



Федеральное государственное унитарное предприятие
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени профессора Н.Е. Жуковского»

**Комплекс работ по созданию стенда нового поколения
6ГС-60 для калибровки тензовесов**

Аннотация работы

Комплекс работ по созданию стенда нового поколения

6ГС-60 для калибровки тензовесов

Ю.В. Карташев, В.В. Петроневич, В.В. Лютов, А.В. Сашин, С.В.

Зимогоров, О.В. Довыденко

В рамках данной работы проведён комплекс мероприятий по вводу в эксплуатацию, мастер-калибровки и аттестации в качестве эталона нового стенда 6ГС-60 для калибровки аэrodинамических тензовесов. В таблице №1 приведены основные характеристики стенда.

Таблица 1 Основные характеристики стенда

| Компонент | X | Y | Z | Mx | My | Mz |
|--------------------|------|-------|------|------|------|------|
| Нагрузка (кг, кгм) | ±500 | ±2000 | ±500 | ±200 | ±200 | ±600 |
| Погрешность (%) | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.08 | 0.08 | 0.08 |

Ввод в эксплуатацию стенда 6ГС-60 позволил создать новый участок для автоматизированной калибровки тензовесов для нужд АДТ ФГУП «ЦАГИ» и других смежных предприятий.

По результатам мастер-калибровки получена математическая модель стенда размерностью 6 X 27, которая представляет собой матрицу коэффициентов описывающих зависимость сигналов прецизионных тензометрических динамометров стенда от эталонных значений специализированного комплекта гирь.

По результатам аттестации стенда разработаны эксплуатационные документы и методические указания для калибровки как стенда, так и тензометрических весов.

Апробация стенда проводилась на тензовесах, ранее откалиброванных на эталонных стенах 6ГС-20 и 6ГС-40М. Обработка и анализ полученных данных показал работоспособность нового стенда, уменьшение погрешности калибровки в 2 раза и сокращение времени калибровки со 120 до 12 часов.

Результаты работы будут использованы при проектировании, изготовлении и калибровке тензовесов, необходимых для исследования аэrodинамических характеристик ЛА в АДТ

Содержание

| | |
|---|----|
| 1 Описание стенда 6ГС-60..... | 5 |
| 1.1 Технические характеристики..... | 11 |
| 1.1.1 Точность позиционирования тензометрических весов | 11 |
| 1.1.2 Рабочие характеристики..... | 12 |
| 1.1.3 Габариты и масса..... | 12 |
| 1.2 Состав стенда | 13 |
| 1.2.1 Описание стенда..... | 13 |
| 1.2.2 Механическая система стенда..... | 13 |
| 2 Мастер – Калибровка | 15 |
| 2.1 Подготовка конфигурации стенда к режиму «Мастер-Калибровка» | 15 |
| 2.1.1 Проверка совпадения осей системы измерения с осями стенда | 15 |
| 2.1.2 Демонтаж элементов стенда..... | 16 |
| 2.1.3 Сборка калибровочного стенда в конфигурации «Мастер-Калибровка»..... | 18 |
| 2.2 Выравнивание системы нагружения стенда перед «Мастер-Калибровкой» | 22 |
| 2.2.1 Выравнивание системы вертикального нагружения | 22 |
| 2.2.2 Выравнивание системы горизонтального нагружения по оси X | 25 |
| 2.2.3 Выравнивание системы горизонтального нагружения по оси Z | 26 |
| 3 Проведение «Мастер-Калибровки» | 29 |
| 3.1 Выполнение «Мастер-Калибровки»..... | 31 |
| 3.2 Выравнивание системы нагружения стенда во время «Мастер-Калибровки» | 31 |
| 3.2.1 Выравнивание во время вертикального нагружения (Y, Mz и Mx) | 31 |
| 3.2.2 Выравнивание во время горизонтального нагружения (X, Z и My) | 32 |
| 3.2.3 Выравнивание во время комбинированного нагружения | 32 |
| 3.3 Программа нагружения | 32 |
| 3.4 Результаты «Мастер-Калибровки»..... | 33 |
| 4 Метрологическая аттестация стенда | 35 |
| 5 Апробация калибровочного стенда 6ГС-60 | 36 |
| Заключение..... | 38 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ | 39 |

Введение

В работе описан процесс проведения «мастер-калибровки» нового автоматизированного стенда 6ГС-60 с пневматическими силозадающими устройствами. Приведены результаты мастер-калибровки стенда, получены предварительные метрологические характеристики и рабочие формулы для измерительной системы стенда.

В соответствии с технической документацией и инструкцией по эксплуатации была проверена работоспособность стенда и проведена пробная калибровка тензометрических весов. Заключительным шагом для принятия стенда в эксплуатацию является проведение «мастер-калибровки» - калибровка прецизионных тензометрических динамометров с учётом взаимовлияний и поправок на геометрические величины деформаций конструкции стенда. «Мастер-калибровка» стенда была проведена в ноябре-декабре 2020 года совместно с представителями производителя (Generic Test, Германия).

1 Описание стенда 6ГС-60

Калибровочный стенд 6ГС-60 представляет собой комплекс оборудования для полностью автоматизированной калибровки аэродинамических тензометрических весов, общий вид приведен на рисунке 1. Используемые технические решения базируются на концепции разделения функций нагружения тензометрических весов и измерения сигналов на две различные задачи, в отличие от традиционно используемых калибровочных установок.

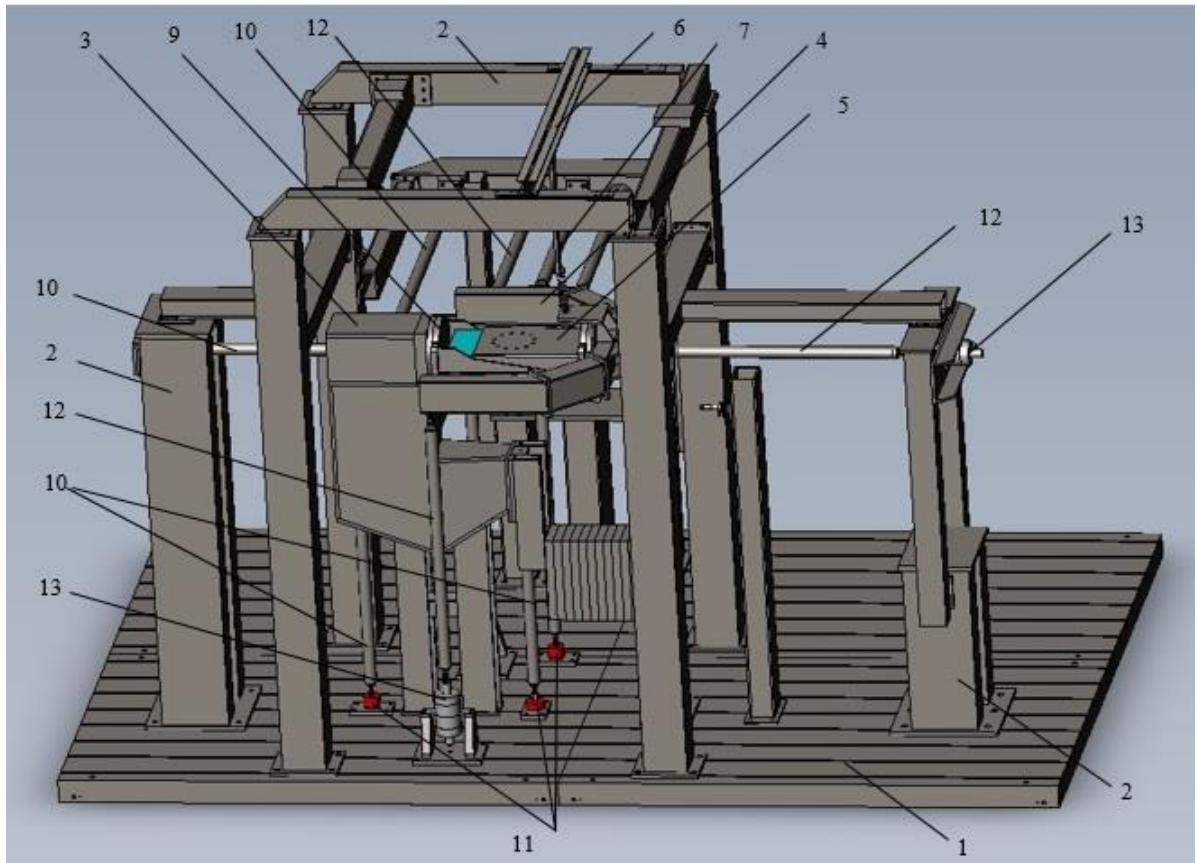
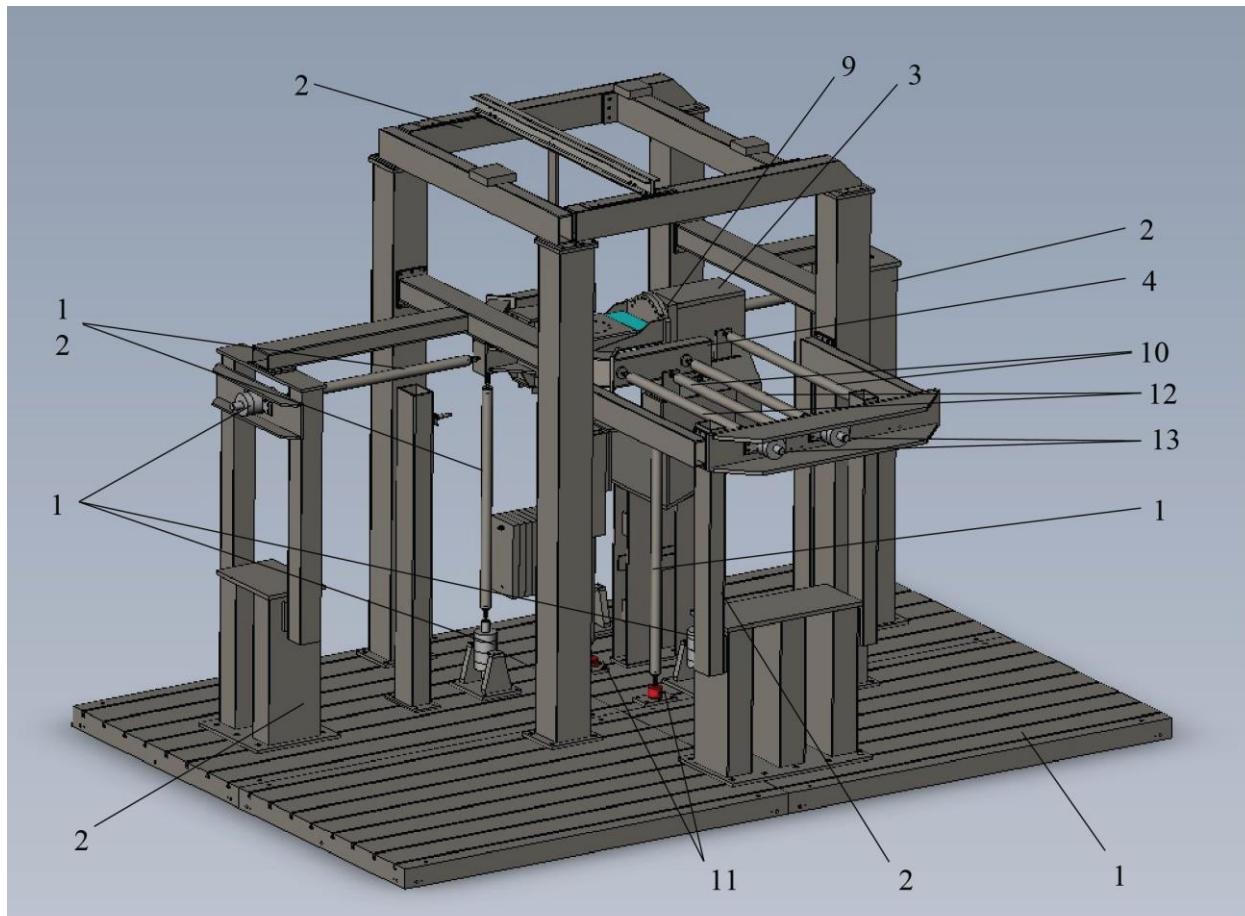


