

Научная статья
УДК 53.082.17
DOI: 10.34759/vst-2021-4-48-61

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО КАЛИБРОВКЕ ШЕСТИКОМПОНЕНТНЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕСОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ВИНТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Василий Васильевич Петроневич¹, Владимир Васильевич Лютов², Ваган Самвелович Манвелян³,
Александр Андреевич Куликов⁴, Сергей Валерьевич Зимогоров⁵✉

^{1,2,3,4,5}Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ),
Жуковский, Московская область, Россия

^{1,2}mera@tsagi.ru

³vagan.manvelyan@tsagi.ru

⁴kulikov@tsagi.ru

⁵szimogorov@yandex.ru ✉

Аннотация. Работа посвящена проведению исследований по статической калибровке вращающихся тензометрических весов для измерения шести компонентов полной аэродинамической силы и моментов сил, действующих на винт летательного аппарата во время эксперимента в аэродинамических трубах. Выполнен анализ различных математических моделей тензовесов, получены формулы преобразования сигналов измерительных тензомостов в значения силы и моментов сил в статическом режиме калибровки, а также определена погрешность измерения по каждому компоненту. Проведено сравнение полученных результатов с расчётными значениями сигналов и взаимовлияниями компонентов тензовесов. Полученные результаты позволяют разработать методику и рекомендации для статической калибровки вращающихся тензометрических весов для измерения характеристик винтов летательных аппаратов и могут быть учтены при разработке новых конструктивных схем.

Ключевые слова: калибровка тензометрических весов, вращающиеся тензометрические весы, погрешности калибровки вращающихся тензометрических весов, алгоритм калибровки, математические модели

Для цитирования: Петроневич В.В., Лютов В.В., Манвелян В.С., Куликов А.А., Зимогоров С.В. Исследования по калибровке шестикомпонентных вращающихся тензометрических весов для испытаний винтов летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 48-61. DOI: 10.34759/vst-2021-4-48-61

Original article

STUDIES ON SIX-COMPONENT ROTATING STRAIN-GAUGE BALANCE CALIBRATION FOR AIRCRAFT PROPELLERS TESTING

Vasily V. Petronevich¹, Vladimir V. Lyutov², Vagan S. Manvelyan³,
Alexander A. Kulikov⁴, Sergey V. Zimogorov⁵ ✉

^{1,2,3,4,5}Central Aerohydrodynamic Institute named after prof. N.E. Zhukovsky (TsAGI),
Zhukovsky, Moscow Region, Russia

^{1,2}mera@tsagi.ru

³vagan.manvelyan@tsagi.ru

⁴kulikov@tsagi.ru

⁵szimogorov@yandex.ru ✉

Abstract

The presented article is devoted to the studies being performed on rotating strain-gauge balance calibration measuring six components of the total aerodynamic force and the moment of forces acting on the aircraft propeller during an experiment in wind tunnels.

The article describes basic principles of multicomponent aerodynamic scales calibration, working formulas computing, errors determining and other criteria for calibration quality evaluating.

The calibration machine prototype, by which calibration of the strain-gauge balance was performed, was considered. The article presents the technique for the strain-gauge balance working formulas obtaining by the least-squares method in the matrix form for three types of mathematical models, namely 6×27 , 6×33 and 6×96 . Analysis of the mathematical models quality was being performed by such criteria as absolute, reduced and relative and errors, authenticity and standard error of the regression coefficients.

The authors indicate and analyze the trends of methods and tools development for processing the results and strain-gauge balance loading to improve calibration accuracy. Methods of optimal experiment planning and artificial neuron networks application both for calibration results processing and calibration work benches control relate to these trends.

The largest reduced error was 0.50% for the mathematical model with the 6×27 dimensionality. The error for the 6×33 model was 0.32%, and 0.2% for the 6×96 model. Calibration error of 0.2% conforms the best world samples of rotating strain-gauge balances.

The obtained results allow developing a technique and recommendations for static calibration of rotating strain-gauge balance for characteristics measuring of aircraft propellers and can be accounted for while developing new design schemes of strain gauge balance. Besides, the obtained data are the scientific and technical groundwork for creating a dynamic calibration machine for strain-gauge balance calibration in rotation. Such work bench is necessary, for example, to account for the centrifugal force impact on the strain-gauge balance readings.

Keywords: strain gauge balance calibration, rotating strain gauge balance, calibration errors of rotating strain gauge balance, calibration algorithm, mathematical models

For citation: Petronevich V.V., Lyutov V.V., Manvelyan V.S., Kulikov A.A., Zimogorov S.V. Studies on six-component rotating strain-gauge balance calibration for aircraft propellers testing. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 48-61. DOI: 10.34759/vst-2021-4-48-61

Введение

Вращающиеся тензометрические весы (ВВ) предназначены для измерения суммарных аэродинамических нагрузок, действующих на винт ЛА

в процессе аэродинамического эксперимента, с целью оптимизации его конструкции и повышения технических характеристик. Перед эксплу-

атацией тензовесов необходимо провести их калибровку – определить зависимости между сигналами измерительных тензомостов и значениями заданных эталонных нагрузок, а также определить основные метрологические характеристики [1].

Расчётные методы при проектировании аэродинамических тензовесов имеют ряд допущений и ограничений и не позволяют получить достоверные значения погрешности измерений аэродинамических нагрузок. Исследования по статической калибровке вращающихся тензовесов позволяют выбрать оптимальную математическую модель (степень и размерность полинома), достоверно описывающую взаимосвязи между компонентами, получить рабочие формулы тензовесов и оценить погрешности измерения [2].

Основной проблемой при статической калибровке вращающихся тензовесов являются их нестандартная конструкция и большая жёсткость измерительных балок. Конструкция тензовесов не позволяет установить их на имеющиеся эталонные стенды для калибровки тензовесов. Для решения этой проблемы был создан макет калибровочного стенда, который позволил провести исследования по калибровке ВВ и отработать методику нагружений. Из-за небольшой деформации измерительных балок, по некоторым ком-

понентам $(\vec{F}_y; \vec{F}_z)$, приращение сигнала $\frac{\Delta R}{R}$ из-

мерительных тензомостов от нагрузки имеет небольшое значение, вследствие чего значение погрешности по данным компонентам велико. Эта проблема решается с помощью выбора оптимальной по оценке погрешности математической мо-

дели, описывающей зависимости между сигналами измерительных мостов и приложенными эталонными нагрузками [3].

Вращающиеся тензовесы

Вращающиеся тензовесы (ТВ) представляют собой моноблочную конструкцию цилиндрической формы. На рис. 1 приведен общий вид вращающихся тензовесов, в табл. 1 представлен диапазон нагрузок, измеряемых тензовесами.

