

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 53.082.17

DOI:10.34759/vst-2020-1-53-64

ШЕСТИКОМПОНЕНТНЫЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕСЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ СООСНЫХ ВИНТОВ

Манвелян В.С.

*Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского,
ЦАГИ, ул. Жуковского, 1, Жуковский, Московская область, 140180, Россия
e-mail: vagan.manvelyan@tsagi.ru*

Статья поступила в редакцию 21.11.2019

При исследовании влияния на технические характеристики систем и конструктивное выполнение корпуса летательного аппарата (ЛА) газо- и гидродинамических процессов в проектируемой конструкции одной из задач является измерение суммарных нагрузок, действующих на высокооборотистые воздушные винты, в том числе и соосной схемы. В статье представлена конструкция и основные принципы работы устройства для измерения шести компонентов суммарных нагрузок, воздействующих на модель соосного винта в аэродинамическом эксперименте. Устройство состоит из двух отдельных вращающихся шестикомпонентных тензометрических весов (ВВ). Для расчета измерительной схемы использовались метод конечных элементов (МКЭ) и аналитические методы сопротивления материалов. Разработанная схема показала свою универсальность и масштабируемость, что позволяет говорить о возможности ее применения при измерении шести компонентов полной аэродинамической силы и момента, действующих на модели винтов различных летательных аппаратов. По результатам проведенной работы получен патент на изобретение.

Ключевые слова: вращающиеся тензометрические весы, испытания винтов, соосные винты, экспериментальные основы создания ЛА.

Измерение суммарных аэродинамических нагрузок, действующих на высокооборотистые соосные воздушные винты самолетов, является одной из проблемных задач при исследовании газодинамических процессов обтекания корпуса ЛА. При разработке перспективных летательных аппаратов вопрос комплексного изучения характеристик винта имеет особое значение [1, 2]. Поскольку расчетные методы, описанные, например, в [3–

5], опираются на ряд допущений, эксперимент призван в связке с расчетными методами обеспечить максимально полное исследование протекающих физических процессов [6]. Созданный в конце 80-х годов прошлого века винтовентиляторный прибор (ВВП) предназначен для отдельного исследования соосных винтов [7]. К числу основных проблем, стоящих на пути решения указанной задачи, относится создание вращающихся

шестикомпонентных тензометрических весов для переднего и заднего винтов.

Одним из основных этапов создания тензометрических весов является определение конструкции, которая позволит наиболее точно измерить требуемые компоненты полной аэродинамической силы и момента с коэффициентом запаса прочности не ниже 4 [8]. Такое значение коэффициента запаса прочности определено для тензометрических весов с целью нивелирования динамических воздействий на конструкцию, которые, ввиду высокой неопределенности, сложно поддаются расчетным методам. На рис. 1 представлены векторы полной аэродинамической силы \vec{R} и момента \vec{M} и их проекции на оси координат. Шестикомпонентные тензометрические весы обеспечивают измерение трех проекций вектора $\vec{R}(\vec{F}_x; \vec{F}_y; \vec{F}_z)$ и трех проекций вектора $\vec{M}(\vec{M}_x; \vec{M}_y; \vec{M}_z)$ [9].

Данной проблемной областью активно занимаются такие компании, как RUAG (Швейцария), ONERA (Франция), NLR (Нидерланды) [10] и др. Основное конструктивное решение, широко используемое в мире при разработке ВВ, представляет собой систему из восьми непризматических

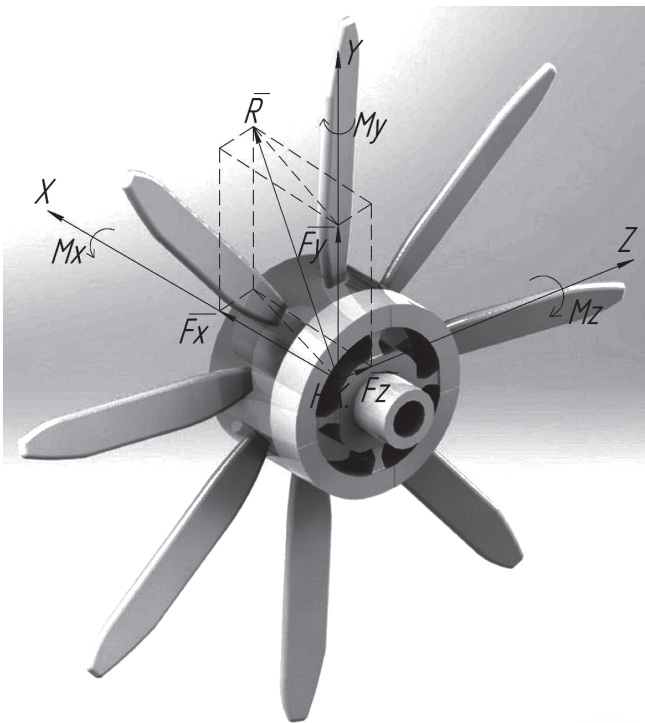
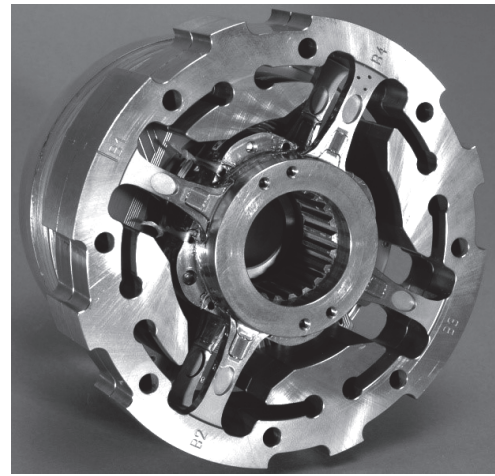


Рис. 1. Шесть компонентов полной аэродинамической силы и момента



а)



б)

Рис. 2. Шестикомпонентные ВВ компаний NLR (а) и RUAG (б)

балок, по две балки в четырех пакетах, соединяющих между собой два кольца (рис. 2) [11].

