрахунковими роботами для параметрів, які мають у достатньому обсязі вихідні дані про метрологічні характеристики застосовуваних засобів вимірювальної техніки.

Example of the estimate of the measurement error of the linear accelerations during the free fall of the kinematic model is considered. It was concluded that experiments on error measurements can be replaced with calculations for those parameters which have sufficient initial data on metrological performance of the applied instrumentation.

Введение. Для исследования функционирования объектов ракетно-космической техники в условиях невесомости используют стенды невесомости. На этих стендах моделирование условий невесомости осуществляется при свободном падении объектов с высоты. Контроль моделируемых условий невесомости осуществляется с помощью устанавливаемых на испытуемом объекте акселерометров, измеряющих линейные ускорения падающих объектов. Стенды невесомости обеспечивают практически полную невесомость в течение времени свободного падения объекта ($\approx 2,85$ с) с высоты 40 м. Перегрузка за счет сопротивления воздуха при свободном падении кинематической модели не превышает 0,05 g. Учитывая значительные массово-габаритные характеристики проектируемых объектов, для их исследования изготавливают кинематические модели, представляющие собой их уменьшенные масштабные копии (рис. 1, 2), изготовленные из прозрачных материалов.

При испытаниях в свободно падающей с высоты кинематической модели воспроизводятся штатные режимы движения жидкостей в ее магистралях и проводится видеорегистрация поведения жидкости в условиях невесомости.

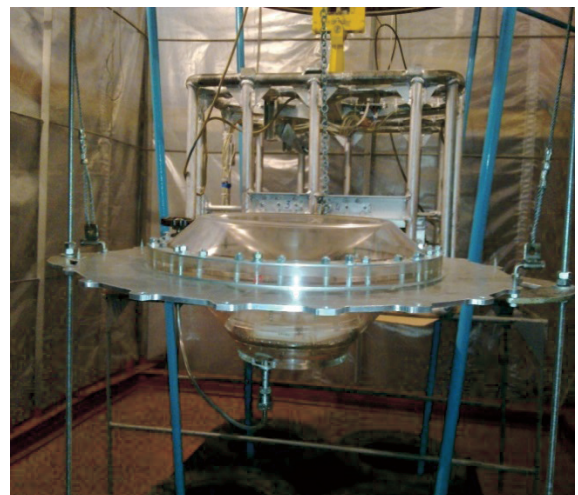


Рис. 1. Кинематическая модель

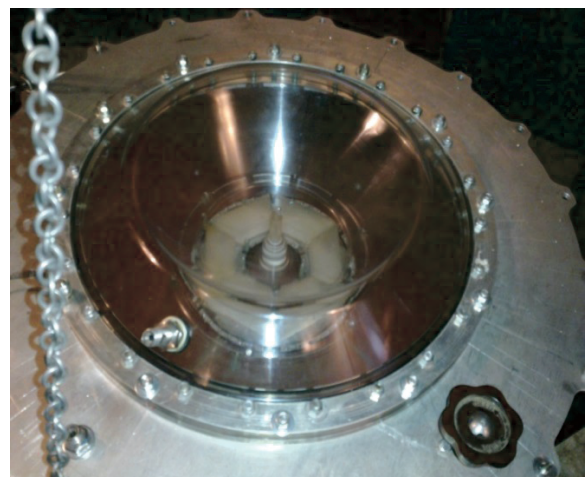


Рис. 2. Макет заборного устройства

При свободном падении кинематической модели с помощью встроенных измерительных каналов проводится измерение:

- линейного ускорения (акселерометры Вт 51 и АИВ 59);
- давления (датчики давления типа МД, ВТ 212 и др.);
- угловой скорости вращения (датчики типа КХ 79-048);
- расхода жидкости (турбинные датчики расхода типа ТДР);
- температуры (платиновые термометры сопротивления типа ТП).

Перед испытанием измеряют:

- объем заливаемой жидкости (мерные емкости);
- уровень залитой в кинематическую модель жидкости (линейка мерная).

