

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПО РАЗРАБОТКЕ ШЕСТИКОМПОНЕНТНЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕСОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ РУЛЕВОГО ВИНТА ВЕРТОЛЁТА

Петроневи́ч В.В.<sup>\*</sup>, Лютов В.В.<sup>\*</sup>, Манвелян В.С.<sup>\*\*</sup>,  
Куликов А.А.<sup>\*\*\*</sup>, Зимогоров С.В.<sup>\*\*\*\*</sup>

Центральный аэрогидродинамический институт  
им. профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ),  
ул. Жуковского, 1, Жуковский, Московская область, 140180, Россия

<sup>\*</sup> e-mail: mera@tsagi.ru

<sup>\*\*</sup> e-mail: vagan.manvelyan@tsagi.ru

<sup>\*\*\*</sup> e-mail: kulikov@tsagi.ru

<sup>\*\*\*\*</sup> e-mail: szimogorov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 10.02.2021

Работа посвящена исследованию перспективной схемы вращающихся тензометрических весов для измерения шести компонентов полной аэродинамической силы и момента, воздействующих на рулевой винт вертолётта. Определены ключевые зависимости компонентов друг от друга, выходные значения сигнальных напряжений с тензометрических мостов по каждому компоненту при заданных диапазонах предполагаемых нагрузок, а также тип и место наклейки тензометрических датчиков. Полученные результаты позволят разработать многокомпонентные вращающиеся тензометрические весы для исследования влияния на технические характеристики систем и конструктивное выполнение корпуса летательного аппарата (ЛА) газо- и гидродинамических процессов в проектируемой конструкции вертолётта для различных диапазонов измеряемых нагрузок.

*Ключевые слова:* вращающиеся тензометрические весы, испытания винтов, рулевой винт вертолётта, экспериментальные основы создания ЛА.

### Введение

Актуальность задачи по измерению суммарных аэродинамических нагрузок на рулевой винт вертолётта в процессе аэродинамического эксперимента обусловлена необходимостью всестороннего изучения критических режимов, возникающих при висении одновинтовых вертолёттов [1, 2]. Для изучения данных критических режимов разработаны специальные установки, имитирующие работу рулевого винта вертолётта на режиме висения и возникающие в этой связи эффекты, в частности «самопроизвольное» вращение вертолётта.

Поскольку расчетные методы исследования винтов, описанные, например, в [3–6], опираются на ряд допущений, эксперимент призван в связи с расчетными методами обеспечить максимально полное исследование протекающих физических процессов [7, 8].

Основной проблемой, стоящей на пути решения указанной задачи, является создание вращающихся шестикомпонентных тензовесов. Для этого необходимо определить измерительную схему тензовесов и провести их всестороннее исследование [9]. Шестикомпонентные тензометрические весы обеспечивают измерение трех проекций вектора  $\vec{R}(\vec{F}_x; \vec{F}_y; \vec{F}_z)$  и трех проекций вектора  $\vec{M}(\vec{M}_x; \vec{M}_y; \vec{M}_z)$  [10]. Развитие огромного числа беспилотных летательных аппаратов различной конфигурации, как правило, с винтовым движителем, скоростных вертолёттов и экспериментальных проектов [11] делает исследование вращающихся тензовесов для измерения нагрузок на винты крайне актуальной темой.

В предыдущих работах, посвященных вращающимся тензовесам для измерения нагрузок на высокооборотные соосные воздушные винты, были представлены восьмибалочная, активно используемая за рубежом [12–14], и двенадцатибалочная [15–17] схемы тензовесов с радиальным расположением непризматических балок; разработана теория работы и методика расчета параметров данных измерительных схем.

Статья посвящена разработке усовершенствованной конструкции, расчету и оптимизации параметров тензовесов на основе двенадцатибалочной схемы, оптимизированной под решение задач по измерению суммарных аэродинамических нагрузок на рулевой винт вертолёта.

### Описание конструкции

На рис. 1 показана схематизированная трехмерная модель компоновки вращающихся тензовесов на установке, имитирующей работу рулевого винта вертолёта.