Внешнее кольцо жестко соединяется с втулкой испытуемых винтов, а внутреннее кольцо закрепляется на валу привода и служит «землей» для измерения. Данная конструкция обладает существенным преимуществом по сравнению с конструкцией, используемой, например, в некоторых вращающихся тензометрических весах фирмы ONERA (Франция), представленных на рис. 3 [12].

При спицеподобном расположении чувствительных балок RUAG и NLR влияние центробежной силы пренебрежимо мало, поскольку она действует в направлении растяжения-сжатия чувствительной балки, а жесткость балки на растяжение-сжатие много больше, чем, например, на изгиб, как в случае с конструкцией фирмы ONERA.

В 80-е годы прошлого века конструкция, близкая к конструкции ВВ ONERA, была реализова-



Рис. 3. Шестикомпонентные ВВ компании ONERA (Франция)

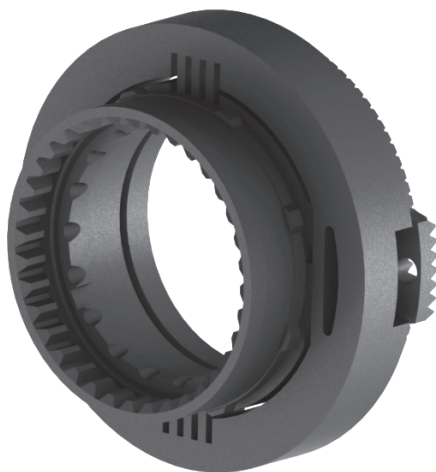


Рис. 4. Шестикомпонентные ВВ ЦАГИ с неспицеподобным расположением чувствительных балок

на в шестикомпонентном исполнении (рис. 4) и испытана на ВВП в аэродинамической трубе Т-104. Результаты испытаний подтвердили существенное влияние центробежной силы на погрешность измерения.

В связи с этим уже в начале 2010-х годов было принято решение о разработке принципиально новой конструкции шестикомпонентных ВВ для испытания винтов биротативной схемы.

Вращающиеся тензометрические весы

При разработке новой конструкции за основу было взято решение, широко распространен-

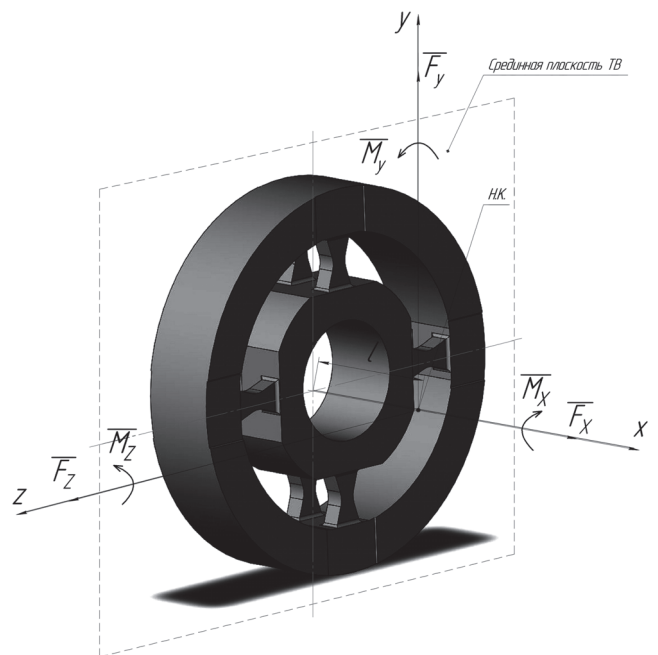


Рис. 5. 3D-модель ВВ с восьмью непризматическими чувствительными балками

ное в области разработки ВВ, – схема из восьми непризматических балок, соединяющих внешнее кольцо, связанное со втулкой испытуемых винтов, и внутреннее кольцо, соединенное с валом привода (рис. 5).

Расчеты МКЭ выявили ряд особенностей подобной восьмибалочной конструкции: ввиду того, что начало координат модели винта на втулке на-

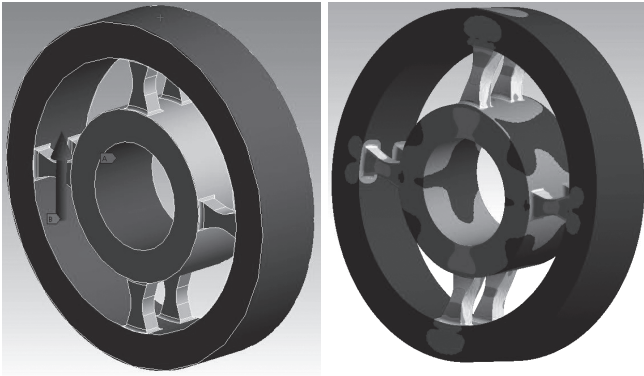


Рис. 6. Форма деформации от воздействия боковых сил и моментов

ходится на некотором расстоянии l от срединной плоскости ТВ, от воздействия боковых сил \vec{F}_y и \vec{F}_z , измерительные балки испытывают одновременно деформацию растяжения-сжатия и S-образного изгиба, как показано на рис. 6. Те же виды деформации наблюдаются и при воздействии моментов \vec{M}_y, \vec{M}_z .