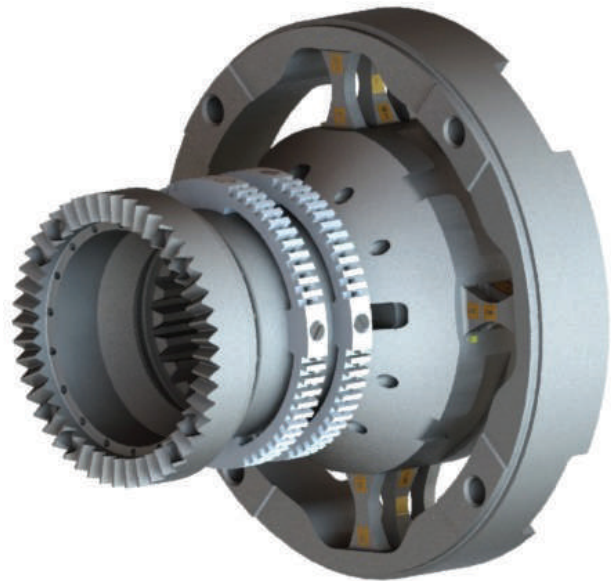


Рис. 1. Общий вид ТВ

Подробное описание конструкции, расчеты по компонентам и ожидаемые сигналы измерительных тензометрических мостов представлены в статьях [3, 4] и защищены патентом на изобретение №2657340 [5].

Таблица 1

Диапазон нагрузок, измеряемых ТВ

Измеряемый компонент		Нагрузки
Наименование компонента	Условное обозначение	
Сила тяги, кГс	\vec{F}_x	от -800 до +800
Продольная сила, кГс	\vec{F}_y	от -250 до +250
Боковая сила, кГс	\vec{F}_z	от -250 до +250
Крутящий момент, кГс·м	\vec{M}_x	от -133 до +133
Изгибающие моменты, кГс·м	\vec{M}_y	от -60 до +60
	\vec{M}_z	от -60 до +60

Макет стенда для статической калибровки вращающихся тензососов

Основное назначение калибровочного стенда – передача (воспроизведение) эталонных значений сил и момента сил от гирь или силозадающих устройств на тензососы в заданной точке. На рис. 2 представлен общий вид макета калибровочного стенда для статической калибровки ВВ.

зуются для парного нагружения компонентов сил.

Калибровка вращающихся тензососов

Основной задачей калибровки тензососов является получение зависимости сигналов измерительных тензососов от задаваемых сил и момента сил, а также расчёт и оценка погрешнос-

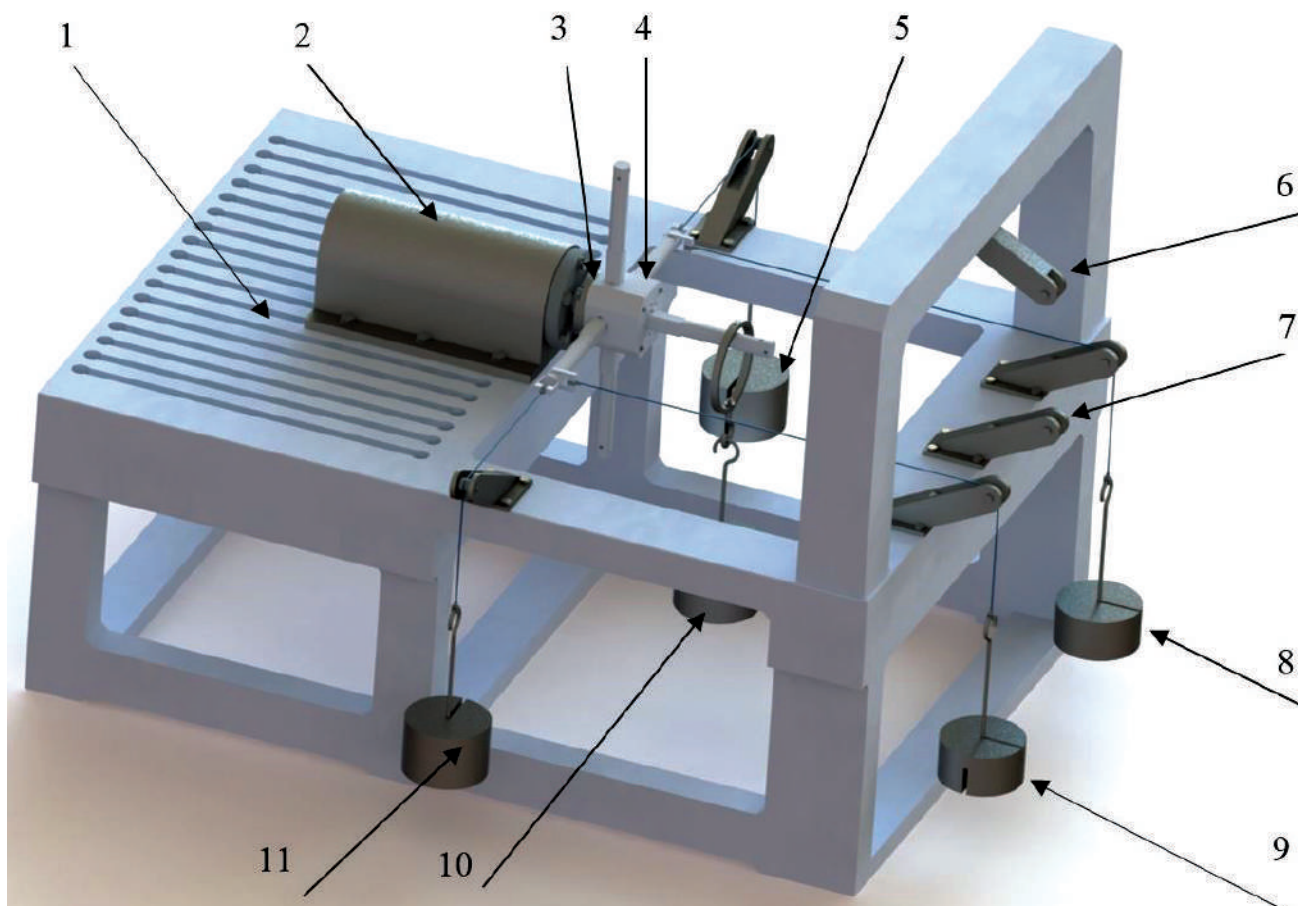


Рис. 2. Макет стенда для статической калибровки вращающихся тензососов

Вращающиеся тензососы 3 устанавливаются в державку 2 на жёсткую и массивную плиту 1. Калибровочное приспособление 4 обеспечивает передачу эталонных значений сил в начало системы координат тензососов и воспроизведение момента сил. Калибровка тензососов проводится гравитационным способом: через блоки эталонными гирями. Воспроизведение силы по компоненту \vec{F}_x выполняется с помощью узлов 8 и 9, по \vec{F}_y – 10 и по \vec{F}_z – 11 и 5. Моменты сил воспроизводятся с помощью плеч и разности загрузок платформ 10, 8 и 9. Узлы 6 и 7 исполь-

ти калибровки. В процессе калибровки тензососов проводится ряд ступенчатых нагружений для каждого обособленного компонента (изолированное нагружение), а также комбинации нагружений двух компонентов, каждый с каждым [6]. На рис. 3 представлена схема калибровки одного компонента в положительном и отрицательном направлении.