Рисунок 1 – Общий вид стенда ГС-60

Для определения соотношений между сигналами образцовых датчиков силы (динамометров) и истинными нагрузками проведена мастер-калибровка стенда. На основании данных мастер-калибровки составлена матрица взаимных влияний компонентов самого стенда, которая используется при калибровке тензометрических весов. Данный подход ранее апробирован и отмечался в отчетах по тензометрической тематике [1], [2], [3].

Для создания калиброванных нагрузок при мастер-калибровке применено нагружение с использованием эталонных грузов и прецизионных рычагов. На рисунке 2 приведена конфигурация стенда в режиме мастер калибровки. В процессе мастер-калибровки исключается деформация конструкций стенда путем совмещения начала координат стенда с точкой приложения сил, что реализовано с помощью трех-

координатных механизмов перемещения, и таким образом восстанавливается ортогональность осей после каждого нагружения.



- 1 – опорная плита,
- 2 – силовая рама
- 3 – измерительная рама (ИР)
- 4 – нагружающая рама (НР)
- 5 – тензовесы
- 6 – балка для вывешивания НР
- 7 – тяга вывешивания НР
- 9 – узел крепления тензовесов к ИР
- 10 – штанги соединения ИР и динамометров
- 11 – образцовые динамометры
- 12 – тяги, соединяющие НР и силовозбудители
- 13 – силовозбудители

Рисунок 2 – стенд в конфигурации «Калибровка» (вид сзади)

Калибровочный стенд можно разделить на 5 основных частей и систем:

- опорная плита,
- система измерения,
- система нагружения,
- система подачи сжатого воздуха,

– оборудование для «мастер-калибровки».

Опорная плита предназначена для монтажа силовой рамы и других механических элементов стенда. Плита состоит из четырех частей, общим весом 24 000 кГ. Опорная плита устанавливается на специальный изолированный фундамент и выставляется строго горизонтально при помощи регулируемых опор. Погрешность установки плиты не превышает 0,3 мм. на 1 м. (т.е. 1'). При наличие заметных вибраций фундамента могут быть задействованы виброгасящие пневматические опоры.

Система измерения состоит из жёсткой и массивной (вес ~ 2800 кГ) измерительной рамы, которая при помощи тяг соединена с прецизионными динамометрами типа ТОР-Z30A и TOP-Z4A (HBM), закреплёнными на силовой раме и опорной плите. Основным преимуществом системы измерения является отсутствие подвижных соединений. Начало координат стенда находится на пересечение осей датчиков осевой, вертикальной и боковой сил. Это делает матрицу нагрузок стенда аналогичной матрице нагрузок, калируемых аэродинамических тензометров.

Система нагружения состоит из жёсткой рамы, шести пневматических силовозбудителей и силовых тяг.

Система подачи сжатого воздуха состоит из электромеханического компрессора с ресивером, прецизионных контроллеров давления Pace5000 и Pace6000, электромагнитных клапанов и промышленно-логического контроллера.

В состав оборудования для «мастер-калибровки» входят: калибровочная модель, двух координатные подвижные столы, рычаги, качало, тяги и комплект эталонных гирь 125 шт. по 25 кг общей массой 3125 кг.

Общий вид стенда в режиме мастер-калибровки представлен на рисунке 3 и рисунке 4, рабочий диапазон калибровочного стенда приведен в таблице 1.

Таблица 1 – рабочий диапазон калибровочного стенда ГС-60

| Компонент | Нагрузка | Описание |
|------------------------|-----------|---|
| X (продольная сила) | ±5000 Н | Действует в моментной точке ТВ коллинеарно с их осью; положительное направление - против потока |
| Y (нормальная сила) | ± 20000 Н | Действует в моментной точке ТВ перпендикулярно их оси в плоскости симметрии; положительное направление - вверх |
| Z (боковая сила) | ± 5000 Н | Действует в моментной точке ТВ перпендикулярно их оси в плоскости симметрии; положительное направление – вправо относительно потока |

Продолжение таблицы 1

| | | |
|----------------------------|------------------------|--|
| M_x (момент крена) | $\pm 2000 \text{ Н м}$ | Действует вокруг X; положительное направление вектора момента – по правилу правой руки в положительном направлении X |
| M_y (момент рыскания) | $\pm 2000 \text{ Нм}$ | Действует вокруг Y; положительное направление вектора момента – по правилу правой руки в положительном направлении Y |
| M_z (момент тангажа) | $\pm 6000 \text{ Нм}$ | Действует вокруг Z; положительное направление вектора момента – по правилу правой руки в положительном направлении Z |

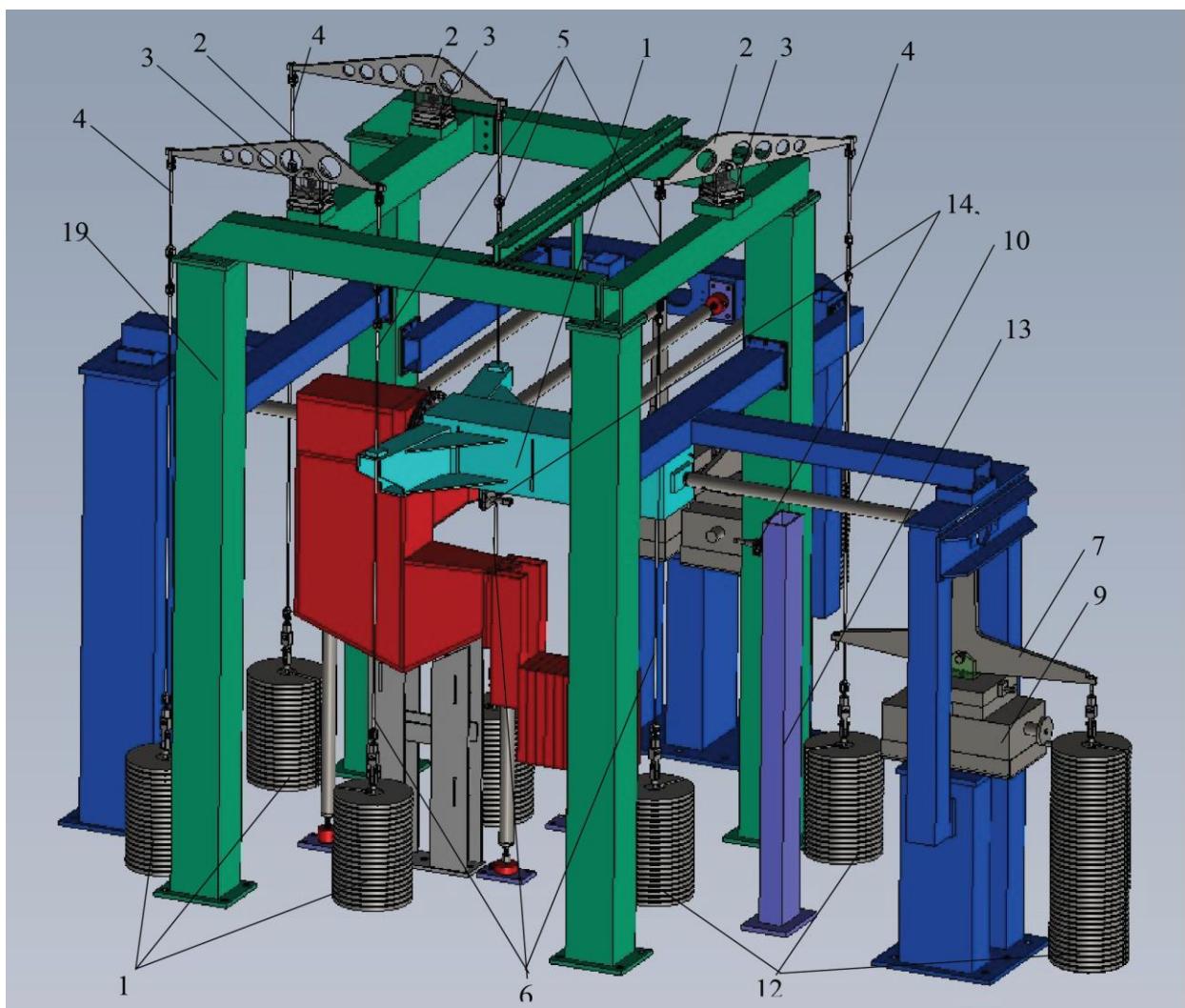


Рисунок 3 – стенд в режиме мастер-калибровки (вид спереди)