Для измерения данных компонентов необходимо наклеивать тензорезисторы на боковые грани измерительных балок в местах скругления по середине, где наблюдается максимум сигнального напряжения, что обеспечивает высокое значение выходного сигнала. Однако на эти же балки оказывают сильное влияние крутящий момент \vec{M}_x и сила тяги \vec{F}_x .

Кроме того, в связи с тем, что измерительные балки находятся на определённом расстоянии от срединной плоскости тензометрических весов (см. рис. 5), возникает разный паразитный момент на передней балке и на задней, поскольку между

ними есть определенное расстояние. В связи с этим встает вопрос о выборе балок для наклейки измерительного моста, например, балок, лежащих в одной плоскости, или балок из разных плоскостей. Любой из вариантов приводит нас к выводу, что для измерения сил \vec{F}_y и \vec{F}_z и моментов \vec{M}_y, \vec{M}_z полезной с точки зрения измерения является деформация растяжения-сжатия из составной деформации растяжения-сжатия и изгиба (рис. 6). В свою очередь, деформация растяжения-сжатия много меньше деформации изгиба, поскольку стержень гораздо более восприимчив к изгибу. Поэтому сигнальные напряжения под тензорезистором от воздействия боковых сил и моментов крайне невысоки, по расчетам — меньше $0,8 \text{ кгс/мм}^2$, если в качестве диапазонов нагрузок по компонентам брать значения из табл. 1, которые охватывают всю область интересов аэродинамического эксперимента по измерению нагрузок на винты и модели винтов.

При таком сигнальном напряжении под тензорезистором коэффициент отношения выходного электрического напряжения ΔU к питанию тензомоста $U_{\text{п}}$, находим по формуле

$$K_e^i = \frac{\Delta U}{U_{\text{п}}} = S \frac{\sigma_c^i}{E} \cdot 10^3, \quad 0,1 \leq K_e^i \leq 2, \quad (1)$$

где S — коэффициент тензочувствительности тензорезистора, $S = 2$; σ_c^i — сигнальное напряжение под тензорезистором; E — модуль Юнга, приблизительно равный $2 \cdot 10^4 \text{ кгс/мм}^2$; i — компонент нагрузки.

Отсюда $K_e^i = 0,08 \text{ мВ/В}$.

Таблица 1

Нагрузки для вращающихся тензометрических весов

Измеряемый компонент		Диапазоны нагрузок
Наименование компонента	Обозначение	
Сила тяги, кгс	\vec{F}_x	от -1200 до 1200
Боковые силы, кгс	\vec{F}_y	от -300 до 300
	\vec{F}_z	
Крутящий момент, кгс·м	\vec{M}_x	от -160 до 160
Изгибающие моменты, кгс·м	\vec{M}_y	от -80 до 80
	\vec{M}_z	

Данное значение выходит за диапазон работы даже самой высокоточной аппаратуры ($0,1 \leq K_e^i \leq 2$) и находится на уровне «шума». Для повышения сигнала напряжения до приемлемого уровня в месте наклейки тензорезистора необходимо уменьшить геометрические размеры сечения измерительной балки, однако при этом снижается коэффициент запаса прочности конструкции, что может привести к снижению ресурса и разрушению конструкции.

Для решения поставленной задачи была разработана новая измерительная схема (рис. 7), которая, учитывая опыт предыдущих разработок, обеспечивает меньшее влияние силы тяги и крутящего момента на измерения боковых сил и моментов, обеспечивает максимально возможное

9 двенадцатью балками непризматической формы. Балки равномерно распределены по четырем пакетам и вытянуты вдоль ортогональных осей. Пакеты балок 10 воспринимают нагрузки от винтов во вращении через внешнее кольцо 7, которое соединено с втулкой винтов четырьмя болтами 8. Ступицы 9 соединены с вращающимися валами ВВП и представляют собой «землю», т.е. неподвижную часть вращающихся весов относительно кольца 7 и балок 10.

Одним из существенных источников погрешности для тензометрических весов является температурное влияние [13]. Градиент температуры по длине тензометрических весов от неравномерного нагрева конструкции приводит к короблению конструкции, что безусловно влияет на погрешность измерения [14]. В случае с ВВ основным