Согласно требованиям программ конструкторских подразделений на проведение испытаний измерения должны проводиться по аттестованным методикам выполнения измерений. Общие требования к структуре и содержанию методик выполнения измерений с использованием встроенных измерительных каналов установлены ДСТУ 4134-2002.

Варианты проведения испытаний:

1. Закрепленная на высоте в устройстве удержания кинематическая модель свободно отделяется от устройства удержания, при свободном падении отсутствуют поперечные линейные ускорения.

2. Закрепленная на высоте в устройстве удержания кинематическая модель свободно отделяется от устройства удержания, при свободном падении возбуждаются поперечные линейные ускорения.

3. Закрепленная на высоте в устройстве удержания кинематическая модель с помощью толкающего устройства отделяется от устройства удержания, при свободном падении отсутствуют поперечные линейные ускорения.

4. Закрепленная на высоте в устройстве удержания кинематическая модель с помощью толкающего устройства отделяется от устройства удержания, при свободном падении возбуждаются поперечные линейные ускорения.

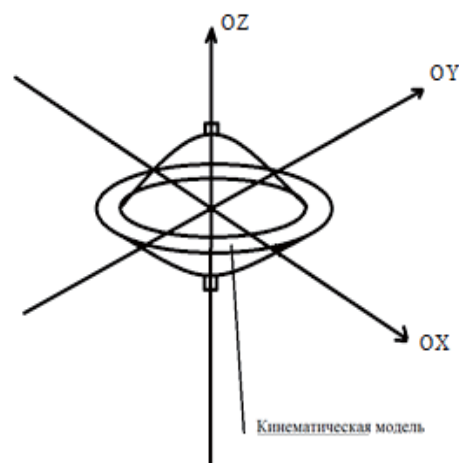


Рис. 3. Направление осей кинематической модели

Начало и окончание длительности свободного падения кинематической модели определяются по результатам измерений линейных ускорений по осям OX, OY и OZ (рис. 3).

При испытаниях акселерометрами измеряются:

а) мгновенные значения линейных ускорений по оси OZ в моменты опроса измерительных каналов при свободном падении кинематической модели;

б) пиковые значения возбуждаемых поперечных линейных ускорений по осям OX и OY при свободном падении кинематической модели и пиковое значение ускорения при торможении кинематической модели.

Для метрологического обеспечения измерений линейных ускорений разработана и выпущена "Методика выполнения измерений линейных ускорений при проведении испытаний кинематической модели" МВИ 443/74-2013.

В связи со сложностью проведения экспериментальных работ по оценке точности измерений линейных ускорений и из-за отсутствия рабочих эталонов, воспроизводящих известные значения линейных ускорений, оценка точности измерений при использовании акселерометров проведена расчетным способом по данным действующей технической документации на акселерометры Вт 51 и АИВ 59.

С этой целью был проведен анализ характера изменения измеряемого параметра при испытаниях. Результаты анализа изменения линейного ускорения при падении кинематической модели приведены на рис. 4 и 5.

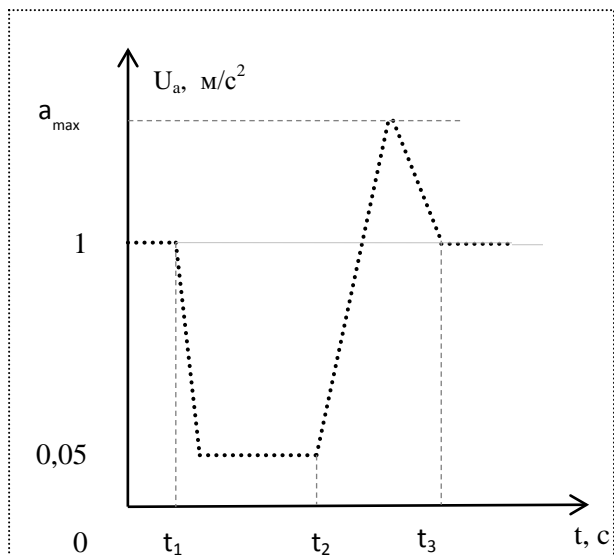


Рис. 4. Изменение продольного линейного ускорения при падении кинематической модели