Установка предназначена для проведения экспериментальных исследований аэродинамических и динамических характеристик рулевого винта на режимах «самопроизвольного» вращения во всех диапазонах реальных угловых скоростей вращения вертолёта и скоростей набегающего потока. Для измерения аэродинамических нагрузок на рулевой винт используются шестикомпонентные

аэродинамические тензометрические весы 3, установленные между втулкой винта 4 и редуктором 2. Редуктор соединен с приводом рулевого винта через трансмиссию 1.

Вращающиеся тензовесы 3 представляют собой моноблочную конструкцию цилиндрической формы. На рис. 2 представлен общий вид и габаритные размеры вращающихся тензовесов в миллиметрах.

Жесткое кольцо 5 соединяется со ступицей 7 двенадцатью балками 6 (чувствительными элементами). Чувствительные элементы в плане имеют пирамидальную форму параллелепипеда со скругленными подкосами.

К ступице 7 крепится специальная втулка с набором лопастей. Чувствительные элементы воспринимают нагрузки от лопастей через ступицу 7. Кольцо 5 жестко соединено с валом редуктора и является «землей» вращающихся тензовесов.

Чувствительный элемент имеет специальный скругленный подкос. Радиус скругления подкоса является концентратором напряжения и служит для повышения чувствительности от воздействия боковых сил. Он выбирался исходя из расчетов на прочность и технологической возможности наклейки тензорезисторов на самом скруглении.

Все четыре центральных чувствительных элемента имеют скругления в двух плоскостях ( $YZ$  и  $XZ$ ), поскольку это обеспечивает максимальное