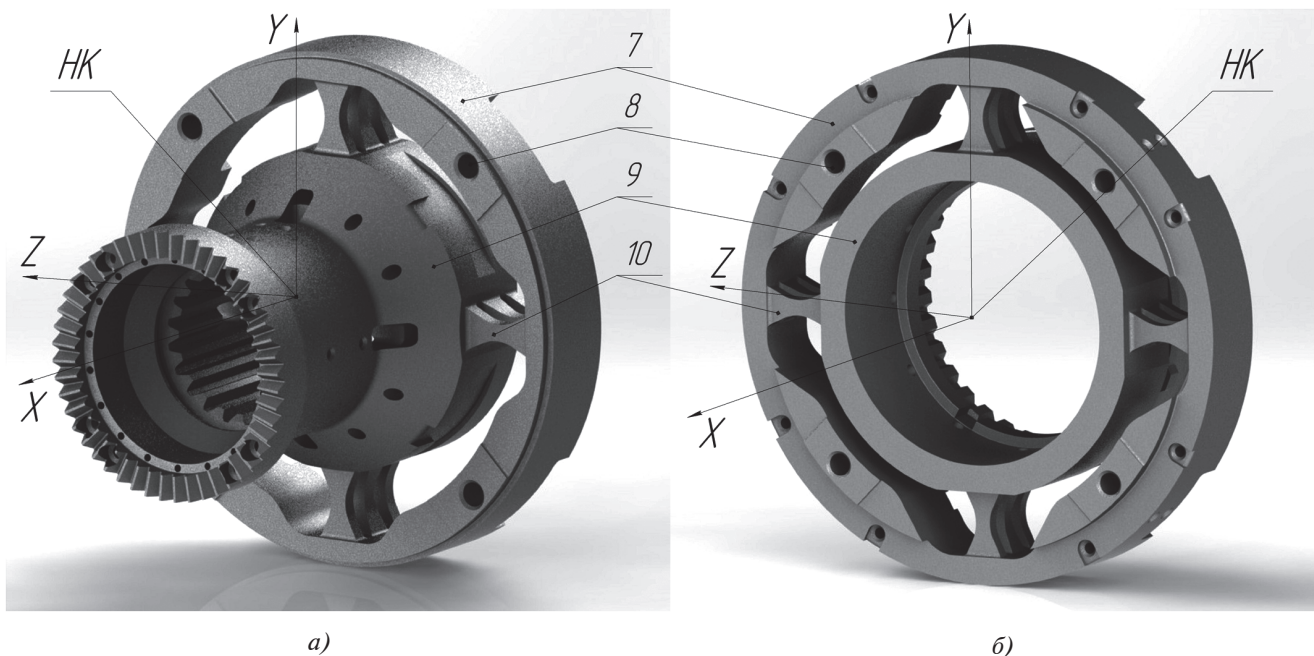


Рис. 7. Вращающиеся шестикомпонентные тензометрические весы новой схемы для исследования винтов биротативной схемы: а — для переднего винта; б — для заднего винта

значение сигнала напряжения, которое находится в диапазоне работы измерительной аппаратуры, при сохранении коэффициента запаса прочности $K_{зп} \geq 4$. Данная конструкция реализована в двух исполнениях — для переднего и заднего венца винтов биротативной схемы установки ВВП. Ввиду пространственных ограничений под кожухом обтекателя прибора диаметр внешнего кольца ВВ не превышает 190 мм.

Представленная конструкция ВВ имеет цилиндрическую моноблочную форму, которая состоит из внешнего кольца 7, связанного со ступицей

источником температурной погрешности служит нагрев вала привода установки. Далее от вала нагреваются ступицы 9, что приводит к короблению двенадцати измерительных упругих балок. Для того, чтобы свести влияние температуры к минимальным значениям, на ступицах предусмотрены вырезы, которые «делят» мощность температурного потока и отводят ее в сторону от измерительных балок.

Расчеты конструкции проводились как аналитическим методом, так и методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Вви-

Таблица 2

Нагрузки для вращающихся весов для испытания соосных винтов

Измеряемый компонент		Диапазоны нагрузок
Наименование компонента	Обозначение	
Сила тяги, кгс	\vec{F}_x	±800
Боковая сила, кгс	\vec{F}_y	±250
Крутящий момент, кгс·м	\vec{M}_x	±133
Изгибающий момент, кгс·м	\vec{M}_y	±60

ду симметричности конструкции проводился расчет только четырех компонентов из шести: \vec{F}_x , \vec{F}_y , \vec{M}_x и \vec{M}_y . В качестве нагрузок, действующих на ВВ, были взяты величины из технического задания на разработку ВВ для винтов биротативной схемы, которые приведены в табл. 2.

Аналитический расчет проводился традиционными методами сопротивления материалов, что позволило в первом приближении определить основные геометрические размеры конструкции и определить взаимовлияние компонентов [15]. Погрешность от взаимовлияния компонентов может быть вызвана двумя основными причинами: превышением максимально допустимого суммарного значения напряжения под тензорезистором измерительного тензомоста [16] для данного типа тензорезисторов и взаимовлиянием компонентов в условиях одного и того же вида деформации, вызываемого этими компонентами, который измеряется измерительным мостом из тензорезисторов (мостом Уитстона) [17]. В разработанной конструкции первая причина устранена полностью, а вторая сведена к минимуму за счет оптимизации формы и расположения двенадцати измерительных балок расчетными методами.

Для верификации аналитического расчета был проведен расчет МКЭ в программном комплексе ANSYS, для которого была построена упрощенная геометрическая модель. Основные параметры сетки даны в табл. 3. В области пакетов балок 10 (рис. 7) плотность сетки была выше, поскольку необходимо было детальное изучение распределения напряжений на измерительных балках для уменьшения взаимовлияния компонентов и для повышения сигнального напряжения с тензомостов. На рис. 8 представлена упрощенная модель с сеткой.



Рис. 8. Упрощенная модель с сеткой

Таблица 3

Основные параметры КЭ сетки

Тип элемента	Tet10
Максимальный размер элемента	1,5 мм
Размер элемента в области чувствительных балок	0,25 мм
Количество узлов	~ 1,4 млн
Количество элементов	~ 900 тысяч

Полученные результаты расчетов напряжений, представленные ниже, выражены в виде эквивалентных напряжений по Мизесу [18]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (2)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — нормальные напряжения.

В отличие от расчетов, представленных ранее [19], здесь в основу расчета положена улучшенная КЭ-сетка, которая позволила повысить точность

расчета и определить оптимальные места наклейки тензорезисторов.

Одна из основных задач при расчете конструкции — уменьшение взаимовлияния компонентов \vec{F}_x и \vec{M}_y , поскольку от их воздействия балки испытывают одинаковую S-образную деформацию и, если не учитывать особенности их взаимовлияния, это отразится на погрешности измерения каждого из компонентов в результате калибровки.

Расчеты показали, что при нулевом воздействии \vec{M}_y сигнальное напряжение от компонента \vec{F}_x : $\sigma_{F_x}^c = 3,4$ кгс/мм²; в обратном случае значение сигнального напряжения \vec{M}_y : $\sigma_{M_y}^c = 9,3$ кгс/мм².