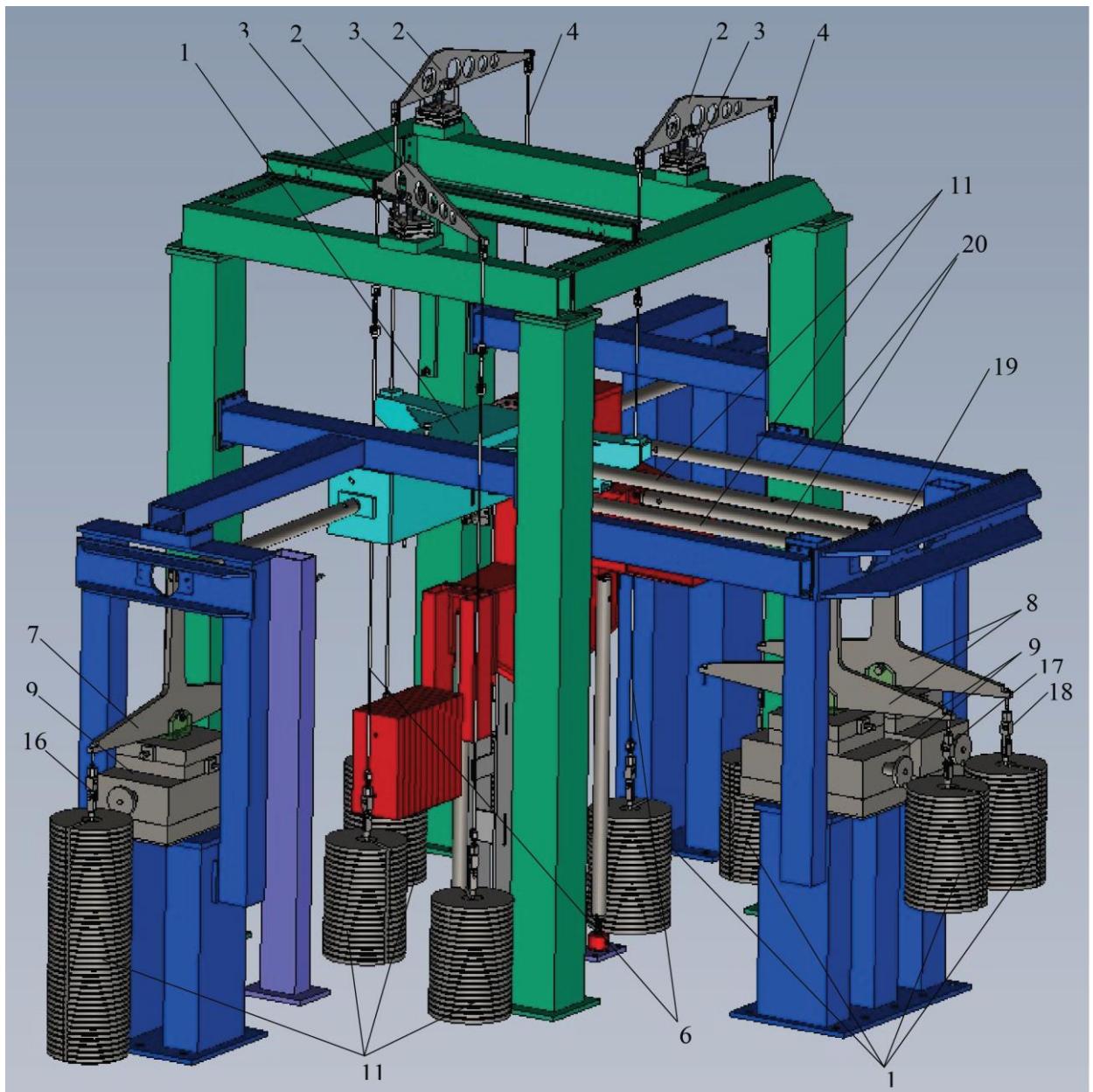


Рисунок 4 – стенд в режиме мастер-калибровки (вид сзади)

Обозначения на рисунках 3,4:

- 1 – калибровочная модель
- 2 – рычаги вертикальной силы Y
- 3 – двух- координатный механизм перемещения
- 4, 5 – тяги вертикальной силы +Y
- 6 – тяги вертикальной силы -Y
- 7 – «Качалка» X
- 8 – «Качалки» Z
- 9 – трёх- координатный механизм перемещения
- 10 – штанга осевой силы X
- 11 – штанги боковой силы Z
- 12 – грузы
- 13 – приборный стол
- 14, 15 – лазер и чувствительный элемент системы измерения деформаций

- 16 – тяга осевой силы X
 17 – тяга боковой силы Z – H1
 18 – тяга боковой силы Z – H2
 19 – силовая рама
 20 – штанги, соединяющие измерительную раму с динамометрами Z.

1.1 Технические характеристики

Силы и моменты силы, действующие на тензометрические весы (ТВ), определяются в системе координат в соответствии с ГОСТ 20058-80 при совмещении начала системы с моментной точкой ТВ. На Рисунке 3 представлена схема для определений сил указанных в таблице 2.

Таблица 2 – Определение действующих сил калибровочного стенда ГС-60

| | | |
|-----------------|----|---|
| Нормальная сила | Y | Действует в моментной точке ТВ перпендикулярно их оси в плоскости симметрии; положительное направление - вверх |
| Боковая сила | Z | Действует в моментной точке ТВ перпендикулярно их оси в плоскости симметрии; положительное направление – вправо при взгляде против потока |
| Продольная сила | X | Действует в моментной точке ТВ коллинеарно с их осью; положительное направление - против потока |
| Момент тангажа | Mz | Действует вокруг Z; положительное направление вектора момента – по правилу правой руки в положительном направлении Z |
| Момент рыскания | My | Действует вокруг Y; положительное направление вектора момента – по правилу правой руки в положительном направлении Y |
| Момент крена | Mx | Действует вокруг X; положительное направление вектора момента – по правилу правой руки в положительном направлении X |

Рисунок 5 –

1.1.1 Точность позиционирования тензометрических весов

При калибровке или применении тензометрических весов точность моментных компонент может быть в значительной степени подвержена влиянию неточного позиционирования моментной точки.

Моментная точка тензовесов – это не их физический центр. Она расположена произвольно в опорной системе координат (как правило, эта точка совмещена с «электрическим центром» компонента M_z).

Достаточную воспроизводимость обеспечивает тщательное крепление ТВ в процессе их установки на калибровочный стенд.

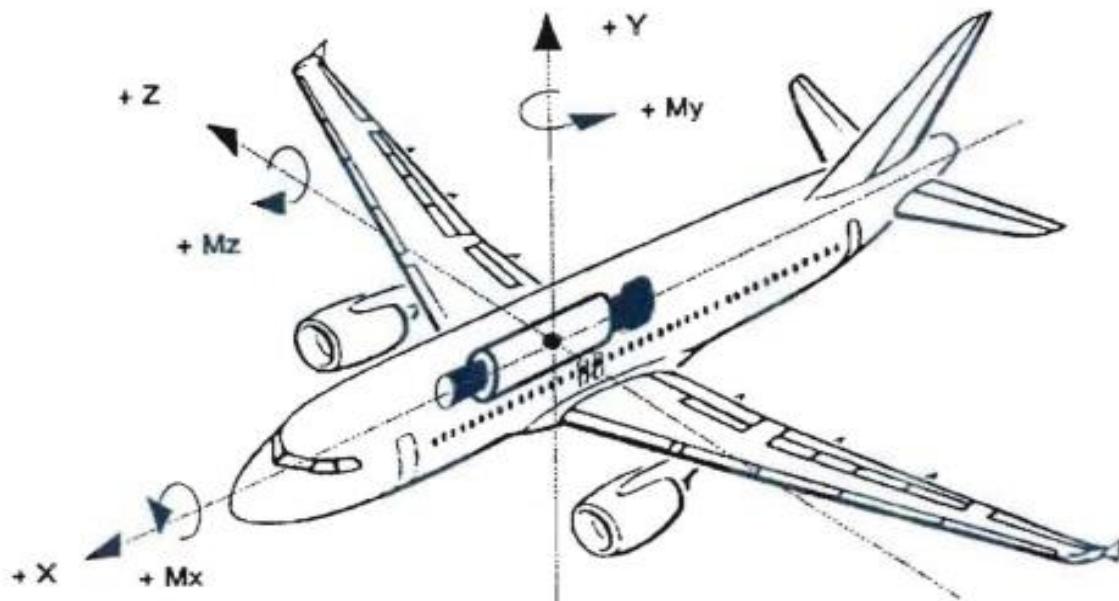


Рисунок 6 – направление осей тензометрических весов

Разрешающая способность не должна превышать $1/10$ значений точности, приведенных в параграфе 2.2.

1.1.2 Рабочие характеристики

Время одной точки нагружения, примерно равное 13 секундам, является следствием, а не требованием: главная цель – выполнение калибровки при одном уровне температуры в одной рабочей смене (8 часов).

1.1.3 Габариты и масса

В собранном состоянии автоматизированный калибровочный стенд имеет габариты:

– длина – 4,3 м,

- ширина – 3,0 м,
- высота – 2,5 м.

Масса стенда 4 950 кг.

Масса стенда с опорной плитой – 28 150 кг.

1.2 Состав стенда

1.2.1 Описание стенда

Калибровочный стенд представляет собой комплекс оборудования для полностью автоматизированной калибровки тензометров. Используемое техническое решение базируется на концепции, характеризующейся разделением функций «нагружения» и «измерения» на две различные задачи, в отличие от традиционно используемых калибровочных установок.