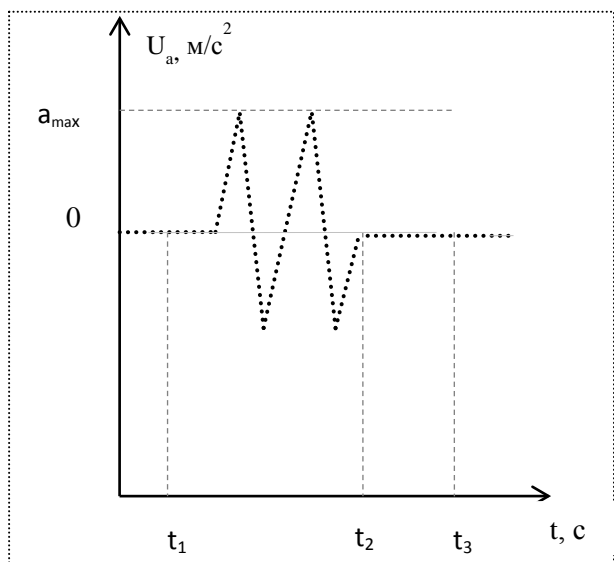


Рис. 5. Изменение вынужденных возбуждаемых поперечных линейных ускорений при падении кинематической модели:

- t_1 – момент отделения кинематической модели от устройства удержания;
- $t_1 - t_2$ – интервал свободного падения кинематической модели;
- $t_2 - t_3$ – интервал торможения кинематической модели

Стандарт ECSS-Q-ST-20C Rev. 1 предусматривает необходимость приводить для результатов измерений суммарную погрешность от всех составляющих погрешностей, а также документальную фиксацию всех этих составляющих.

Для оценки погрешности измерений линейных ускорений была сформирована модель погрешности измерений в следующем виде:

– при измерении мгновенных значений линейных ускорений:

$$\Delta = \Delta_o \oplus \Delta_{нел} \oplus \Delta_\alpha \oplus \Delta_U \oplus \Delta_{нел} \oplus \Delta_t \oplus \Delta_{др} \oplus \Delta_\perp \oplus \Delta_{xp} \oplus \Delta_{АЦП}; \quad (1)$$

– при измерении пиковых значений импульсообразных линейных ускорений:

$$\Delta = \Delta_o \oplus \Delta_{нел} \oplus \Delta_\alpha \oplus \Delta_U \oplus \Delta_t \oplus \Delta_{др} \oplus \Delta_{дин} \oplus \Delta_\perp \oplus \Delta_{xp} \oplus \Delta_{АЦП} \oplus \Delta_{диск}, \quad (2)$$

где Δ_o – основная погрешность акселерометра при измерении медленноменяющихся линейных ускорений;

$\Delta_{нел}$ – погрешность акселерометра, обусловленная нелинейностью статической градуировочной характеристики;

Δ_H – погрешность акселерометра, обусловленная вариацией измеряемого параметра;

Δ_α – дополнительная погрешность акселерометра, обусловленная отклонением оси Z акселерометра от направления измеряемого линейного ускорения;

Δ_U – дополнительная погрешность акселерометра, обусловленная изменением напряжения питания;

Δ_t – дополнительная погрешность акселерометра, обусловленная изменением температуры окружающего воздуха;

$\Delta_{др}$ – дополнительная погрешность акселерометра, обусловленная дрейфом начального уровня напряжения выходного сигнала акселерометра;

$\Delta_{дин}$ – дополнительная погрешность акселерометра, обусловленная частотным диапазоном измеряемого линейного ускорения;

Δ_\perp – дополнительная погрешность акселерометра, обусловленная наличием поперечных линейных ускорений;

Δ_{xp} – дополнительная погрешность акселерометра, обусловленная временем хранения акселерометра;

$\Delta_{АЦП}$ – погрешность, вносимая используемым аналого-цифровым преобразователем;

$\Delta_{\text{диск}}$ – дополнительная погрешность акселерометра, обусловленная частотой опроса (интервалом дискретизации) измерительного канала;

\oplus – знак непрямого математического суммирования.