Это случай, когда взаимное влияние компонентов \vec{F}_x и \vec{M}_y практически отсутствует, однако, если допустить небольшое взаимовлияние, но повысить сигнальное напряжение по компонентам, то можно достичь значений относительной погрешности около 0,3%—0,5% от диапазона измерения. Поэтому имеет смысл сдвинуть места наклейки тензомостов для достижения большего выходного напряжения при не критичном взаимовлиянии. Сигнальное напряжение от компонен-

та \vec{F}_x : $\sigma_{F_x}^c = 8$ кгс/мм², от компонента \vec{M}_y : $\sigma_{M_y}^c = 16$ кгс/мм². На рис. 9 представлена диаграмма распределения сигнального напряжения по длине балки от воздействия компонентов \vec{F}_x и \vec{M}_y . Для измерения тяги и изгибающего момента используются грани балок пакета 10 на рис. 7, параллельные плоскости YZ. Выходные напряжения с тензометрических мостов по компонентам \vec{F}_x и \vec{M}_y соответственно равны $K_e^{F_x} = 0,8$ мВ/В и $K_e^{M_y} = 1,6$ мВ/В, что находится в пределах допуска современной аппаратуры типа НВМ MGCplus.

Крутящий момент \vec{M}_x и сила тяги \vec{F}_x относятся к ключевым параметрам, поскольку представляют наибольший интерес при сертификации новых винтов. Диаграмма распределения напряжения по длине балки приведена на рис. 10. Максимальное напряжение от воздействия компонента $\sigma_{M_x}^M = 25$ кгс/мм², а сигнальное — $\sigma_{M_x}^c = 18$ кгс/мм² на расстоянии $l/4$ от длины балки. Для измерения крутящего момента используются боковые грани средних балок пакета 10 на рис. 7. При таком значении сигнального напряжения выходное электрическое напряжение под тензомостом, наклеенным в данной области, $K_e^{M_x} = 1,8$ мВ/В, что допустимо, поскольку мень-

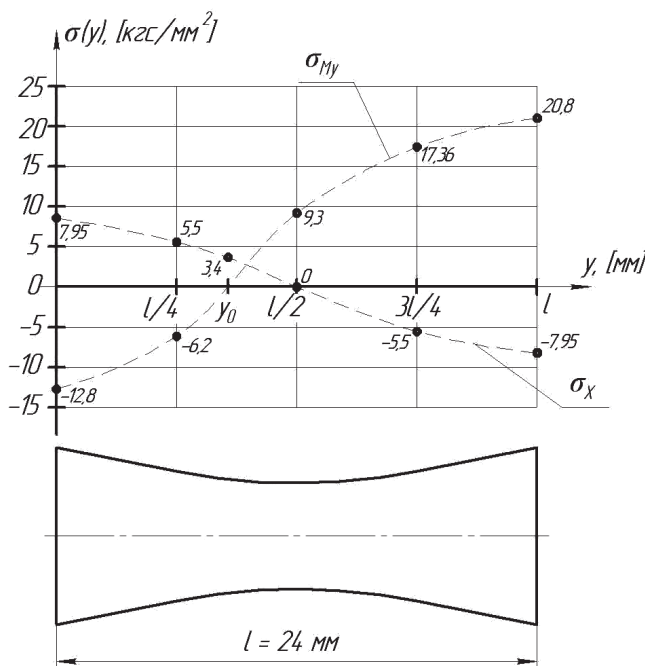


Рис. 9. Диаграмма распределения напряжений по длине балки от воздействия компонентов \vec{F}_x и \vec{M}_y

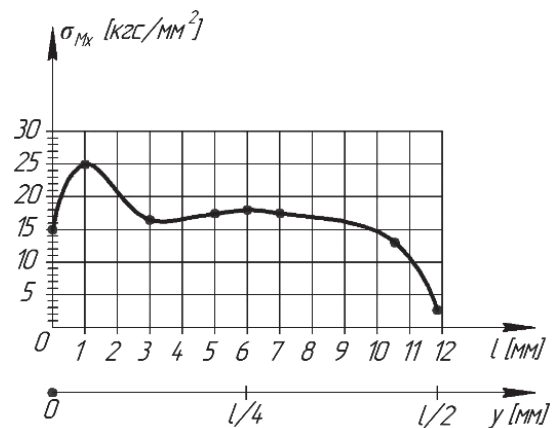


Рис. 10. Диаграмма распределения напряжений по длине балки от воздействия компонента \vec{M}_x

ше предельного значения в 2 мВ/В, приведенного в формуле (1).

Для измерения боковой силы \vec{F}_y используется галтель в середине средней балки пакета балок 10 на рис. 7, которая спроектирована таким образом, чтобы концентрировать напряжение в заданной области. Сделано это, поскольку напряжения от данного компонента существенно ниже, чем от остальных, что обусловлено конструктивной особенностью данной измерительной схемы — балки в середине пакета работают преимущественно на растяжение—сжатие, соответственно, напряжения, в них возникающие, ниже, чем при изгибе.

Концентратор позволяет фокусировать напряжение в заданной области, а две балки по бокам из пакета с тремя балками позволяют максимально изолировать измеряемый компонент от паразитного влияния остальных компонентов. Такие меры призваны повысить точность измерения по данному компоненту по сравнению с мировыми аналогами, у которых относительная погрешность варьируется от 1,5 до 2% от диапазона измерения.