Общий вид калибровочного стенда в конфигурации «Калибровка» представлен на Рисунках 2 и 3. Лестница и монтажные площадки на рисунках не показаны.

1.2.2 Механическая система стенда

Механическая система калибровочного стенда 6ГС-60 включает в себя следующие основные элементы:

- опорная плита,
- узел измерения,
- система нагружения,
- система подачи сжатого воздуха;
- оборудование для мастер-калибровки.

Опорная плита предназначена для монтажа силовой рамы и других механических элементов стенда. Плита состоит из четырех частей, соединенных болтами, общим весом 24 000 кг. Высокая степень «плоскостности» верхней поверхности плиты достигается высокоточной обработкой поверхности плиты в сборе. Опорная плита устанавливается на специальный мощный фундамент и выставляется строго горизонтально при помощи регулируемых опор. В нашем случае погрешность установки плиты не превосходит 0,3мм на 1м (т.е. 1'). При наличие заметных вибраций фундамента, предусмотрена установка опорной плиты на виброгасящие пневмоопоры.

Узел измерения состоит из очень жесткой и массивной (вес ~ 2800 кг) измерительной рамы 3 (рисунок 1), которая при помощи тяг 10 соединена с прецизионными динамометрами 11 типа TOP-Z30A и TOP-Z4A (HBM), закрепленными на силовой раме 2 и опорной плите 1. Основными преимуществами узла измерения являются отсутствие подвижных соединений, т.е. трения, высокая жесткость, длительная стабильность и высокая линейность. Дополнительным преимуществом узла измерения является то, что начало координат стенда находится на пересечении осей датчиков осевой, вертикальной и боковой нагрузок, что делает матрицу нагрузок стенда аналогичной матрице нагрузок, испытываемых тензовесов.

Система нагружения состоит из нагружающей рамы 4, шести пневматических силовозбудителей 13 (актуаторы АКТ 15кН-140 и АКТ 8кН-68) и силовых тяг 12.

Система подачи сжатого воздуха состоит из электрического компрессора с ресивером, систем контроля пневматики AKS5000, AKS6000 и MC 300-S.

Оборудование для мастер-калибровки состоит из калибровочной модели, многокоординатных столов, рычагов, качалок, жестких и гибких тяг, а также комплекта эталонных грузов 125 шт по 25 кг общим весом 3125 кг.

2 Мастер – Калибровка

Мастер-калибровка (МК) – это калибровка самого стенда. Она предназначена для определения соотношений между сигналами образцовых датчиков силы (динамометров) и истинными нагрузками. Для создания калиброванных нагрузок при мастер-калибровке применяется прямое нагружение с использованием эталонных грузов и прецизионных рычагов. На основании данных МК составляется матрица взаимных влияний самого стенда. При калибровке тензовесов, используя сигналы динамометров и матрицу взаимных влияний стенда, рассчитывают истинные нагрузки на калибруемые весы.

2.1 Подготовка конфигурации стенда к режиму «Мастер-Калибровка»

Обычно калибровочный стенд после окончания работы находится в конфигурации «Калибровка». Перед проведением Мастер-Калибровки необходимо выполнить ряд работ.

2.1.1 Проверка совпадения осей системы измерения с осями стендса

Проверить параллельность осей штанг 10 (красные), соединяющих измерительную раму 3 с динамометрами 11, осям Y, Z и X стендса.



Рисунок 7 – установка отвесов Z



Рисунок 8 – установка отвеса X

Для этого:

- на штанги 10 оси Z в двух сечениях установить отвесы и измерить расстояние от конца отвесов до края опорной плиты L1 и L2, как показано на рисунке 8,
- при необходимости, изменяя положение динамометров относительно силовой рамы, добиться равенства $L1 = L2$,
- на штанге 10 оси X закрепить два отвеса в сечениях I и II на некотором расстоянии друг от друга, а в Т-образный паз в опорной плите 1 установить специальную вставку, определяющую середину паза, как показано на рисунке 9,
- передвигая вставку измерить расстояние от конца отвеса до середины паза в сечениях I и II. При необходимости, изменяя положение динамометра относительно силовой рамы, добиться равенства значений,
- вертикальность штанг 10 Y и горизонтальность штанг 10 Z и X контролируется при помощи рамочного уровня.

В дальнейшем штанги 10, соединяющие измерительную раму с динамометрами по оси Z и X, можно использовать как эквивалент осей стенда.

2.1.2 Демонтаж элементов стенда.

Во-первых, полностью демонтировать систему автоматизированного нагружения. Для этого надо отсоединить желтые штанги (12), соединяющие нагружающую раму (4) с силовозбудителями (13), указанные на рисунке 2. Фотографии составляющих представлены на рисунке 8 – рисунке 10. При этом пневмоцилиндры силовозбудителей должны быть зафиксированы в среднем положении с помощью специальных вставок, которые устанавливаются в зазоры между поршнем и цилиндром. Вставки должны быть зафиксированы в нужном положении с помощью клейкой ленты. Это необходимо для того, чтобы гофрированные мембранны внутри силовозбудителя находились в правильном положении.

Внимание: любое движение поршня не под давлением может привести к повреждению гофрированных мембран.

Во-вторых, отсоединить от балки (6) нагружающую раму (2), указанные на рисунке 2 и опустить ее на землю. Фотография рамы (2) представлена на рисунке 11



Рисунок 9 – демонтаж силовозбудителя



Рисунок 10 – установка вставок



Рисунок 11 – снятые тяги



Рисунок 12 – демонтируемая рама

В результате стенд подготовлен к монтажу оборудования для создания конфигурации «Мастер – Калибровка».

На рисунке 3 и рисунке 4 представлен калибровочный стенд 6ГС-60 в конфигурации «Мастер-Калибровка». Для лучшего понимания конструкции лестница и монтажные площадки на рисунках не показаны.

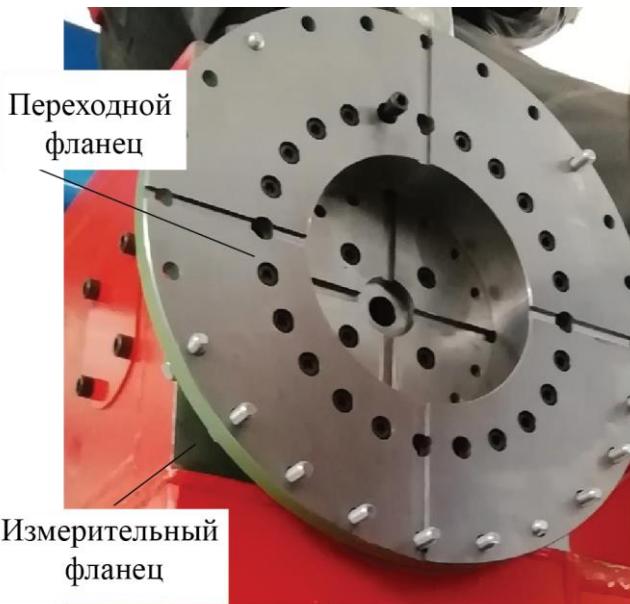


Рисунок 13 – переходный фланец



Рисунок 14 – калибровочная модель

2.1.3 Сборка калибровочного стенда в конфигурации «Мастер-Калибровка».

Сборка производится в следующем порядке:

- к измерительному фланцу стенда, показанного на рисунке 12, при помощи болтов крепится переходной фланец,
- к переходному фланцу при помощи болтов крепится калибровочная модель 1, рисунок 13. Для обеспечения правильного положения калибровочной модели относительно фланца в ортогональных пазах этих деталей устанавливаются шпонки,
- на площадке силовой рамы 2 (рисунок 2) установить трехкоординатные механизмы перемещения (9) и «качалки» (7) и (8) («качалка» обеспечивает изменение направления нагрузки на 90°). На рисунке 14 представлена «качалка», задающая нагрузку по оси X, а на рисунке 15 – по оси Z,
- соединить КМ (1) с вертикальными плечами «качалок» (7) горизонтальными штангами-трубами зеленого цвета (10) (тяга X, рисунок 17) и (11) (тяги Z, рисунок 18). В торцы тяг ввернуть упругие шарниры с правой и левой резьбой, что позволяет вращением штанг менять их длину. На концах горизонтальных плеч «качалок» установить капсульные уровни, рисунок 18, предназначенные для контроля горизонтальности плеч «качалки»,



Рисунок 15 – качалка X



Рисунок 16 – качалки Z



Рисунок 17 – тяга X



Рисунок 18 – тяги Z

– на верхние площадки силовой рамы (4) устанавливаются двухкоординатные механизмы перемещения (3) и неравноплечие (2:1) рычаги (2) вертикального нагружения, рисунок 20, рисунок 21,



Рисунок 19 – уровень



Рисунок 20 – тяги и качалки Z



Рисунок 21 – качалка Z



Рисунок 22 – механизм Z с уровнем

– соединить калибровочную модель 1 с короткими плечами рычагов вертикального нагружения (2) через подвесы, установленные на верхней стороне КМ, рисунок 10, рисунок 11. Соединение производится при помощи вертикальных тяг (5), длина которых регулируется рым-болтами,

– к нижней поверхности КМ через самоустанавливающиеся подвесы крепить вертикальные тяги (6), предназначенные для нагружения противоположного направления. Установить на верхней горизонтальной поверхности рычагов капсульные уровни, рисунок 21,

– на горизонтальных штангах (Х, Н1 и Н2) и «качалках» установить систему повторного выравнивания, состоящую из лазеров, закрепленных на концах вертикальных плеч «качалок», двухкоординатных позиционно-чувствительных устройств, закрепленных при помощи хомутов на штангах, фотография хомутов представлена на рисунке 22 и двухканальных цифровых индикаторов, показанных на рисунке 23,



Рисунок 23 – хомут на тяге



Рисунок 24 – индикатор

- на ножевые опоры плеч рычагов вертикального нагружения (2) повесить тяги (4), а на горизонтальные рычаги «качалок» – тяги (16) и (17).
- на приборный столб (13), не связанный с силовой рамой, устанавливается лазер (14), рисунок 24, а на КМ – двухкоординатное чувствительное устройство системы измерения деформации (15), рисунок 25.