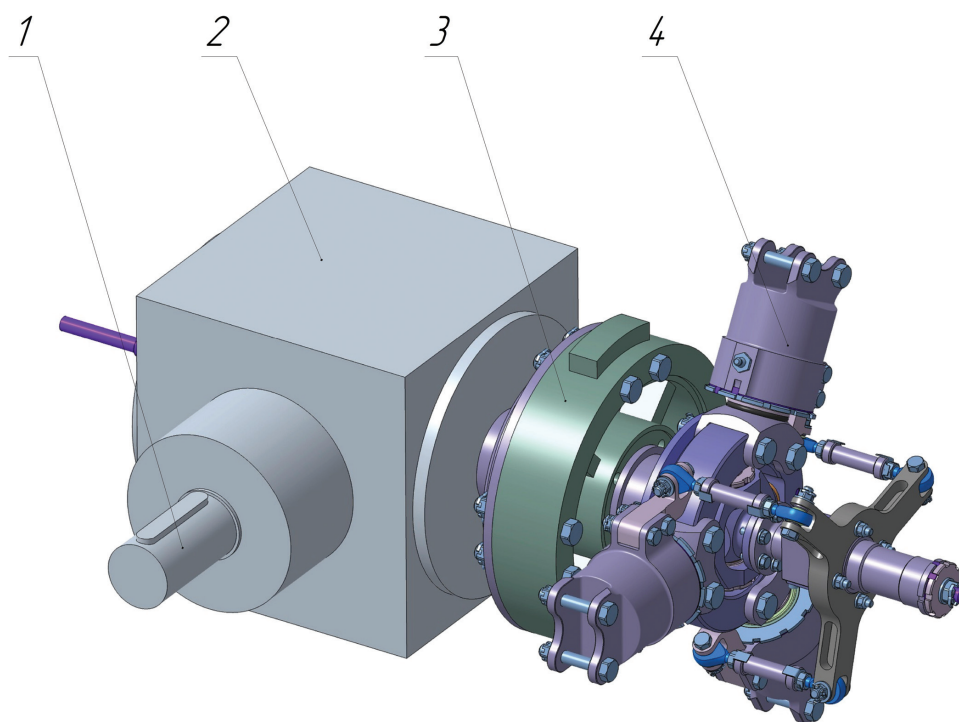


Рис. 1. Схематизированная трехмерная модель компоновки вращающихся тензовесов

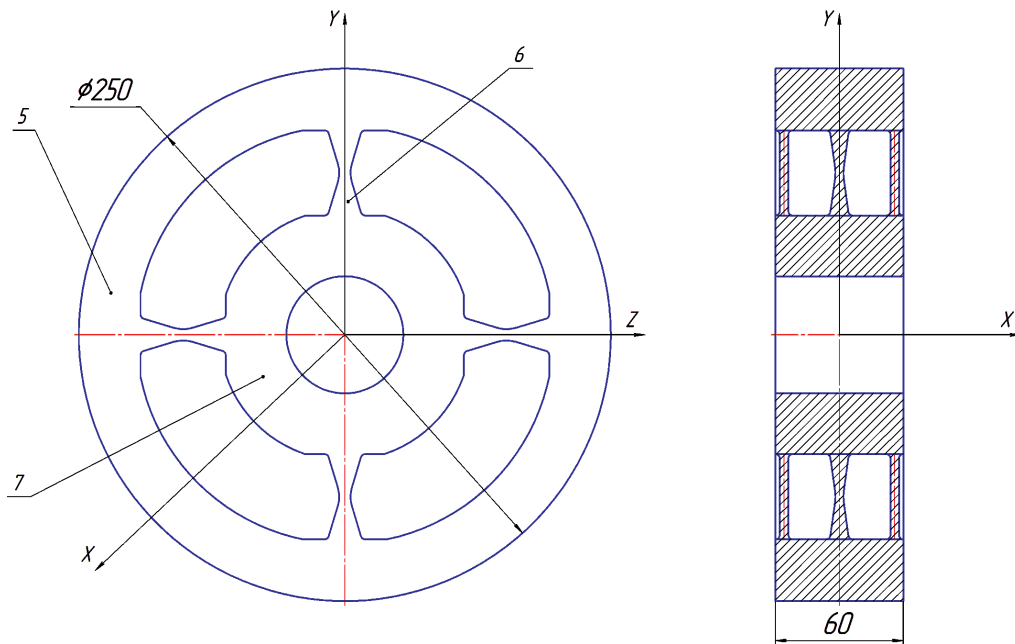


Рис. 2. Общий вид передних и задних тензосесов

сигнальное напряжение от воздействия боковых сил.

Из конструктивно-технологических соображений места перехода чувствительных элементов 6 на кольцо 5 и основу 7 скруглены.

**Компоненты тензосесов**

Полный аэродинамический вектор нагрузок  $\vec{R}$  и момент  $\vec{M}$ , измеряемые тензосесами, раскладываются на три силы и три момента по осям  $X, Y, Z$  – всего шесть измеряемых компонентов. Вследствие вращения весов пары компонентов  $\vec{F}_y; \vec{F}_z$  и  $\vec{M}_y; \vec{M}_z$  функционируют одинаково, следовательно, достаточно посчитать два из них. Для двух других результаты будут такими же, поэтому достаточно посчитать четыре из шести компонентов тензосесов. Рассмотрим компоненты  $\vec{M}_z$  и  $\vec{F}_z$ . В табл. 1 представлены ожидаемые нагрузки по компонентам. Геометрические размеры чувствительных элементов обусловлены условием достижения максимально допустимого выходного напряжения с тензомостов по компонентам при условии сохранения прочности конструкции.

Расчеты конструкции и ожидаемых сигналов тензосесов были проведены методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе ANSYS Workbench [18]. В табл. 2 даны параметры сетки для расчета методом КЭ.

Напряжения по компонентам, рассчитанные МКЭ, представляют собой эквивалентные напряжения по Мизесу:

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

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения.

Таблица 1

**Нагрузки на тензосесы по компонентам**

Измеряемый компонент		Диапазоны нагрузок
Наименование компонента	Обозначение	
Сила тяги, кГс	$\vec{F}_x$	от -450 до +450
Продольная сила, кГс	$\vec{F}_y$	от -112 до +112
Боковая сила, кГс	$\vec{F}_z$	от -112 до +112
Крутящий момент, кГс·м	$\vec{M}_x$	от -100 до +100
Изгибающие моменты, кГс·м	$\vec{M}_y$	от -16 до +16
	$\vec{M}_z$	от -16 до +16

Таблицы 2

Параметры сетки

Параметр	Значение
Максимальный размер элемента	2 мм
Размер элемента в области чувствительных элементов	0,5 мм
Число узлов	~ 1,3 млн
Число элементов	~ 750 тысяч