Расчет составляющих погрешности измерений, входящих в сформированную модель, проводился по данным, приведенным в документах "Акселерометр. Техническое описание и инструкция по описанию" АИВ59ТО и "Акселерометры Вт 51. Технические условия" Вт 1.430.027 ТУ.

При проведении расчетов для оценки границ погрешности измерений линейных ускорений принималась гипотеза о равновероятном законе распределения составляющих погрешности, которые в нормативной документации представлены интервальными оценками. Это означает, что если составляющая погрешности задана значением $\pm \delta_i$, то ее математическое ожидание равно нулю, а дисперсия оценивается по формуле

$$D(\delta_i) = \frac{|\pm \delta_i|^2}{3} \quad (3)$$

На основании сформированной модели погрешности расчетные формулы для оценки погрешности измерений линейных ускорений имеют следующий вид:

– при проведении измерений мгновенных значений линейных ускорений

$$\delta = M[\delta_a] + M[\delta_t] \pm \pm 1,96 \sqrt{\frac{\delta_o^2}{3} + \frac{\delta_{\text{нел}}^2}{3} + \frac{\delta_H^2}{3} + \frac{\delta_U^2}{3} + \frac{\delta_{\text{др}}^2}{3} + \frac{\delta_{\perp}^2}{3} + \frac{\delta_{\text{xp}}^2}{3} + \frac{\delta_{\text{АЦП}}^2}{3} + D(\delta_a) + D(\delta_t)} \quad (4)$$

– при проведении измерений пиковых значений импульсообразных линейных ускорений:

$$\delta = M[\delta_a] + M[\delta_t] + M[\delta_{\text{диск}}] \pm \pm 1,96 \sqrt{\frac{\delta_o^2}{3} + \frac{\delta_{\text{нел}}^2}{3} + \frac{\delta_H^2}{3} + \frac{\delta_U^2}{3} + \frac{\delta_{\text{др}}^2}{3} + \frac{\delta_{\text{диск}}^2}{3} + \frac{\delta_{\perp}^2}{3} + \frac{\delta_{\text{xp}}^2}{3} + \frac{\delta_{\text{АЦП}}^2}{3} + D(\delta_a) + D(\delta_t) + D(\delta_{\text{диск}})} \quad (5)$$

По результатам расчетов получены оценки погрешности измерений линейных ускорений, численные значения которых приведены в таблице.

Тип акселерометра	Мгновенные значения линейных ускорений	Пиковые значения импульсообразных линейных ускорений
АИВ59	$\pm 2,2 \%$	$\pm 3,8 \%$
Вт 51	$\pm 4,0 \%$	$\pm 7,4 \%$

Для наглядного представления доли каждой составляющей погрешности в суммарной оценке погрешности измерений линейных ускорений исследована круговая диаграмма, в которой каждая составляющая погрешности изображается в виде сектора круга.

Круговые диаграммы с изображением составляющих структур погрешности измерений мгновенных значений линейных ускорений и пиковых значений импульсообразных линейных ускорений представлены на рис. 6 и 7.

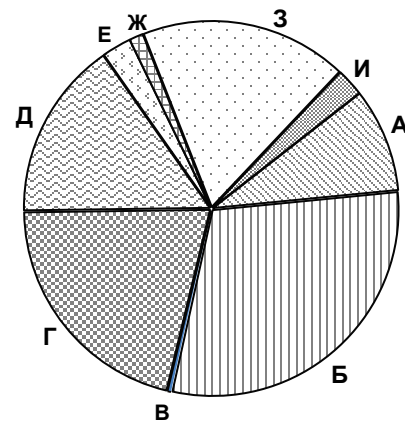


Рис. 6. Структура погрешности измерений медленно меняющихся линейных ускорений:

- А – основная погрешность (9 %);
- Б – нелинейность статической градуировочной характеристики (30 %);
- В – отклонение оси акселерометра от измеряемого линейного ускорения (0,3 %);
- Г – напряжение питания измерительного канала (20,7 %);
- Д – температура окружающего воздуха (16 %);
- Е – дрейф начального уровня выходного напряжения измерительного канала (3 %);
- Ж – поперечные линейные ускорения (1 %);
- З – время хранения акселерометра (18 %);
- И – погрешность, вносимая используемым аналого-цифровым преобразователем (2 %)