Рисунок 25 – лазерный источник



Рисунок 26 – лазерный примник

2.2 Выравнивание системы нагружения стенда перед «Мастер-Калибровкой»

В процессе монтажа измерительной рамы при помощи регулировки длины штанг, связывающих измерительную раму (ИР) с динамометрами, было достигнуто такое положение измерительного фланца, когда его плоскость приняла вертикальное положение перпендикулярно к Т-образным пазам опорной плиты, а ортогональные шпоночные пазы фланца приняли вертикальное и горизонтальное положение соответственно. Также было установлено требуемое (параллельно соответствующим осям) положение штанг.

Нагрузки стенда измеряются относительно системы координат, которая привязана к измерительному фланцу ИР, поэтому калибровочные нагрузки относительно этой системы координат являются истинными нагрузками для калибровки. Перед началом Мастер-Калибровки необходимо добиться параллельности оси всех нагружающих элементов стендса соответствующим осям этой системы координат.

2.2.1 Выравнивание системы вертикального нагружения

Нагружение в направлении оси –Y производится через сферические подшипники, расположенные на нижней поверхности КМ (1) при помощи тяг (6) и набора грузов (12),

рисунок 3, рисунок 4. Так как эти подшипники самоустанавливающиеся, а нагрузка строго вертикальна (сила веса), то регулировки не требуется.

Для правильного нагружения в направление оси +Y необходимо:

– обеспечить вертикальность тяг 5, соединяющих КМ 1 и нагружающие рычаги 2 (Рисунок 10,11). Регулировка выполняется путем перемещения кареток двухкоординатного механизма 3, на который установлены нагружающие рычаги 2. Точный контроль вертикальности выполняется с помощью отвесов и теодолита. Для этого на ножи коротких плеч рычагов 2 при помощи специального узла крепится шпагат отвеса (Рисунок 26 фото), который проходит рядом со штангой 5 (Рисунок 27 фото),



Рисунок 27 – крепление отвеса

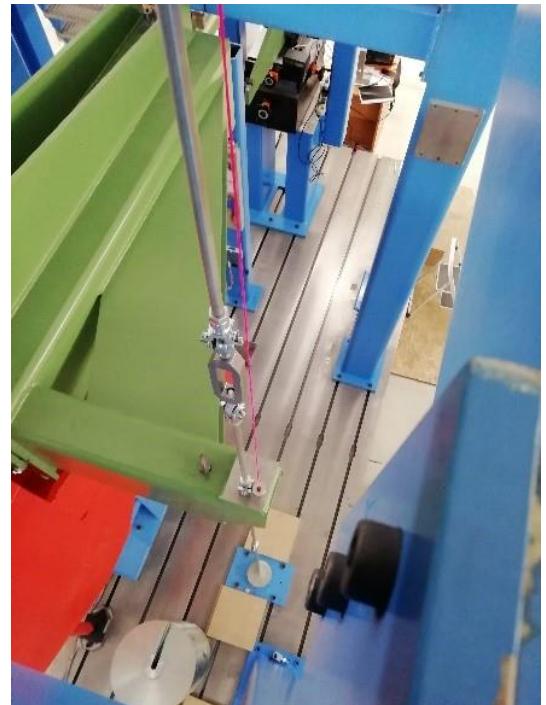


Рисунок 28 – проводка отвеса

– вертикальность тяг (5) определяется сравнением положения тяги и нити отвеса в окуляре теодолита, рисунок 28, рисунок 29. Отвесы на рычагах остаются в течении всей мастер-калибровки,

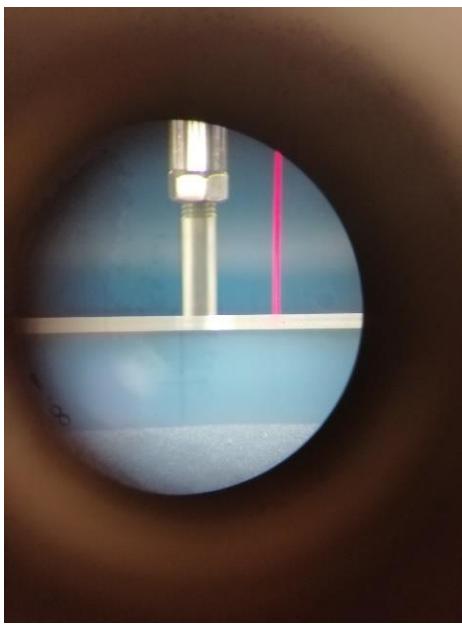


Рисунок 29 – отвес в окуляре

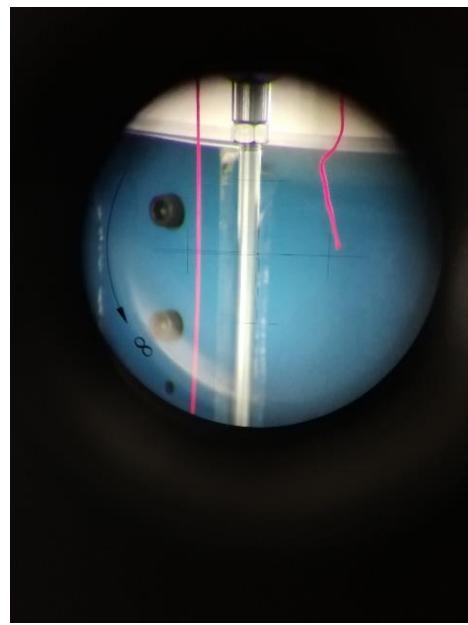


Рисунок 30 – отвес в окуляре с отметкой

– установить нагружающие рычаги (2) в горизонтальное положение путем регулировки длины тяг 5 между рычагом и КМ, используя стяжной тендер, рисунок 30, рисунок 31. Контроль горизонтальности производится по капсциальному уровню, установленному на верхней горизонтальной поверхности рычага, рисунок 32, рисунок 33,



Рисунок 31 – стяжной тендер

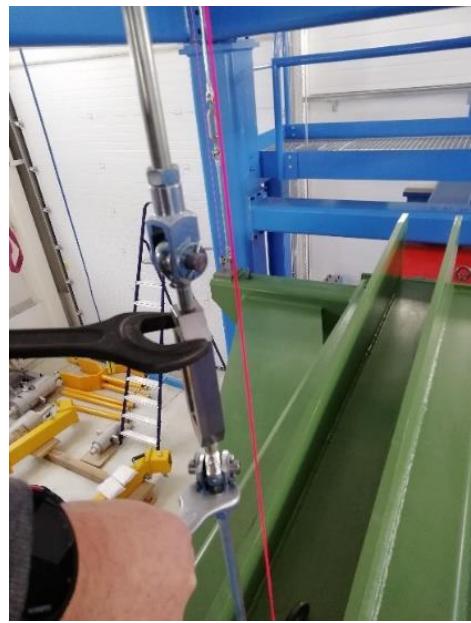


Рисунок 32 – отвес в окуляре с отметкой

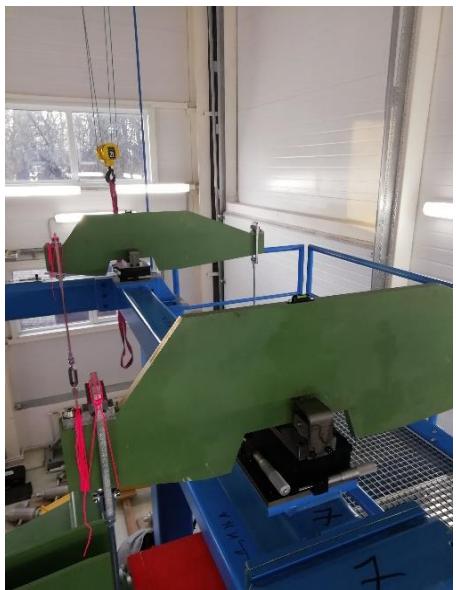


Рисунок 33 – рычаги



Рисунок 34 – контроль по уровню на рычаге

– на ножки длинных плеч рычагов (2) вешаются тяги (4) (V1о, V2о и V3о) с чашками для грузов, которые остаются в течении всей мастер-калибровки.

2.2.2 Выравнивание системы горизонтального нагружения по оси X

- совместить ось штанги (10) с осью стенда X, рисунок 3, рисунок 4:
 - а) на штанге (10) закрепить два отвеса в сечениях I и II на некотором расстоянии друг от друга;
 - б) в ближайший к отвесам Т-образный паз в опорной плите установить специальную вставку, определяющую середину паза, рисунок 34;
 - в) передвигая вставку измерить расстояние от конца отвеса до середины паза в сечениях I и II, рисунок 35;
 - г) передвигая в направлении оси Z каретку трехкоординатного механизма (3), добиться одинакового расстояния между отвесом и серединой паза в сечениях I и II.

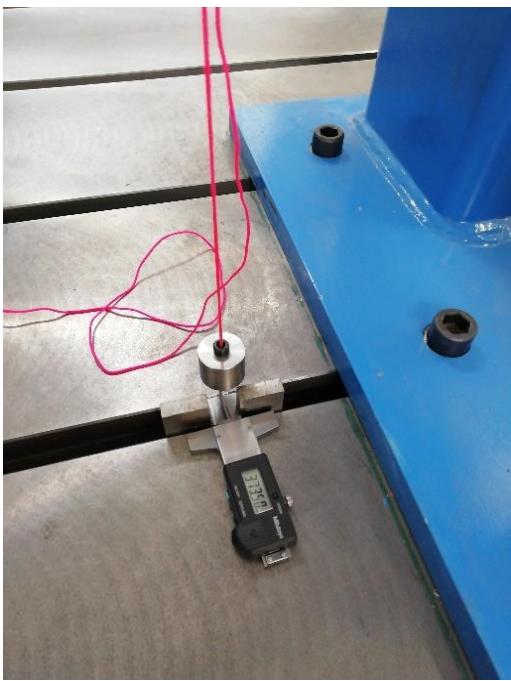


Рисунок 35 – вставка в паз



Рисунок 36 – контроль отвеса

- выставить горизонтальное положение штанги 10:
 - а) закрепить на штанге (10) рамочный уровень;
 - б) передвигая в направлении оси Y каретку трехкоординатного механизма (3), установить горизонтальное положение штанги (10);
- выставить горизонтальное положение «качалки» (7):
 - а) по рамочному уровню, приложенному к площадке, расположенной на нижней поверхности горизонтальных плеч «качалки», выставить горизонтальное положение, перемещая каретку трехкоординатного механизма 3 в направлении оси X;
 - б) при помощи крепежных винтов выставить капсульные уровни «качалок» в нулевое положение. В дальнейшем горизонтальность «качалки» будем определять по этим уровням;
 - в) зафиксировать показания двухканального индикатора системы повторного выравнивания.