Изолированные калибровки позволяют определить основные коэффициенты регрессии для каждого компонента и линейные коэффициенты взаимовлияний. Комбинированное нагружение проводится для определения взаимовлияний второго порядка между компонентами и их ма-



Рис. 3. Схема калибровки для одного компонента тензосесов

тематической компенсации при обработке результатов калибровок. Схема калибровки парного сочетания компонентов представлена на рис. 4.

Классический подход [6] к калибровке тензосесов подразумевает шесть изолированных калибровок, по одной для каждого компонента, и 26 парных знакопеременных калибровок. После проведения всех нагружений из калибровочных данных формируются два массива: A и B , размерностью $b \times n$, содержащие сигналы тензомостов и эталонные значения нагрузок соответственно. Количество строк n зависит от плана калибровки и выбранной математической модели. Дальнейшая обработка калибровочных данных сводится к методу наименьших квадратов (МНК) в матричном виде [7]. В частности, МНК может

применяться для решения систем линейных уравнений [8]:

$$Ax = B. \tag{1}$$

Матрица сигналов A достраивается в зависимости от выбранной математической модели, имеет размерность $m \times n$, где $m > n$ (число строк матрицы A больше неизвестных переменных), решение подобной системы уравнений сводится к нахождению такого вектора \vec{x}_i для каждого i -го компонента тензосесов, при котором расстояние между $\vec{A}_i \vec{x}_i$ и \vec{B}_i будет минимально. Для этого применяется критерий минимизации суммы квадратов левой и правой части системы уравнений (1), т.е. [7]:

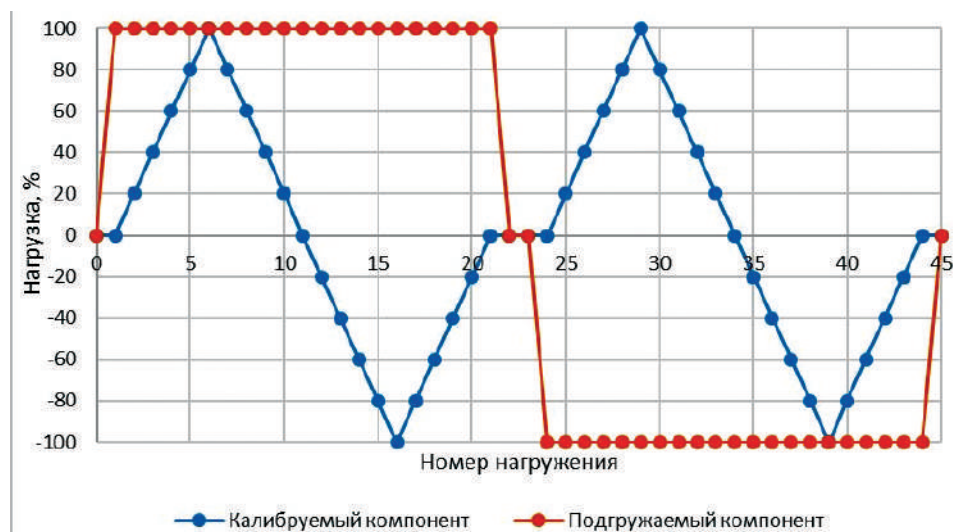


Рис. 4. Схема калибровки парного сочетания компонентов

$$(Ax - b)^T (Ax - b) \rightarrow \min_x. \quad (2)$$

Задача минимизации выражения (2) приводит к решению системы уравнений:

$$A^T A x = A^T B. \quad (3)$$

Из уравнения (3) можно получить формулу, используемую для нахождения коэффициентов регрессии [8] или же формул тензовесов:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T B, \quad (4)$$

где x – матрица коэффициентов регрессии;

A – матрица сигналов измерительных тензомостов;

B – матрица значений эталонных нагрузок.

Оценка калибровки тензовесов

Основными критериями оценки качества калибровки являются погрешности, достоверность математической модели и стандартные ошибки коэффициентов регрессии.

Под погрешностью калибровки тензовесов обычно подразумевают приведенную погрешность – среднеквадратическое отклонение (СКО) от абсолютной погрешности, приведенное к рабочему диапазону тензовесов для каждого компонента [9].

Абсолютная погрешность

$$\Delta X = X_{\text{изм}} - X_{\text{д}}, \quad (5)$$

где $X_{\text{изм}}$ – значения нагрузок, полученные по формулам тензовесов;

$X_{\text{д}}$ – действительные значения эталонных нагрузок.

Среднеквадратическое отклонение

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (6)$$

где n – длина выборки;

x_i – i -й элемент выборки

\bar{x} – среднее арифметическое значение выборки.

Приведенная погрешность (в %)

$$\gamma = \frac{S}{L} 100\%, \quad (7)$$

где L – рабочий диапазон каждого компонента тензовесов.

Достоверность, или коэффициент детерминации R^2 , показывающий, насколько математичес-

кая модель тензовесов соответствует реальным данным, может принимать значения от 0 до 1. Чем ближе коэффициент детерминации к 1, тем точнее выбранная математическая модель описывает поведение объекта:

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_m^2}{\sigma_n^2}, \quad (8)$$

где σ_m^2 – дисперсия случайной величины x (нагрузок тензовесов);

σ_n^2 – дисперсия случайной величины y (сигналов тензовесов)

С помощью стандартных ошибок коэффициентов S_{bi} определяется уровень надежности вычисленных коэффициентов регрессии: проверяются гипотезы относительно значимости вычисленных оценок коэффициентов регрессии, строятся доверительные интервалы. Стандартные ошибки коэффициентов являются квадратными корнями из элементов главной диагонали ковариационной матрицы и вычисляются по формуле [9]:

$$S_{bi} = \sqrt{\sigma^2 (X^T X)^{-1}_{ii}}, \quad (9)$$

где σ^2 – дисперсия выборки;

X – матрица с зависимыми признаками, т.е. модель сигналов тензовесов;

ii – элементы главной диагонали.

Описанные методы оценки калибровки тензовесов позволяют провести аналитическое сравнение различных математических моделей вращающихся тензовесов по нескольким критериям.

Математическая модель тензовесов

Задача калибровки тензовесов гораздо шире, чем физический процесс нагружения и регистрации показаний. Необходима математическая модель поведения тензовесов вместе с подходящими зависимостями для определения неизвестных коэффициентов модели на основе экспериментальных (калибровочных) данных. Необходимо определить схему нагружения, обеспечивающую достаточное число нагружений для достоверного определения всех коэффициентов выбранной модели [7].