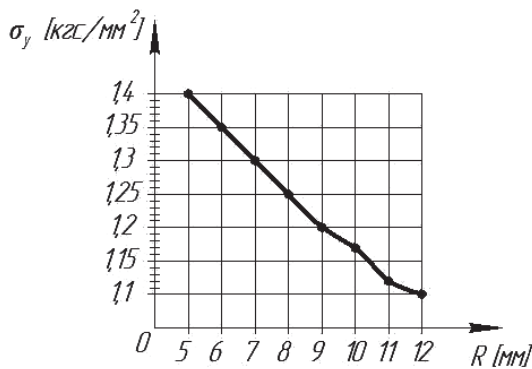


Рис. 11. Диаграмма распределения напряжений от воздействия компонента \vec{F}_y в зависимости от радиуса скругления галтели в центре боковой грани средней балки



Рис. 12. Попытки повысить сигнальное напряжение от воздействия компонента \vec{F}_y

По расчетам, значение относительной погрешности по данному компоненту для представленной измерительной схемы должно быть до 1% от диапазона измерения.

График распределения напряжения от воздействия компонента \vec{F}_y в зависимости от радиуса скругления представлен на рис. 11. Оптимальный радиус скругления с учетом влияния остальных компонентов и достижения максимальной величины сигнального напряжения равен 7 мм. При данном радиусе сигнальное напряжение составит $\sigma_{F_y}^c = 1,3$ кгс/мм². При таком значении сигнального напряжения выходное электрическое напряжения под тензомостом, наклеенным в данной области, $K_e \vec{F}_y = 0,13$ мВ/В, что допустимо, так как больше предельного значения 0,1 мВ/В, приведенного в формуле (1). Кроме, того данное выходное напряжение на 63% выше, чем в схеме с восьмью балками, как у вращающихся тензометрических весов компаний RUAG и NLR.

Были предприняты попытки в рамках данной схемы с 12 балками повышать значение сигнального напряжения, однако это неизбежно приводило к недостаточному запасу прочности или потере устойчивости конструкции от воздействия остальных компонентов при представленном в табл. 2 сочетании нагрузок. Конструктивные решения, предпринятые в рамках данных попыток, представлены на рис. 12.

Разработанная конструкция защищена патентом на изобретение [20].

По результатам расчетов была разработана конструкторская документация, по которой были созданы шестикомпонентные ВВ для исследования соосных винтов. Готовые ВВ с наклеенными тензорезисторами, собранными в измерительные мосты, представлены на рис. 13.

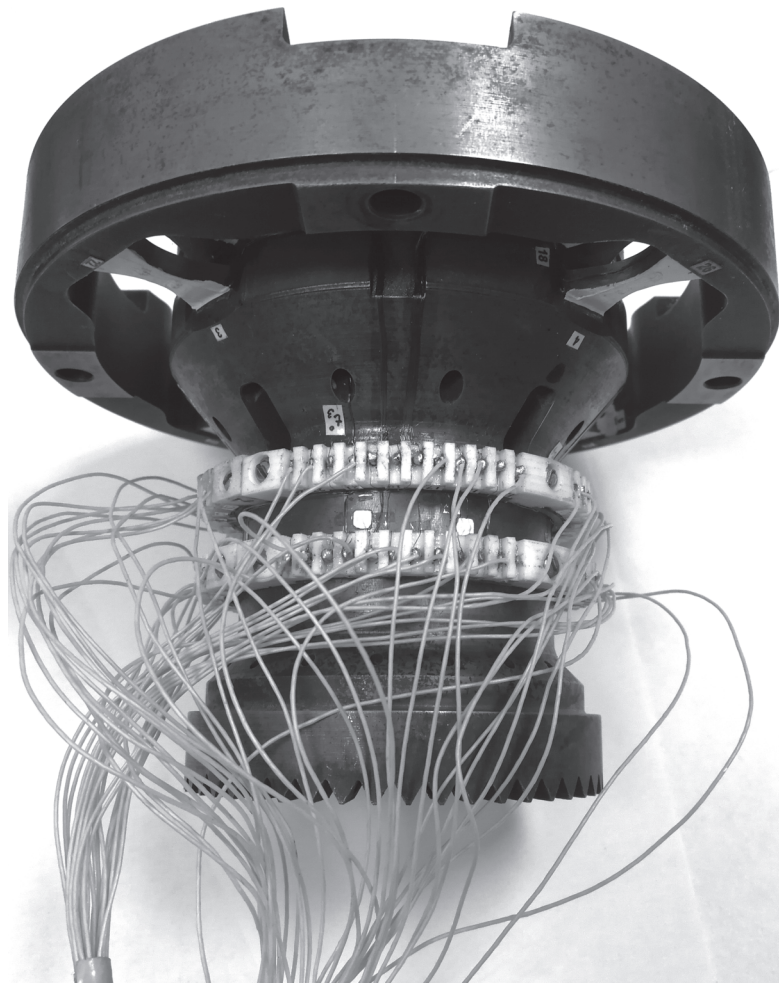


Рис. 13. Фотография вращающихся тензоскопов

Будущие исследования

Для завершения работы по созданию вращающихся тензометрических весов новой схемы с 12 измерительными балками необходимо провести: монтаж тензорезисторов, их коммутацию в измерительные тензометрические мосты и калибровку с выведением рабочих формул тензометрических вращающихся шестикомпонентных весов.

Калибровка тензоскопов — один из наиболее ответственных этапов при создании тензоскопов, от него зависит погрешность тензометрических весов. Для проведения корректной калибровки тензоскопов необходимо разработать стенд для их динамической и статической калибровки, чтобы учесть в процессе калибровки все источники погрешности (как динамические, так и статические) и внести соответствующие поправки в формулы весов. Логичным развитием данной работы является создание методики калибровки и исследование ее результатов. Кроме, того необходимо провести верификацию на испытательном оборудовании ВВ после калибровки, чтобы выявить все возможные особенности их работы на этапе от-

ладки. Для этого необходимо испытать винты с известными характеристиками, полученными на других тензометрических весах, с целью сравнения и анализа полученных результатов.