2.2.3 Выравнивание системы горизонтального нагружения по оси Z

- совместить оси нагружающих штанг (11) с осью стенда Z, рисунок 3, рисунок 4:
 - а) большим штангенциркулем измерить расстояние между зелеными штангами (11) и красными (20) в двух сечениях, расположенными на некотором расстоянии друг от друга, рисунок 37 фото;



Рисунок 37 – измерение соосности

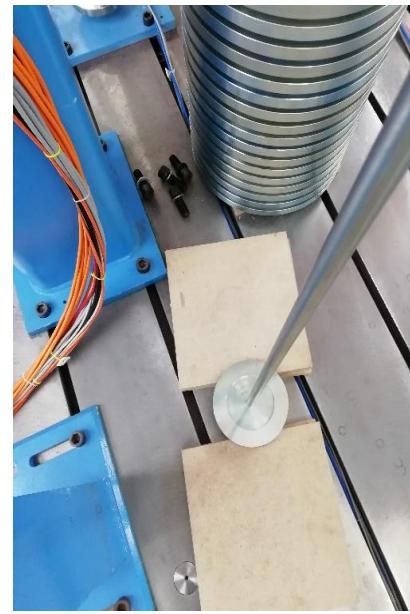


Рисунок 38 – грузоприемная чашка

б) передвигая в направлении оси X каретку трехкоординатного механизма (3), добиться одинакового расстояния между штангами;

– выставить горизонтальное положение штанг (11):

а) закрепить на штанге (11) рамочный уровень;

б) передвигая в направлении Y каретку трехкоординатного механизма 3, установить горизонтальное положение штанги;

– выставить горизонтальное положение «качалок» Z (8):

а) по уровню, приложенному к площадке, расположенной на нижней горизонтальной поверхности горизонтальных плеч «качалки» (8), выставить горизонт, перемещая каретку трехкоординатного механизма (3) в направлении оси Z;

б) на нижние горизонтальные поверхности «качалок» (8) установлены капсулные уровни, рисунок 18. При помощи крепежных винтов выставить их в нулевое положение. В дальнейшем горизонтальность «качалки» будем определять по этим уровням;

в) зафиксировать показания двухканального индикатора, рисунок 23, системы повторного выравнивания.

Маркировать и взвесить тяги поз. (16) ($T_x = 61,17 \text{ Н}$), поз. (17) ($H_1 = 610,24 \text{ Н}$) и поз. (18) ($H_2 = 60,24 \text{ Н}$) вместе с чашками для грузов. Вес этих элементов необходимо учитывать в процессе основной калибровки.

После завершения выравнивания всех элементов стенда необходимо зарегистрировать «нулевые» сигналы динамометров, что позволит определить вес «тары» стенда в условиях отсутствия дополнительных нагрузок во всех направлениях.

По получению положительного результата и проверки выполнения всех вышеперечисленных действий стенд готов к проведению Мастер-Калибровки. При мастер-калибровке обеспечить контролировать зазор от 5 до 15 мм между подкладками, грузоприемными чашками и гилями, рисунок 38. Подкладки устанавливаются для предотвращения травм работников при возможном обрыве, или любой другой внезапной неисправности (вплоть до разрушения), любого узла стендса в ходе мастер-калибровки.

3 Проведение «Мастер-Калибровки»

С 22.11.19 по 29.11.19 г. специалистами фирмы–производителя совместно с сотрудниками НИО-7 была проведена мастер-калибровка калибровочного стенда 6ГС-60.

На Рисунке 6 представлена схема стендса 6ГС-60 с указанием систем координат (ISO и ГОСТ), в которых представлены результаты калибровки, указаны направления нагрузок, возникающие при установке грузов на различные тяги стенда. При этом тяги V1, V2 и V3 создают на калибровочную модель вертикальные нагрузки, H1 и H2 – горизонтальные по оси Z, а X – по оси X. Буква i – in указывает что нагрузка направлена внутрь стенда, а o – out – наружу.

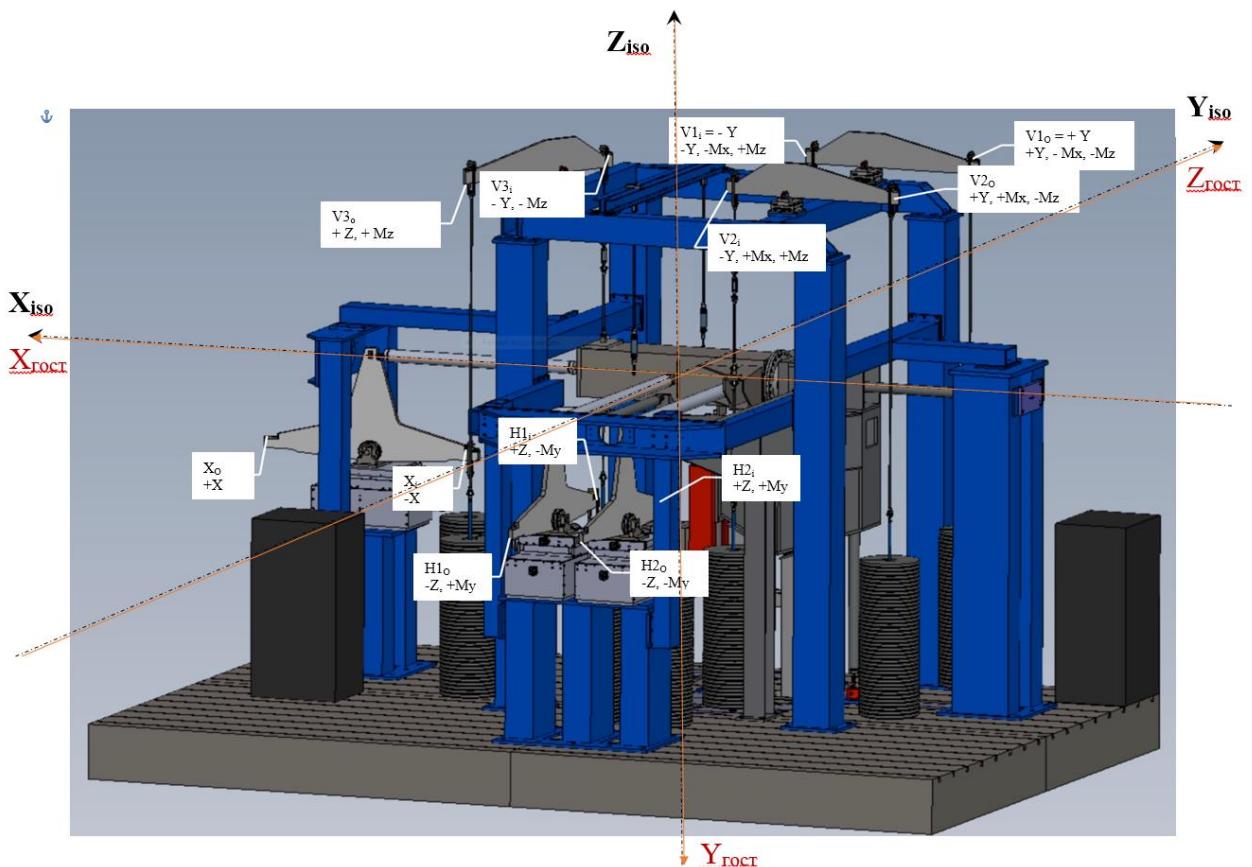


Рисунок 39 – системы координат стенда по ISO и ГОСТ

В таблице 3 показаны комбинации нагрузений грузов на различные тяги, которые обеспечивают получение требуемой нагрузки.

В правом столбце «Нагрузка 6ГС-20» представлены нагрузки, которые необходимо приложить к тензовесам, закрепленным за задний конус, на стенде 6ГС-20 в стандартной системе координат, принятой в ЦАГИ, чтобы получить аналогичное нагружение весов.

Необходимо отметить, что на всех калибровочных стенах ЦАГИ при проведении калибровок внутримодельные тензометры крепятся к «земле» за задний конус, а к переднему (модельному) конусу при помощи базового устройства прикладываются нагрузки. На стенде 6ГС-60 тензометры крепятся к «земле» за передний конус, а к заднему через базовое устройство прикладываются нагрузки. При нагружении силами Y и Z, чтобы напряженно-деформируемое состояние тензометров и знаки сигналов тензометров не изменились, необходимо изменить направление нагрузки на противоположное. Это учтено при составлении таблицы 3.