Одной из основных задач проектирования тензовесов является уменьшение взаимовлияния измерительных каналов тензомостов, т.е. иска-

жения сигнала моста от нагрузки, приложенной на другой компонент. Как правило, взаимовлияние компонентов полностью исключить невозможно. Взаимодействия могут быть классифицированы как линейные и нелинейные. Линейные влияния обычно являются результатом конструкционных отклонений: производственные допуски и погрешности, смещение тензорезисторов и т.д. Нелинейные связи объясняются рассогласованием форм и взаимной ориентации деталей из-за сложных деформаций при нагружении тензосов [10].

Математические модели тензосов основаны на представлении сигналов измерительных тензосов полиномами компонентов нагрузки. В общей форме модели выдают электрический выходной сигнал от тензоса i -го компонента R_i , который связан с приложенными одно- или многокомпонентными нагрузками F полиномиальной функцией n -го порядка.

Математическая модель тензосов 6 × 27

Модель тензосов 6 × 27 принято называть классической [6]. Она содержит 27 коэффициентов регрессии для каждого компонента. В ее состав входят линейные члены b , квадратичные и члены второго порядка c . Модель представляет собой полином второго порядка и записывается в форме уравнения

$$R_i = a_i + \sum_{j=1}^n b_{i,j} F_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=j+1}^n c_{i,j,k} F_j F_k, \quad (10)$$

где R_i – расчётное значение нагрузки по i -му компоненту;

- i, j, k – индексы компонентов;
- a – смещение функции относительно нуля;
- n – количество компонентов тензосов.

Для удобства введем обозначения компонентов нагрузок (табл. 2).

Таблица 2

Обозначения компонентов нагрузок

\vec{F}_x	\vec{F}_y	\vec{F}_z	\vec{M}_x	\vec{M}_y	\vec{M}_z
X	Y	Z	Mx	My	Mz

Для нахождения коэффициентов регрессии матрица A из уравнения (4) достраивается комбинациями сигналов тензосов и приводится к виду:

[j=1...6] линейные члены –

$$X_i, Y_i, Z_i, Mx_i, My_i, Mz_i$$

[j=7...12] квадратичные члены –

$$X_i^2, Y_i^2, Z_i^2, Mx_i^2, My_i^2, Mz_i^2$$

[j=13...17] комбинации с компонентом X –

$$XY_i, XZ_i, XMx_i, XMy_i, XMz_i$$

[j=18...21] комбинации с компонентом Y –

$$YZ_i, YMx_i, YMy_i, YMz_i$$

[j=22...24] комбинации с компонентом Z –

$$ZMx_i, ZMy_i, ZMz_i$$

[j=25...26] комбинации с компонентом Mx –

$$MxMy_i, MxMz_i$$

[j=27] комбинации с компонентом My –

$$MyMz_i$$

Распределение ошибки после вычисления расчётных значений нагрузок по формуле (10) приведено на рис. 5. Погрешности вычислений и достоверность приведены в табл. 3.

Классическая модель весов 6 × 27 не полностью описывает поведение вращающихся тензосов; вывод о неучтённых зависимостях и не симметрии минимальных и максимальных значений ошибок по некоторым компонентам можно сделать из табл. 3.

Выбросы на графике превышают СКО более чем в три раза. Полученные формулы (коэффициенты регрессии) не целесообразно применять в эксперименте, так как достоверность полученных результатов невелика. Подобное расхождение может быть устранено введением в математическую модель дополнительных кубических членов.

Математическая модель тензосов 6 × 33

Модель 6 × 33 является расширением классической с включением кубических членов [6] для уточнения поведения тензосов во всём диапазоне положительных и отрицательных нагрузок. Из уравнения (10) с помощью возведения в куб линейных членов можно записать модель 6 × 33 следующим образом:

$$R_i = a_i + \sum_{j=1}^n b_{i,j} F_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=j+1}^n c_{i,j,k} F_j F_k + \sum_{j=1}^n d_{i,j} F_j^3, \quad (11)$$

где d_i – кубические члены регрессии.

Матрица A из уравнения (4) дополняется шестью членами третьего порядка:

[j=28...33] кубические члены –

$$X_i^3, Y_i^3, Z_i^3, Mx_i^3, My_i^3, Mz_i^3.$$

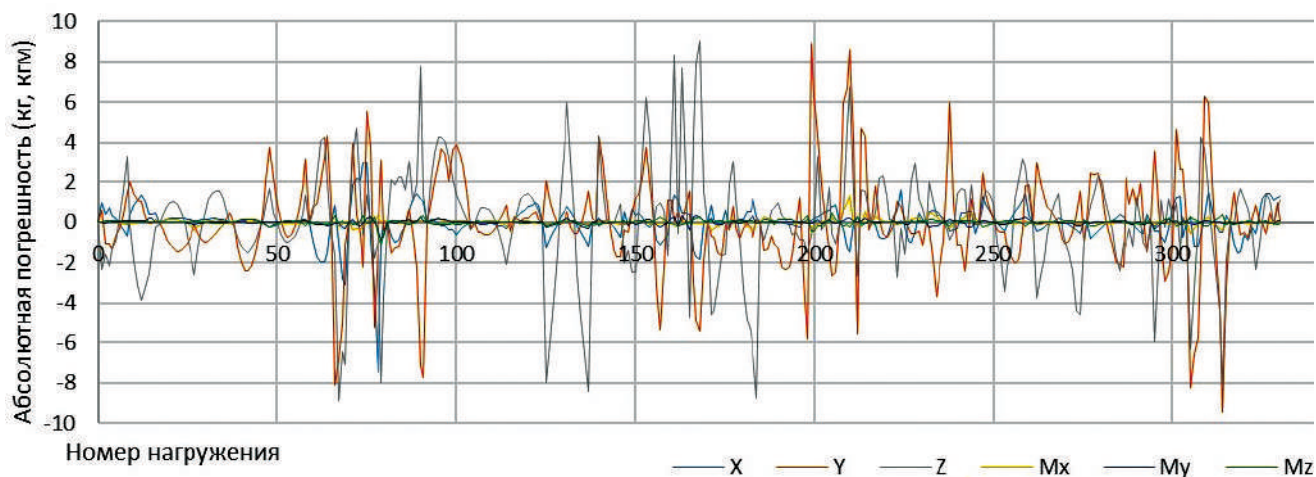


Рис. 5. Распределение ошибки математической модели 6×27

Таблица 3

Статистика калибровки весов по модели 6×27

	X	Y	Z	Mx	My	Mz
СКО, кг, кгм	0,851	2,376	2,610	0,156	0,120	0,130
СКО, %	0,053	0,475	0,492	0,058	0,100	0,108
R ²	0,955	0,943	0,971	0,991	0,972	0,989
Макс Δ	3,028	8,901	9,065	1,277	0,332	0,445
Мин Δ	-7,509	-9,426	-8,879	-0,573	-0,876	-1,046

Распределение ошибки после вычисления расчётных значений нагрузок по формуле (11) представлено на рис. 6. Погрешности вычислений и достоверность приведены в табл. 4.