Из рис. 6 видно, какую долю в суммарной погрешности измерений линейных ускорений имеет та или иная составляющая погрешности, учитываемая при проведении расчетных работ. Наибольшую долю в

суммарной погрешности измерений имеют следующие составляющие:

- погрешность акселерометра, обусловленная нелинейностью статической градуировочной характеристики (30 %);

- дополнительная погрешность акселерометра, обусловленная изменением напряжения питания (21 %);

- дополнительная погрешность акселерометра, обусловленная временем хранения акселерометра (18 %).

Таким образом, резервом для повышения точности измерений мгновенных значений линейных ускорений является, в первую очередь, подбор такой статической градуировочной характеристики акселерометра, при которой минимизировалась бы погрешность акселерометра, обусловленная нелинейностью этой характеристики.

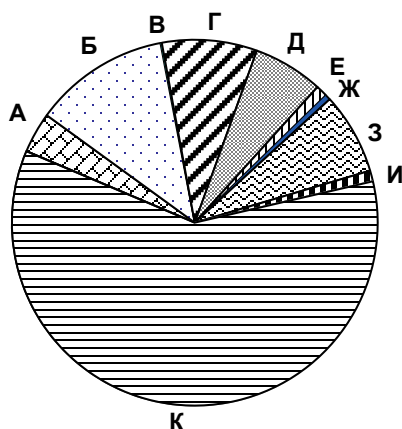


Рис. 7. Структура погрешности измерений пиковых значений линейных ускорений:

- А – основная погрешность (4 %);
- Б – нелинейность статической градуировочной характеристики (12 %); В – отклонение оси акселерометра от измеряемого линейного ускорения (0 %); Г – напряжение питания измерительного канала (8 %); Д – температура окружающего воздуха (6 %); Е – дрейф начального уровня выходного напряжения измерительного канала (1 %); Ж – поперечные линейные ускорения (1 %); З – время хранения акселерометра (7 %); И – погрешность, вносимая аналого-цифровым преобразователем (1 %); К – частота опроса измерительного канала линейного ускорения (60 %)

Из рис. 7 видно, что наибольшую долю в суммарной погрешности измерений имеет дополнительная погрешность акселерометра, обусловленная частотой опроса (интервалом дискретизации) измерительного канала (60 %). Эта составля-

ющая погрешности измерений является доминирующей над всеми остальными составляющими погрешностями. Таким образом, резервом для повышения точности измерений пиковых значений линейных ускорений является, в первую очередь, увеличение частоты опроса измерительного, которая зависит от технических характеристик используемого аналого-цифрового преобразователя.

Выводы. Данная работа представляет собой пример расчетного способа аттестации методики выполнения измерений. Полученные оценки погрешности измерений обеспечиваются выполнением требований "Методики выполнения измерений линейных ускорений при проведении испытаний кинематической модели" МВИ 443/74-2013. Результаты аттестации оформлены расчетом и свидетельством об аттестации методики выполнения измерений.

Метрологическое обеспечение испытаний кинематической модели на стенде невосомости реализовано путем разработки и аттестации методик выполнения измерений всех параметров, измеряемых при проведении испытаний. Аттестация методик выполнения измерений, как правило, проводится экспериментальным путем и, в отдельных случаях, расчетным способом. В частности, проведение расчетной оценки погрешности измерений линейных ускорений позволило избежать трудоемких экспериментальных работ и финансовых затрат на их проведение при сохранении качества полученных результатов, а также предложить пути повышения точности этих измерений.

Список использованной литературы

1. ДСТУ 4134-2002. Канали вимірювальні вимірювальних інформаційних систем та автоматизованих систем керування технологічними процесами. Вимоги до структури та змісту виконання вимірювань. – Чинний від 2004-01-01. – Київ: Держспоживстандарт України, 2003 р. –14 с.
2. ECSS-Q-ST-20C Rev. 1. Space product assurance. Quality assurance. – Publish date: 2013-03-01. Organization: European Cooperation for Space Standardization.

Статья поступила 27.07.2016