Таблица 3 – комбинации нагружений

| Нагрузка (ISO) | Нагрузка (ГОСТ) (крепление тензометров за передний конус) | Рычаг/Направление | Нагрузка 6ГС-20, (крепление тензометров за задний конус) |
|--------------------|--|-------------------|---|
| +X _{iso} | +X _{гост} | X _o | +X |
| -X _{iso} | -X _{гост} | X _i | -X |
| +Y _{iso} | +Z _{гост} | H1i ; H2i | +Z |
| -Y _{iso} | -M _{Zгост} | H1o ; H2o | -Z |
| +Z _{iso} | -Y _{гост} | V1o ; V2o ; V3o | -Y |
| -Z _{iso} | +Y _{гост} | V1i ; V2i ; V3i | +Y |
| +M _{Xiso} | +M _{Xгост} | V1i ; V2o | +M _x |
| -M _{Xiso} | -M _{Xгост} | V2i ; V1o | -M _x |
| +M _{Yiso} | +M _{Zгост} | V1i ; V2i; V3o | +M _z |
| -M _{Yiso} | -M _{Zгост} | V1o ; V2o; V3i | -M _z |
| +M _{Ziso} | -M _{Yгост} | H2i ; H1o | -M _y |
| -M _{Ziso} | +M _{Yгост} | H1i ; H2o | +M _y |

Отдельно приведены веса калибровочных грузов-дисков в соответствии с их номерами. Чтобы точно знать величину приложенной нагрузки при мастер-калибровке строго отслеживалось нахождение каждого груза на тягах стенда.

В процессе мастер-калибровки также учитывался вес тяг T_x, T_{h1} и T_{h2} которые в процессе калибровки переставлялись с одного плеча «качалки» на другое. Так для компонента X вес тяги вместе с «чашкой» составляет – T_x = 60,17 Н, а вес тяг для нагружения по оси Z – T_{h1} = 60,24 Н и T_{h2} = 60,24 Н. Тяги вертикального нагружения в процессе калибровки не переставлялись, а их вес автоматически учитывается при взятии нулевого отсчета.

3.1 Выполнение «Мастер-Калибровки»

Для выполнения «Мастер-Калибровки» необходимо выполнить последовательность изолированных и комбинированных наружений в соответствии с заданной программой. В процессе калибровки происходит деформация элементов стенда, а, следовательно, и рассогласование осей стенда и системы нагружения. Требуется систематически совмещать эти системы.

3.2 Выравнивание системы нагружения стендса во время «Мастер-Калибровки»

Нагрузки стенда измеряются относительно системы координат, которая привязана к фланцу измерительной рамы (ИР). Грузы, используемые для создания различных нагрузок, создают только вертикальные силы (сила тяжести) и могут переводиться в систему координат фланца ИР путем переноса сил с учетом возникающих моментов или пересчета с использованием информации о деформациях стенда.

Деформация стендса в первую очередь определяется деформацией динамометров. В силу специальной конструкции измерительная рама и калибровочная модель могут считаться абсолютно жесткими телами, поэтому деформация, измеренная в любом месте КМ, может быть представлена как деформация фланца. Таким образом, информация от установленной на стенде системы измерения деформации (поз. (14), (15)) может быть использована для определения положения фланца измерительной рамы относительно начального (нулевого) положения.

3.2.1 Выравнивание во время вертикального нагружения (Y, Mz и Mx)

При нагружении силы Y в отрицательном направлении нагрузка всегда выравниваются самостоятельно в вертикальном направлении, так как нагружение производится через самоустанавливающиеся сферические подшипники.

Нагружение в положительном направлении по оси Y производится через вертикальные тяги (5), рисунок 10, рисунок 11, соединяющие КМ (1) и горизонтальные рычаги (2), которые при нагружении изменяют свое исходное положение. Для обеспечения ортогональности нагружения необходимо после каждого изменения нагрузки проводить выравнивание горизонтальности рычагов (2). Для этого при помощи стяжных болтов изменяется длина тяг (5), а контроль горизонтальности производится по капсульным уровням, установленным на этих рычагах.

3.2.2 Выравнивание во время горизонтального нагружения (X, Z и My)

В процессе подготовки к МК были выставлены в горизонтальное положение штанги (10) (X), (11) (Z) и «качалки» (7), (8) и были зафиксированы показания двухканальных лазерных индикаторов повторного выравнивания. При каждом изменении нагрузки штанги (10) и (11) меняют своё положение. Горизонтальное положение штангам возвращается перемещением продольной каретки трехкоординатного механизма (9) в направлении оси штанги. При этом горизонтальность определяется совпадением текущих показаний индикатора, рисунок 23 с ранее зафиксированными данными.

3.2.3 Выравнивание во время комбинированного нагружения

Каждый раз после изменения нагрузки оба направления должны быть выровнены в соответствии с вышеописанными процедурами.

3.3 Программа нагружения

В приложении 3 – приложении 8 представлены:

- порядок проведения изолированных и комбинированных калибровок;
- показано расположение нагружающих дисков на тягах необходимое для получения требуемой нагрузки;
- приведены точные величины нагрузок, шаги и количество шагов нагружения;
- указаны места контроля и средства регулировки горизонтального положения рычагов нагружения;

Всего проведено 36 изолированных и комбинированных калибровок стенда, имена файлов калибровок представлены в таблице 4.

Таблица 4 – комбинации калибровочных нагрузок стенда

| Нагрузка | X | Y | Z | Mx | My | Mz |
|----------|------------------|--------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| X | D012pX D013nX | D028pXnY D029nXnY | D020pXnZ D021nXnZ | | D022pXpMy D023nXpMy | D024pXpMz D025nXpMz |
| Y | | D001pY D002nY | | | | |
| Z | | D030pZnY D031nZnY | D014pZ D015nZ | D036pZnMx D037nZnMx | | D026pZpMz D027nZpMz |
| Mx | | D032pMxnY D033nMxnY | D038nMxnZ | D010nMx D011pMx | | |
| My | | D043pMynY | D018npMypZ D019pnMynZ | D039pMynMx | D016pMy D017nMy | |
| Mz | | D004pnMznY D034pMznY D035nMznY | | | | D008nMz D009pMz |

Пример расшифровки названия файла D028pXnY:

D028 – номер нагружения, X – основная нагрузка, Y – подгрузка;

p – positive, n – negative - положительное и отрицательное направление нагрузки;

3.4 Результаты «Мастер-Калибровки»

Полные данные результатов «Мастер-Калибровки» стенда 6ГС-60 хранятся в виде файлов в системе регистрации калибровочных данных стенда, а исходные значения в виде файлов в формате *.XLS.

По результатам изолированных калибровок были определены основные влияния компонентов друг на друга. Минимальные значения влияния компонент из дальнейших расчетов исключались. В таблице 5 представлены сигналы (мкВ/В) динамометров L1, L2...L6 измерительной системы стенда при приложении максимальных +/- нагрузок. Показания, выделенные желтым цветом, были использованы при определении матрицы стенда.

Таблица 5 – матрица максимальных сигналов динамометров стенда

| Crosstalkmatrix | | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----|
| X | 4059,1 | 2,2 | 0,6 | 0,1 | 1,7 | 5,0 | |
| Y | 5,6 | 2044,3 | 0,9 | 6,5 | 0,1 | 16,6 | |
| Z | 14,4 | 18,1 | 1618,7 | 33,8 | 5,7 | 10,0 | |
| Mx | 2,3 | 3,6 | 216,3 | 2165,1 | 0,3 | 2,0 | |
| My | 12,0 | 3,7 | 434,5 | 3,4 | 1086,7 | 1,7 | |
| Mz | 1,3 | 1067,1 | 0,4 | 1,0 | 0,2 | 2132,4 | |

С использованием полученной матрицы стенда были обработаны результаты всех калибровок, т.е. по измеренным сигналам динамометров были рассчитаны приложенные

нагрузки. Разность между приложенными и расчетными нагрузками в процентах по отношению к максимальным, представлена на диаграмме рисунке 40.

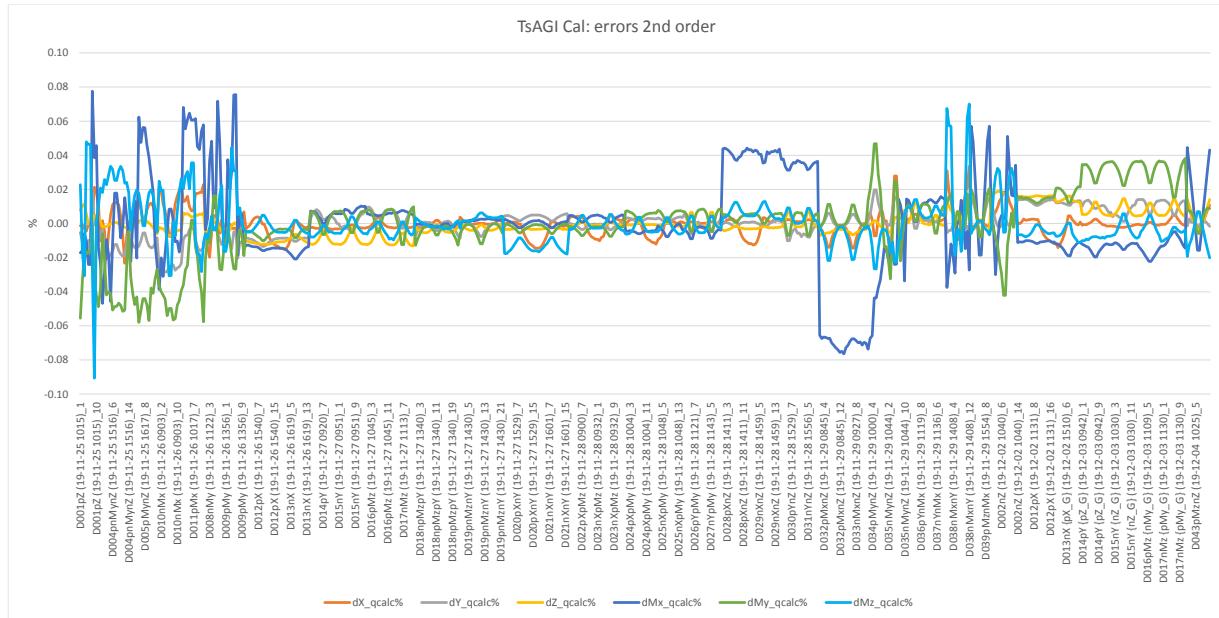


Рисунок 40 – разность между приложенными и расчетными нагрузками в %.