Введение в полином кубических членов позволило снизить приведенную погрешность калибровки на 30—40% и приблизить достоверность к единице. По-прежнему присутствуют абсолютные погрешности в виде явных выбросов

на графике, которые превышают СКО более чем в три раза. Асимметрия между положительными и отрицательными величинами абсолютной погрешности указывает на то, что не все зависимости учтены данной математической моделью.

Математическая модель тензосесов 6×96

При малогабаритной компоновке тензосесов, в процессе калибровки, довольно часто возника-

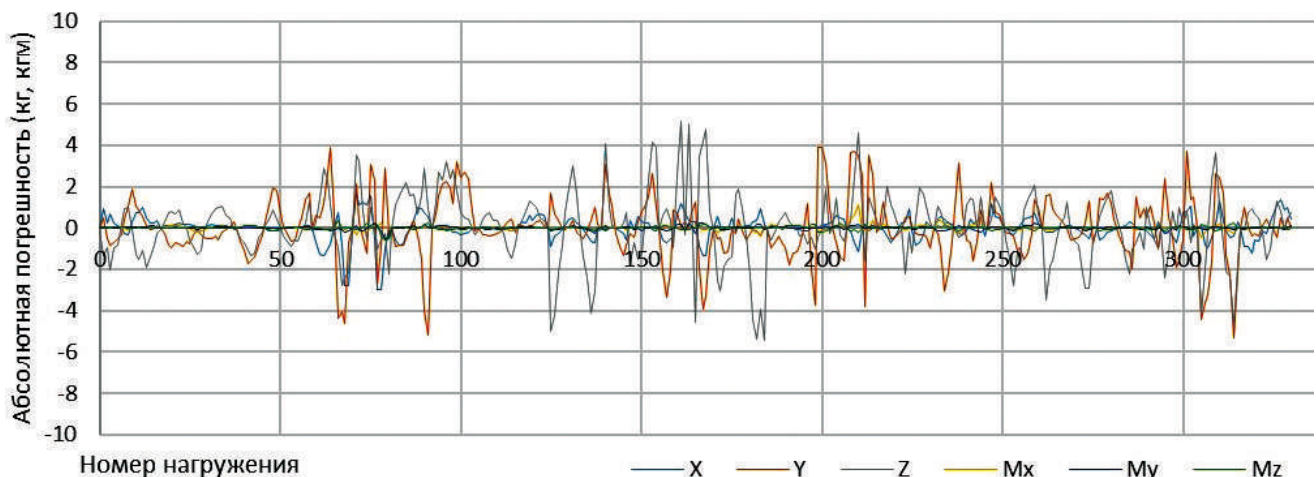


Рис. 6. Распределение ошибки математической модели 6×33

Таблица 4

Статистика калибровки весов по модели 6×33

	X	Y	Z	Mx	My	Mz
СКО, кг, кгм	0,569	1,478	1,638	0,116	0,084	0,085
СКО, %	0,019	0,272	0,321	0,052	0,081	0,091
R ²	0,965	0,987	0,973	0,993	0,989	0,992
Макс Δ	1,698	3,895	4,165	1,139	0,263	0,349
Мин Δ	-3,005	-5,295	-5,456	-0,472	-0,523	-0,570

ют неучтенные сигналы зависимости от направлений нагрузок [11]. В результате подобной асимметрии возникает необходимость определять и использовать различные калибровочные коэффициенты для положительной и отрицательной нагрузки для достижения наибольшей точности калибровки. Чтобы исключить определение и отбор различных калибровочных коэффициентов для положительных и отрицательных сил и момента сил, асимметрию поведения тензосилов можно эффективно учесть расширением математической модели путем введения членов, объединяющих компоненты нагрузки с их абсолютным значением. Математическая модель тензосилов 6×96 [8] представлена формулой:

$$R_i = a_i + \sum_{j=1}^n b1_{i,j} F_j + \sum_{j=1}^n b2_{i,j} |F_j| + \sum_{j=1}^n c1_{i,j} F_j^2 + \sum_{j=1}^n c2_{i,j} F_j |F_j| + \sum_{j=1}^n \sum_{k=j+1}^n c3_{i,j,k} F_j F_k + \sum_{j=1}^n \sum_{k=j+1}^n c4_{i,j,k} |F_j F_k| + \sum_{j=1}^n \sum_{k=j+1}^n c5_{i,j,k} F_j |F_k| + \sum_{j=1}^n \sum_{k=j+1}^n c6_{i,j,k} |F_j| F_k + \sum_{j=1}^n d1_{i,j} F_j^3 + \sum_{j=1}^n d2_{i,j} |F_j^3|. \quad (12)$$

Для нахождения коэффициентов регрессии матрица A из уравнения (4) достраивается комбинациями сигналов тензосилов и приводится к виду:

[j=1...6] линейные члены –

$$X_i, Y_i, Z_i, Mx_i, My_i, Mz_i$$

[j=7...12] модули линейных членов –

$$|X_i|, |Y_i|, |Z_i|, |Mx_i|, |My_i|, |Mz_i|$$

[j=13...18] квадратичные члены –

$$X_i^2, Y_i^2, Z_i^2, Mx_i^2, My_i^2, Mz_i^2$$

[j=19...24] произведения сигналов с их абсолютными значениями –

$$X|X|_i, Y|Y|_i, Z|Z|_i, Mx|Mx|_i, My|My|_i, Mz|Mz|_i$$

[j=25...29] комбинации с компонентом X –

$$XY_i, XZ_i, XMx_i, XMy_i, XMz_i$$

[j=30...33] комбинации с компонентом Y –

$$YZ_i, YMx_i, YMy_i, YMz_i$$

[j=34...36] комбинации с компонентом Z –

$$ZMx_i, ZMy_i, ZMz_i$$

[j=37...38] комбинации с компонентом Mx –

$$MxMy_i, MxMz_i$$

[j=39] комбинации с компонентом My –

$$MyMz_i$$

[j=39...43] абсолютные значения комбинаций с компонентом X –

$$|XY|_i, |XZ|_i, |XMx|_i, |XMy|_i, |XMz|_i$$

[j=44...47] абсолютные значения комбинаций с компонентом Y –

$$|YZ|_i, |YMx|_i, |YMy|_i, |YMz|_i$$

[j=48...50] абсолютные значения комбинаций с компонентом Z –

$$|ZMx|_i, |ZMy|_i, |ZMz|_i$$

[j=51...52] абсолютные значения комбинаций с компонентом Mx –

$$|MxMy|_i, |MxMz|_i$$

[j=53] абсолютные значения комбинаций с компонентом My –

$$|MyMz|_i$$

[j=54...58] комбинации абсолютных значений с компонентом X –

$$X|Y|_i, X|Z|_i, X|Mx|_i, X|My|_i, X|Mz|_i$$

[j=59...62] комбинации абсолютных значений с компонентом Y –

$$Y|Z|_i, Y|Mx|_i, Y|My|_i, Y|Mz|_i$$

[j=63...65] комбинации абсолютных значений с компонентом Z –

$$Z|Mx|_i, Z|My|_i, Z|Mz|_i$$

[j=66...67] комбинации абсолютных значений с компонентом Mx –

$$Mx|My|_i, Mx|Mz|_i$$

[j=68] комбинации абсолютных значений с компонентом My –

$$My|Mz|_i$$

[j=69...73] комбинации с абсолютным значением компонента X –

$$|X|Y|_i, |X|Z|_i, |X|Mx|_i, |X|My|_i, |X|Mz|_i$$

[j=74...77] комбинации с абсолютным значением компонента Y –

$$|Y|Z|_i, |Y|Mx|_i, |Y|My|_i, |Y|Mz|_i$$

[j=78...80] комбинации с абсолютным значением компонента Z –

$$|Z|Mx|_i, |Z|My|_i, |Z|Mz|_i$$

[j=81...82] комбинации с абсолютным значением компонента Mx –

$$|Mx|My|_i, |Mx|Mz|_i$$

[j=83] комбинации с абсолютным значением компонента My –

$$|My|Mz|_i$$

[j=84...90] кубические члены –

$$X_i^3, Y_i^3, Z_i^3, Mx_i^3, My_i^3, Mz_i^3$$

[j=91...96] модули кубических членов –

$$|X_i^3|, |Y_i^3|, |Z_i^3|, |Mx_i^3|, |My_i^3|, |Mz_i^3|$$

Распределение ошибки после вычисления расчётных значений нагрузок по формуле (12) приведено на рис. 7. Погрешности вычислений и достоверность указаны в табл. 5.

Математическая модель 6×96 наиболее достоверно описывает реакцию вращающихся тен-

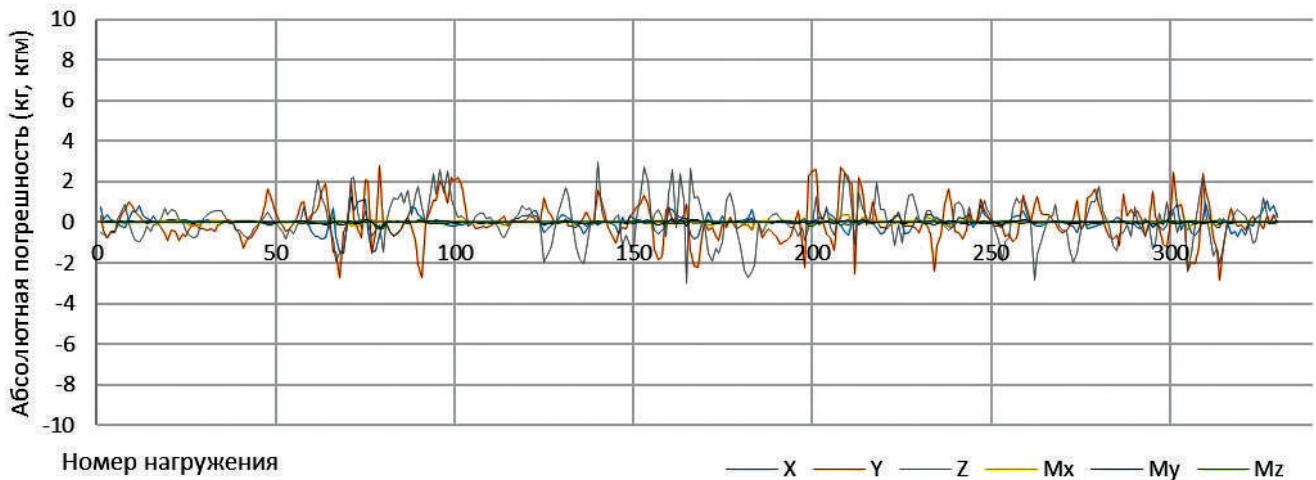


Рис. 7. Распределение ошибки математической модели 6×96

Таблица 5

Статистика калибровки весов по модели 6×96

	X	Y	Z	Mx	My	Mz
СКО, кг, кгм	0,368	0,950	0,997	0,072	0,054	0,056
СКО, %	0,020	0,175	0,186	0,025	0,052	0,043
R^2	0,998	0,991	0,989	0,999	0,999	0,999
Макс Δ	1,296	2,794	2,989	0,411	0,182	0,230
Мин Δ	-1,498	-2,858	-2,971	-0,379	-0,265	-0,304

звесов на калибровочные нагрузки. СКО не превышает 0,2%, что является приемлемым для данного типа тензосесов и находится на уровне зарубежных аналогов [12–14]. Асимметрия и характер распределения абсолютных значений ошибок указывает на наличие несистематических ошибок в работе макета калибровочного стенда и, возможно, на избыточность математической модели тензосесов.

Дальнейшее развитие методов и средств калибровки вращающихся тензосесов

Следующим необходимым этапом развития тематики вращающихся тензосесов является создание автоматизированного калибровочного стенда с учетом полученных наработок на представленном макете. Автоматизированный калибровочный стенд для вращающихся тензосесов должен будет обеспечить проведение динамической и статодинамической калибровки ВВ и более детально исследовать зависимости между компонентами. Кроме того, он позволит скорректировать явление квазиупругости (гистерезиса) [15], из-за которого сигнал измерительных тензосесов в определенной степени зависит от темпа воспроизведения калибровочных нагрузок. Любой эффект темпа нагружения, который будет, очевидно, разным при калибровке на ручном стенде и эксперименте в аэродинамической трубе, может привести к существенному росту погрешности измерений вектора аэродинамических нагрузок [16].

Применение искусственных нейронных сетей

Альтернативой расширения математической модели тензосесов и как следствие повышения трудозатрат на их калибровку является применение искусственной нейронной сети в качестве модели тензосесов. Входными данными сети являются сигналы измерительных тензосесов, а выходными — значения сил и момента сил измеряемых компонент. Подобные модели находятся в стадии разработки, и первые результаты представлены в [17, 18]. В этих работах исследуется применение к классическим тензосесам нескольких типов нейронных сетей с разным количеством скрытых слоев и с различными (линейными и тангенциально-гиперболическими) функциями активации. Погрешность оценки нагрузок весов, полученная с помощью модели нейронной сети, сравнима с точностью оценок, сделанных на основе модели регрессионного анализа в виде уравнения (12). При схожей оцен-

ке приведенной погрешности нейросетевой подход демонстрирует значительное сокращение калибровочного плана с 950 точек до 136.

Применение теории оптимального планирования эксперимента

Исследования, касающиеся применения теории оптимального планирования эксперимента, также могут быть применены и оптимизированы для калибровки вращающихся тензосесов. Калибровка тензосесов может рассматриваться как эксперимент, в котором независимые переменные (прилагаемые калибровочные нагрузки) задаются, а зависимые (сигналы тензосесов) — измеряются. Для шестикомпонентных тензосесов необходимо получить шестимерную поверхность реакции, представляющей выходные сигналы измерительных мостов, в функции приложенной нагрузки. Теоретические методы планирования и организации эксперимента позволяют охватить весь процесс калибровки весов — его организацию, проведение и статистический анализ результатов [19].