Выводы

В статье представлены шестикомпонентные вращающиеся тензометрические весы с новой измерительной схемой из 12 чувствительных балок, вытянутых вдоль осей действия боковых сил, предназначенные для измерения суммарных нагрузок на винты при исследовании влияния газодинамических процессов на технические характеристики и конструкцию ЛА. Разработанная схема шестикомпонентных ВВ с 12 измерительными балками имеет ряд преимуществ по сравнению с аналогами:

- 1) минимальное взаимовлияние силы тяги \vec{F}_x и изгибающего момента \vec{M}_y ;
- 2) непрямоугольная форма балок обеспечивает максимальное значение сигнального напря-

жения от воздействия боковых сил \vec{F}_y , что обеспечивает высокую точность измерения по сравнению с известными аналогами;

3) система из трех балок в каждом из четырех пакетов обеспечивает надежное измерение боковой силы с минимально возможным паразитным влиянием от остальных компонентов;

4) вытянутые вдоль осей Y и Z измерительные балки обеспечивают минимальное влияние центробежной силы, поскольку вызывают преимущественно деформацию растяжения-сжатия;

5) расчетная погрешность весов по компонентам исходя их полученных значений сигнальных напряжений по компонентам ожидается не хуже 1% от диапазона измерения, а по силе тяги и крутящему моменту – 0,5% от диапазона измерения;

Дальнейшая работа по калибровке, исследованиям и испытаниям шестикомпонентных вращающихся тензометрических весов данной схемы позволит сравнить полученные в ходе испытаний результаты по погрешности измерения от диапазона по компонентам с известными аналогами.

Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам отдела «Методы и средства измерений аэродинамических нагрузок» ФГУП «ЦАГИ» отделения измерительной техники и метрологии и лично главному научному сотруднику, к.т.н. Василию Васильевичу Богданову за помощь и ценные рекомендации.

Библиографический список

1. Миодушевский П.В., Легович Ю.С. Разработка перспективного многоцелевого самолёта-конвертоплана // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 3. С. 55-63.
2. Никитин С.О., Макеев П.В. Проект скоростного вертолета схемы «Синхроптер» с толкающим воздушным винтом // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 82-95.
3. Панасюченко П.С., Артамонов Б.Л. Выбор параметров поворотного рулевого устройства и оценка эффективности его применения на винтокрыле одновинтовой схемы // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 2. С. 7-13.
4. Шайдаков В.И. Аэродинамика винта в кольце с коллектором и коротким диффузором в режиме работы на месте // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 4. С. 36-46.
5. Шайдаков В.И. Аэродинамические характеристики системы «винт в кольце» в условиях обтекания горизонтальным потоком под нулевым углом атаки // Научный вестник МГТУ ГА. 2016. № 226(4). С. 165-175.
6. Назаров Д.В., Кондрякова А.В. Исследование обтекания винта с применением численных и экспериментальных методов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 4. С. 70-75.
7. Остроухов С.П. Аэродинамика воздушных винтов и винтокольцевых движителей: Монография. — М.: Физматлит, 2014. С. 61-62.
8. Богданов В.В., Волобуев В.С. Многокомпонентные тензометрические весы // Датчики и системы. 2004. № 3. С. 3-8.
9. Горлин С.М., Слезингер И.И. Аэромеханические измерения. — М.: Наука, 1964. — 720 с.
10. Philipsen I., Hoesjmakers H. Dynamic check and temperature correction for six-component rotating shaft balances // 4th International Symposium on Strain-Gauge Balances (San Diego, California, USA, 10-13 May 2004).
11. 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 (Chicago, Illinois, USA, 28 June — 01 July 2010). DOI: 10.2514/6.2010-4541
12. Bret J.F., Leconte P., Vieira J.P. et. al. Rotating Shaft Balances for CRORs and Propellers // 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting (5-9 January 2015, Kissimmee, Florida). AIAA 2015-1790. DOI: 10.2514/6.2015-1790
13. Богданов В.В., Волобуев В.С., Горбушин А.Р. Исследование тепловой динамики тензометрических весов и разработка методов снижения их температурных погрешностей // Ученые записки ЦАГИ. 2009. Т. XL. № 5. С. 74-81.
14. Клеев И.В. Температурные динамические погрешности в тензометрических аэродинамических шестикомпонентных весах // Датчики и системы. 2007. №2. С. 6-10.
15. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. — 10-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. — 592 с.
16. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: Учебн. пособие. — Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. — 56 с.
17. Панфилов В.А. Электрические измерения: Учебник. — 3-е изд., испр. — М.: Издательский центр «Академия», 2006. — 228 с.
18. Бруяка В.А., Фокин В.Г. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учебн. пособие. — Самара: Самарский гос. технический ун-т, 2010. — 271 с.
19. Bogdanov V.V., Lytov V.V., Manvelyan V.S. Development of the six-component rotating shaft balances for counter rotating open rotor testing // 18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research, ICMAR (27 June—3 July 2016, Perm, Russia). 2016. Vol. 1770. No. 1. DOI: 10.1063/1.4963944
20. Богданов В.В., Лютов В.В., Манвелян В.С. Устройство для измерения составляющих векторов аэродинамической силы и момента. Патент RU 2657340 С1. Бюлл. №17, 13.06.2018.

SIX-COMPONENT ROTATING STRAIN-GAUGE BALANCE FOR COAXIAL ROTORS TESTING

Manvelyan V.S.

Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky,
TsAGI, 1, Zhukovsky str., Zhukovsky, Moscow Region, 140180, Russia
e-mail: vagan.manvelyan@tsagi.ru

Abstract

Aerodynamic strain-gauge balance is employed to study the total loads on an object streamlined by the airflow in aerodynamic experiment. As a rule, the total loads are being represented by six components, namely by three forces along the orthogonal axes and three moments around the vectors of these forces. The strain-gauge balance is a special measuring device, which operation principle is based on the strain-gauge effect. Rotating strain-gauge balance is employed to measure loads affecting rotating object.

Coaxial rotor is a system with two airscrews rotating in opposite directions. To analyze the processes while coaxial rotor operation and of airscrews interaction, it is necessary to measure loads on each airscrew, i.e. both on the one rotating clockwise and the other rotating counter-clockwise. To solve the set task two rotating strain-gauge balances were developed in Central Aero-hydrodynamic Institute named after professor Zhukovsky (TsAGI) – one for each airscrew.

All over the world, companies such as RUAG (Switzerland), NLR (Netherlands), ONERA (France), etc. are engaged in rotating strain-gauge balance development. The most common design of rotating strain-gauge balance is a monoblock of a cylindrical shape. The external rigid rim is fixed to the internal cylindrical support by the beams used to be measure the loads. The external rigid rim is coupled with the internal hub by the beams, serving to loads measuring. The external rim is coupled with the screws hub, and internal hub is coupled with the shaft of the installation, which rotates the screws. Thus, the beams, on which the strain-gauge resistors, forming the measuring bridge, are glued, are deformed, and measuring strain-gauge resistor bridges convert the beams deformation into electric signal.

One of the most significant aspects of the design is the number and shape of the beams and the scheme of strain gauge gluing. The most widespread structure includes trapezoidal shape beams at the front view, and eight beams, connecting the rim and the hub, namely, a two beams in each of four packs. The main

disadvantage of such structure is low value of the signaling stress under the strain-gauge resistor, pasted for lateral force measuring, and high mutual effect of the components, which leads inevitably to higher error value (more than 1,5% of measuring range).

To avoid the above-mentioned issues, the new structure of the strain-gauge balance was developed in TsAGI. The design is similar to the one described above, but it is based on the unique shape and increased number of beams from eight to twelve, i.e. three beams in each of four packs. Computations confirmed that the signaling stress under the strain-gauge resistors pasted for lateral force measuring increased, while mutual effect of the components decreased. Alongside with other solutions, increasing the number of beams and their unique shape ensures lower value of the expected error (less than 1% of measuring range). The expected error will be confirmed by future studies on the results of static and dynamic calibration.

Keywords: rotating strain-gauge balance, rotor testing, coaxial rotors, experimental basics of flying vehicle design.

References

1. Miodushevskii P.V., Legovich Yu.S. Development of prospective multipurpose convertiplane. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 55-63.
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. Panasyuchenko P.S., Artamonov B.L. Selection of tilting steering gear parameters and estimation of its implementation effectiveness for a single rotor rotary-wing structure. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 7-13.
4. Shaidakov V.I. Aerodynamic characteristics of the shrouded rotor with an inlet and a short diffuser at the stationary hover operation mode. *Aerospace MAI Journal*, 2013, vol. 20, no. 4, pp. 36-46.
5. Shaidakov V.I. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*, 2016, no. 226(4), pp. 165-175.

6. Nazarov D.V., Kondryakova A.V. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 70-75.
7. Ostroukhov S.P. *Aerodinamika vozdushnykh vintov i vintokol'tsevykh dvizhitelei* (Aerodynamics of propellers and screw-ring propellers), Moscow, Fizmatlit, 2014, pp. 61-62 (328 p.).
8. Bogdanov V.V., Volobuev V.S. *Datchiki i sistemy*, 2004, no. 3, pp. 3-8.
9. Gorlin S.M., Slezinger I.I. *Aeromekhanicheskie izmereniya* (Aeromechanical measurements), Moscow, Nauka, 1964, 720 p.
10. Philipsen I., Hoeijmakers H. Dynamic check and temperature correction for six-component rotating shaft balances. *4th International Symposium on Strain-Gauge Balances (San Diego, California, USA, 10-13 May 2004)*.
11. 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 (Chicago, Illinois, USA, 28 June - 01 July 2010)*. DOI: 10.2514/6.2010-4541
12. Bret J.F., Leconte P., Vieira J.P. et al. Rotating Shaft Balances for CRORs and Propellers. *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting (5-9 January 2015, Kissimmee, Florida)*. AIAA 2015-1790. DOI: 10.2514/6.2015-1790
13. Bogdanov V.V., Volobuev V.S., Gorbushin A.R. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2009, vol. XL, no. 5, pp. 74-81.
14. Kleev I.V. *Datchiki i sistemy*, 2007, no. 2, pp. 6-10.
15. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov* (Resistance of materials), Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 1999, 592 p.
16. Mekheda V.A. *Tenzometricheskii metod izmereniya deformatsii* (Strain-gauge method of deformations measuring), Samara, Samarskii gosudarstvennyi aerokosmicheskii universitet, 2011, 56 p.
17. Panfilov V.A. *Elektricheskie izmereniya* (Electrical measurements), Moscow, Izdatel'skii tsentr "Akademiya", 2006, 228 p.
18. Bruyaka V.A., Fokin V.G. *Inzhenernyi analiz v ANSYS Workbench* (Engineering analysis in ANSYS Workbench), Samara, Samarskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2010, 271 p.
19. Bogdanov V.V., Lytov V.V., Manvelyan V.S. Development of the six-component rotating shaft balances for counter rotating open rotor testing. *18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research, ICMAR (27 June-3 July 2016, Perm, Russia)*, 2016, vol. 1770, no. 1. DOI: 10.1063/1.4963944
20. Bogdanov V.V., Lyutov V.V., Manvelyan V.S. *Patent RU 2657340 C1*, 13.06.2018.