Из диаграммы можно видеть, что погрешность задания сил X, Y и Z во всех сериях калибровки не превышает 0,02% от максимальной нагрузки. Погрешность задания момента тангажа Mz находится в диапазоне от +0,04% до -0,06%. Для моментов крена Mx и рыскания My погрешности находятся в пределах $\pm 0,08\%$. По результатам проведенной мастер-калибровки стенда предварительно рассчитанная приведенная погрешность по силам не превышает 0,03 % и по моменту сил 0,06 %.

4 Метрологическая аттестация стенда

Для метрологического обеспечения калибровок и поверок тензовесов необходимо иметь эталон утвержденного типа с соответствующими значениями точности и диапазонами измерений. Обновлённые в 2018 году государственные поверочные схемы силы (Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 2498 от 22.10.2019 г.) и момента силы (Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 1794 от 31.07.2019 г.) не содержат в составе ни многокомпонентных аэродинамических весов, ни стендов для их метрологического обеспечения. Поэтому необходимо обеспечить передачу единиц массы и длины к стенду с помощью специального эталона – набора мер массы. В связи с этим в 2020 году были проведены работы по аттестации эталона (набора мер массы) и локальной поверочной схемы для обеспечения прослеживаемости передачи единиц силы и момента силы от стендса к тензовесам.

В рамках работ по аттестации калибровочного стенда в 2020 году выполнено:

- разработана локальная поверочная схема;
- разработана методика косвенных измерений на основе имеющихся эталонов для оценки погрешности измерений;
- выполнена аттестация в качестве эталона набора мер массы;
- разработана эксплуатационная документацию набора;
- разработана программа и методика испытаний в целях утверждения типа набора, методика поверки и проект описания типа;
- согласно программе испытаний, получены опытные данные и оформить в виде протокола;
- разработана эксплуатационная документация стенда;
- разработана программа и методика испытаний в целях утверждения типа набора, методика поверки и проект описания типа;
- согласно программе испытаний, получены опытные данные и оформлены в виде протокола;

По результатам метрологической аттестации стенду присвоены погрешности 0,03% по силам и 0,06% по моменту сил.

5 Апробация калибровочного стенда 6ГС-60

Апробация стенда и пуско-наладочные работы проводилась на тензовесах для АДТ-Т128, ранее откалиброванных на эталонных стенах 6ГС-20 и 6ГС-40М. Протоколы калибровок на стенде 6ГС-20 и 6ГС-60 приведены в приложение Б и В соответственно.

Из-за особенностей стенда 6ГС-20 калибровка тензовесов приводилась по сокращённой программе в размере 430 точек, продолжительностью порядка 120 часов. Массив аналогичной размерности на стенде 6ГС-60 можно получить за 12 часов. В рамках данной работы на новом стенде проведено полное исследование тензовесов для АДТ-Т128, получен массив калибровочных данных длиной в 1584 точки, что заняло порядка 30 часов. По результатам калибровок на двух стенах получены формулы и погрешности тензовесов по каждому компоненту - приведены в таблице №6. На рисунках 41 и 42 показаны диаграммы распределения абсолютной погрешности по номерам отсчётов.

Таблица 6 Характеристики ТВ на стенде 6ГС-20 и 6ГС-60

| Стенд | 6ГС-20 | | 6ГС-60 | |
|-----------|---------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|
| Компонент | СКО (кг, кгм) | Приведенная погрешность (%) | СКО (кг, кгм) | Приведенная погрешность (%) |
| X | 0.713 | 0.36 | 0.14 | 0.07 |
| Y | 0.383 | 0.02 | 0.13 | 0.01 |
| Z | 0.123 | 0.03 | 0.09 | 0.02 |
| Mx | 0.045 | 0.04 | 0.09 | 0.07 |
| My | 0.03 | 0.04 | 0.01 | 0.02 |
| Mz | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.03 |

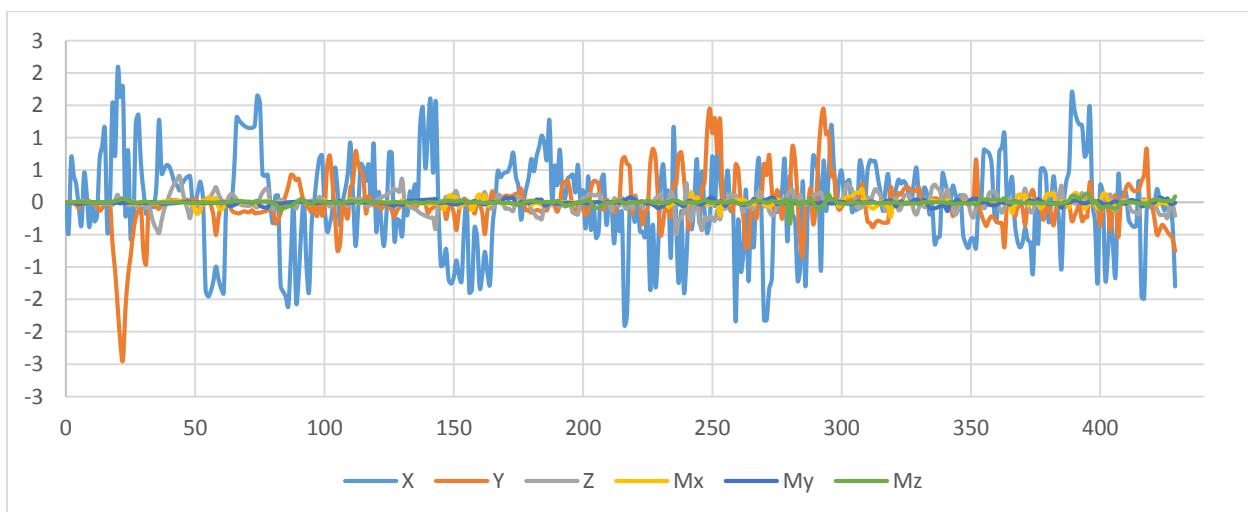


Рисунок 41 Погрешность калибровки тензовесов на 6ГС-20

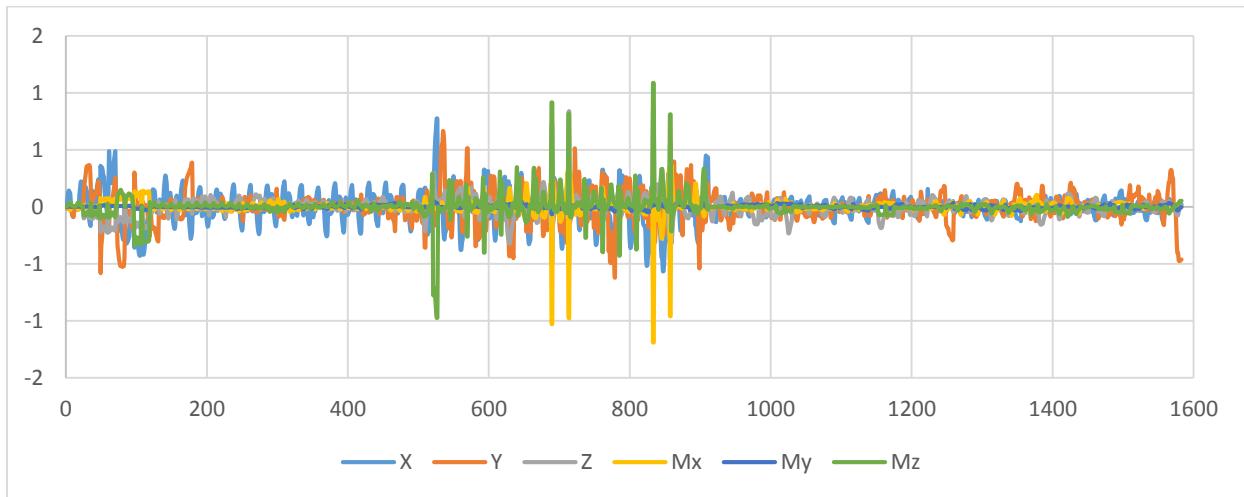


Рисунок 42 Погрешность калибровки тензометров на 6ГС-60

По результатам апробации и сравнению калибровок на стендах 6ГС-20 и 6ГС-60 можно сделать вывод о 10 кратном сокращении времени на калибровку тензометров и уменьшению суммарной погрешности в 2 раза на новом стенде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена мастер-калибровка стенда ГС-60, выполненная в ходе работ по испытаниям в целях утверждения типа средства измерения. Сделаны следующие выводы:

Получена возможность калибровки тензовесов в рамках рабочего диапазона стенда по силам X, Y, Z, с приведённой погрешностью не хуже 0,03%.

Получена возможность калибровки тензовесов в рамках рабочего диапазона стенда по моменту сил M_x, M_y, M_z, с приведённой погрешностью не хуже 0,06%.

Освоена и апробирована калибровка тензовесов в полностью автоматическом режиме. Удалось достичь минимального времени калибровки 6-ти компонентных внутримодельных тензовесов по матрице 6*27 за 12 часов, без учёта затрат времени на установку и демонтаж тензовесов на стенде.

Задачи, поставленные в данной работе решены в полном объеме на высоком научно-техническом уровне.

Результаты работы будут использованы при проектировании, изготовлении и калибровке тензовесов, необходимых в исследованиях аэродинамических компоновок двигательных установок перспективных ЛА в новых проектах МС-21, SSJ, ШФДМС и других работах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Исследования по развитию стеновой базы для калибровки аэродинамических тензовесов: Отчет о НИР / ЦАГИ; Руководитель Ю.В. Карташев; Инв. № 07-4600-НИО-7, 2013. – 94 с.
- 2 Исследования принципиальных схем и конструктивных узлов стендов для калибровки аэродинамических тензовесов на макетах и натурных стендах: Отчет о НИР / ЦАГИ; Руководитель Ю.В. Карташев; Инв. № 07-4636-НИО-7, 2015. – 86 с.
- 3 Исследование по развитию методов и средств калибровки многокомпонентных тензометрических весов и созданию систем управления и измерения шестикомпонентного эталонного стенда при нагрузках до 12 тс. Отчет о НИР / ЦАГИ; Руководитель Ю.В. Карташев; Инв. № 07-4583-НИО-7, 2012. – 83 с.