Классический план калибровки тензосесов, применяемый для получения квадратичной математической модели, может содержать свыше 1000 точек с набором данных.

Подход к калибровке на основе теории оптимального планирования отходит от задачи сбора большого массива данных. Принцип заключается в эффективном достижении основной цели калибровочного эксперимента, а именно определении точной математической модели для расчета неизвестных нагрузок по измеренному отклику тензосесов.

Тремя фундаментальными принципами обеспечения качества моделирования на основе планирования эксперимента являются: рандомизация, группирование и повторение. Рандомизация упорядоченных наборов точек превращает скрытые систематические ошибки в дополнительный источник простых случайных ошибок. Случайную ошибку легко обнаружить и исправить путем повторения измерений и другими средствами. Рандомизация упорядоченных наборов точек также увеличивает статистическую независимость каждой точки данных в схеме. Статистическая независимость часто предполагается в современных методах калибровки весов, но систематический разброс может сделать ошибки измерений коррелированными и поэтому не независимыми друг от друга, как это требуется для корректности вычислений доверительных интер-

валов точности и других общих оценок дисперсии [20].

Применение и адаптация теории планирования эксперимента может значительно повлиять на процесс калибровки вращающихся тензосенсоров, уменьшить трудоемкость и погрешность измерения нагрузок в аэродинамических трубах.

Выводы

В результате проведенных исследований по калибровке вращающихся тензосенсоров были рассмотрены три математические модели с размерностью 6×27 , 6×33 и 6×96 . Общее распределение приведенной погрешности по компонентам показано на рис. 8.

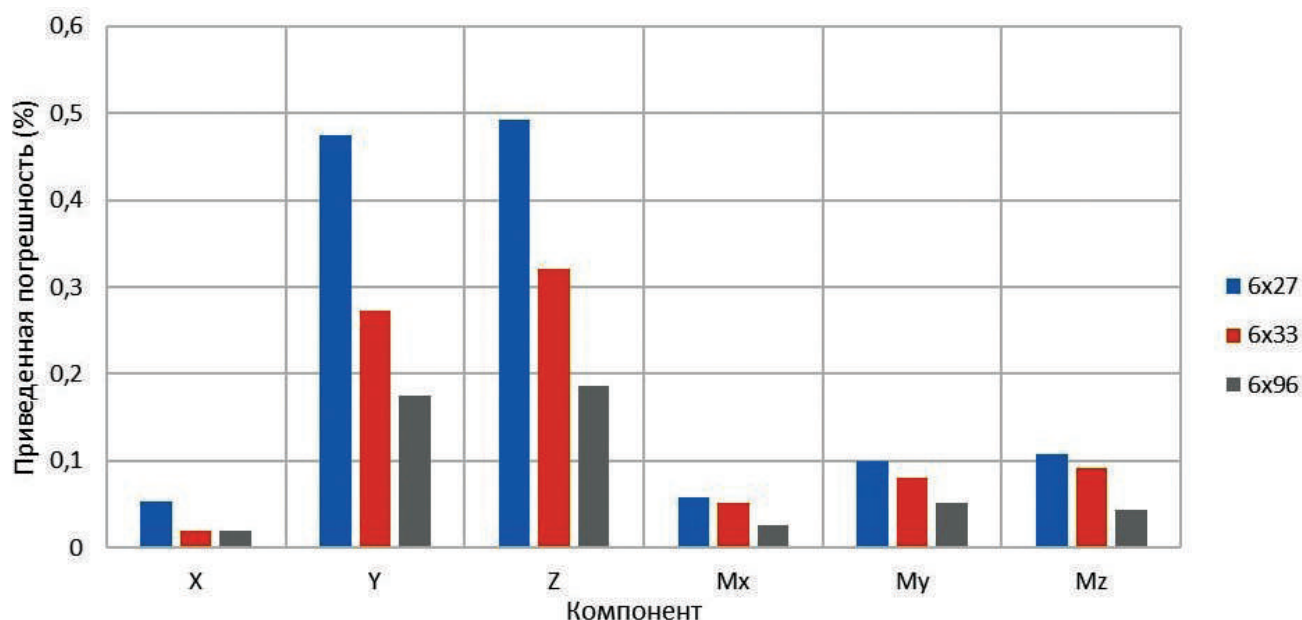


Рис. 8. Распределение приведенной погрешности по компонентам

По результатам исследований на макете калибровочного стенда для статической калибровки ВВ, наилучший результат погрешности (модель 6×96) составил 0,2%, что соответствует уровню мировых аналогов [12, 13, 14]. Однако с ростом сложности математической модели трудоемкость процесса калибровки также существенно возрастает. Для достижения погрешности в 0,1% (принятой для классических тензосенсоров) необходимо создать автоматизированный калибровочный стенд и провести ряд исследований по применению нейронных сетей и оптимальному планированию эксперимента, так как классический подход к калибровке по заранее составленным ма-

тематическим моделям близок к технологическому пределу для данного типа тензосенсоров.

В рамках данной работы также создан и апробирован макет калибровочного стенда с ручным способом нагружения, на котором были отработаны основные подходы к статической калибровке вращающихся тензосенсоров, выработаны рекомендации для создания автоматизированного стенда и методические указания.

Список источников

1. Богданов В.В., Волобуев В.С. Многокомпонентные тензометрические весы // Датчики и системы. 2004. № 3. С. 3-8.
2. Никитин С.О., Макеев П.В. Проект скоростного вертолета схемы «Синхроптер» с толкающим воз-

душным винтом // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 82-95.

3. Манвелян В.С. Шестикомпонентные вращающиеся тензометрические весы для испытания соосных винтов // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 1. С. 53-64. DOI: 10.34759/vst-2020-1-53-64
4. Bogdanov V.V., Lyutov V.V., Manvelyan V.S. Development of the six-component rotating shaft balances for counter rotating open rotor testing // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1770. Issue 1. DOI: 10.1063/1.4963944
5. Богданов В.В., Лютов В.В., Манвелян В.С. Устройство для измерения составляющих векторов аэродинамической силы и момента. Патент RU 2657340 С1. Бюл. № 17, 13.06.2018.

6. Potthoff J.R. Development of Wind Tunnel Internal Strain-Gage Balance Calibration Software with Self-Assembling Gaussian Radial Basis Function Algorithm. — Houston, Texas, 2020. — 189 p.
7. Yanamashetti G., Murthy H.S. Application of global regression method for calibration of wind tunnel balances // Symposium on Applied Aerodynamics and Design of Aerospace Vehicles (16-18 November 2011; Bangalore, India).
8. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Физматгиз, 1962. — 349 с.
9. Митин И.В., Русаков В.С. Анализ и обработка экспериментальных данных. — Изд. 3-е, испр. — М.: Физ. фак. МГУ, 2006. — 43 с.
10. Миодушевский П.В., Легович Ю.С. Разработка перспективного многоцелевого самолёта-конвертоплана // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 3. С. 55-63.
11. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: Учебное пособие. — М.: Академия, 2006. — 54 с.
12. Zimmermann C., Haberli W., Monkewitz M. Precise Measurement Technology Based on New Block-Type and Rotating Shaft Balances // 27th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference (28 June — 01 July 2010; Chicago, Illinois, USA). DOI: 10.2514/6.2010-4541
13. Bardet S.M., Zwemmer R., Faasse P.R., de Goede J.I. A Contactless Telemetry System for a Contra-Rotating Open Rotor Test Campaign // EVI-GTI and PIWG Joint Conference on Gas Turbine Instrumentation (27—29 September 2016; Berlin). DOI: 10.1049/cp.2016.0827
14. Goldhahn E., Zwemmer R., Nahuis B.R., Negulescu C. Advanced wind tunnel testing of Counter-Rotating Open Rotors at low-speed conditions // Conference paper at “Greener Aviation 2014: CleanSky Breakthroughs and worldwide status” (12—14 March 2014; Brussels, Belgium).
15. Steinle F. Modeling of Anelastic Effects in Calibration of a Six-Component Wind Tunnel Balance // 38th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit (10—13 January 2000; Reno, NV, USA). DOI: 10.2514/6.2000-150
16. Schenck H., Hawks R. Theories of Engineering Experimentation. — Third edition. — Hemisphere Publishing Corporation and McGraw-Hill Education, 1979. — 302 p.
17. Van Aken J.M. Multi-component balance load estimation using neural networks // 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (11—14 January 1999; Reno, NV, USA). DOI: 10.2514/6.1999-940
18. Van Aken J.M. Evaluation of Neural Networks in Estimating the Loading on a Multi-Component, Multi-Piece Balance // 44th International Instrumentation Symposium (03—07 May 1998; Reno, NV, USA).
19. DeLoach R. Applications of Modern Experiment Design to Wind Tunnel Testing at NASA Langley Research Center // 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (12—15 January 1998; Reno, NV, USA). DOI: 10.2514/6.1998-713
20. Parker P.A., Morton M., Draper N., Line W. A single-vector force calibration method featuring the modern design of experiments // 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (08—11 January 2001; Reno, NV, USA). DOI: 10.2514/6.2001-170

References

1. Bogdanov V.V., Volobuev V.S. *Datchiki i sistemy*, 2004, no. 3, pp. 3-8.
2. Nikitin S.O., Makeev P.V. A project of the “Synchropter” type high-speed helicopter with pushing air propeller. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 82-95.
3. Manvelyan V.S. Six-component rotating strain-gauge balance for coaxial rotors testing. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 1, pp. 53-64. DOI: 10.34759/vst-2020-1-53-64
4. Bogdanov V.V., Lyutov V.V., Manvelyan V.S. Development of the six-component rotating shaft balances for counter rotating open rotor testing. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1770, no. 1. DOI: 10.1063/1.4963944
5. Bogdanov V.V., Lyutov V.V., Manvelyan V.S. *Patent RU 2657340 C1*, 13.06.2018.
6. Potthoff J.R. *Development of Wind Tunnel Internal Strain-Gage Balance Calibration Software with Self-Assembling Gaussian Radial Basis Function Algorithm*. Houston, Texas, 2020, 189 p.
7. Yanamashetti G., Murthy H.S. Application of global regression method for calibration of wind tunnel balances. *Symposium on Applied Aerodynamics and Design of Aerospace Vehicles (16-18 November 2011; Bangalore, India)*.
8. Linnik Yu.V. *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoi teorii obrabotki nablyudenii* (Least squares method and basics of mathematical and statistical theory of observations processing), Moscow, Fizmatgiz, 1962, 349 p.
9. Mitin I.V., Rusakov V.S. *Analiz i obrabotka eksperimental'nykh dannykh* (Analysis and processing of experimental data), Moscow, Fiz. fak. MGU, 2006, 43 p.
10. Miodushevskii P.V., Legovich Y.S. Development of prospective multipurpose convertiplane. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 55-63.
11. Mekheda V.A. *Tenzometricheskii metod izmereniya deformatsii* (Strain gauge method for deformation measuring), Moscow, Akademiya, 2006, 54 p.

12. Zimmermann C., Haberli W., Monkewitz M. Precise Measurement Technology Based on New Block-Type and Rotating Shaft Balances. *27th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference (28 June — 01 July 2010; Chicago, Illinois, USA)*. DOI: 10.2514/6.2010-4541
13. Bardet S.M., Zwemmer R., Faasse P.R., de Goede J.I. A Contactless Telemetry System for a Contra-Rotating Open Rotor Test Campaign. *EVI-GTI and PIWG Joint Conference on Gas Turbine Instrumentation (27—29 September 2016; Berlin)*. DOI: 10.1049/cp.2016.0827
14. Goldhahn E., Zwemmer R., Nahuis B.R., Negulescu C. Advanced wind tunnel testing of Counter-Rotating Open Rotors at low-speed conditions. *Conference paper at “Greener Aviation 2014: CleanSky Breakthroughs and worldwide status” (12—14 March 2014; Brussels, Belgium)*.
15. Steinle F. Modeling of Anelastic Effects in Calibration of a Six-Component Wind Tunnel Balance. *38th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit (10—13 January 2000; Reno, NV, USA)*. DOI: 10.2514/6.2000-150
16. Schenck H., Hawks R. *Theories of Engineering Experimentation*. Third edition. Hemisphere Publishing Corporation and McGraw-Hill Education, 1979, 302 p.
17. Van Aken J.M. Multi-component balance load estimation using neural networks. *37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (11—14 January 1999; Reno, NV, USA)*. DOI: 10.2514/6.1999-940
18. Van Aken J.M. Evaluation of Neural Networks in Estimating the Loading on a Multi-Component, Multi-Piece Balance. *44th International Instrumentation Symposium (03—07 May 1998; Reno, NV, USA)*.
19. DeLoach R. Applications of Modern Experiment Design to Wind Tunnel Testing at NASA Langley Research Center. *36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (12—15 January 1998; Reno, NV, USA)*. DOI: 10.2514/6.1998-713
20. Parker P.A., Morton M., Draper N., Line W. A single-vector force calibration method featuring the modern design of experiments. *38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (08—11 January 2001; Reno, NV, USA)*. DOI: 10.2514/6.2001-170

Статья поступила в редакцию 12.08.2021; одобрена после рецензирования 19.08.2021; принята к публикации 19.08.2021.

The article was submitted on 12.08.2021; approved after reviewing on 19.08.2021; accepted for publication on 19.08.2021.