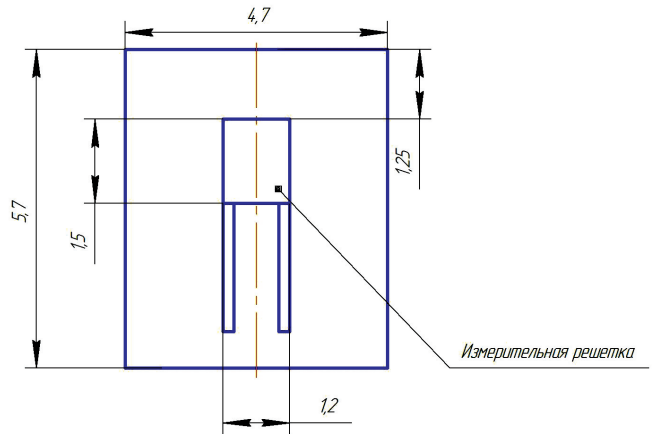


Рис. 3. Габаритные размеры тензорезистора

Тензовесы предполагается изготавливать из высоколегированных сталей, у которых при закалке достигается  $\sigma_B \leq 110 \frac{\text{кГс}}{\text{мм}^2}$ . Коэффициент запаса прочности  $K_{зп}$  определяется по формуле:

$$K_{зп}^i = \frac{\sigma_B}{\sigma_{i \max}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_B$  – предел прочности (временное сопротивление);  $\sigma_{i \max}$  – максимальное значение напряжения от воздействия  $i$ -го компонента нагрузки.

Минимально допустимым значением коэффициента запаса прочности конструкции тензовесов  $K_{зп}^i$  принято считать значение  $K_{зп}^i \geq 4$ .

Для определения выходного сигнала тензомоста как отношения электрического напряжения  $\Delta U$  к питанию тензомоста  $U_n$  по компонентам воспользуемся формулой:

$$G^i = \frac{\Delta U}{U_n} = S \frac{\sigma_c^i}{E} \cdot 10^3, \quad 0,1 \leq K^i \leq 2, \quad (3)$$

где  $S$  – коэффициент тензочувствительности тензорезистора (для константана  $S = 2$ );  $\sigma_c^i$  – сигнальное напряжение под тензорезистором;  $E$  – модуль Юнга, который примем равным  $2 \cdot 10^4$  кгс/мм<sup>2</sup>;  $i$  – компонент нагрузки. Выходной сигнал моста  $G^i$  измеряется в мВ/В.

Для наклейки выбраны тензорезисторы с сопротивлением  $R = 300\text{--}350$  Ом, базой 1,5 мм и габаритными размерами (в мм), представленными на рис. 3.

Компоненты  $\vec{M}_z$  и  $\vec{F}_x$

Чувствительные элементы ведут себя под действием  $\vec{M}_z$  и  $\vec{F}_x$  таким образом, что их деформа-

ции оказываются связанными между собой, что ведет к взаимным влияниям компонентов и увеличивает погрешность измерения. Для уменьшения взаимовлияния компонентов предусмотрены несколько уровней защиты одного компонента от другого.

Уже на стадии прочностного расчета конструкции и определения оптимальных параметров динамометрического элемента взаимовлияние компонентов в конструкции сводится к минимуму на уровне деформаций, что обеспечивает максимально возможную независимость измерения компонентов  $\vec{M}_z$  и  $\vec{F}_x$ . При воздействии на конструкцию силы или момента по одному компоненту механическое напряжение по другому – минимальное.

Следующим уровнем обеспечения независимости является способ соединения тензорезисторов в мостовых схемах.

Для решения указанной задачи рассмотрим последовательно напряжения в чувствительных элементах от действия компонентов  $\vec{M}_z$  и  $\vec{F}_x$ .

На рис. 4,а представлена расчетная модель для компонента  $\vec{M}_z$ , а на рис. 4,б – вид деформации чувствительных элементов.

Пакеты балок, расположенные вдоль оси  $Y$ , под воздействием нагрузки от компонента  $\vec{M}_z$  испытывают S-образную деформацию, в то время как пакеты балок, расположенные вдоль оси  $Z$ , испытывают деформацию кручения. С точки зрения измерения воздействия компонента  $\vec{M}_z$  представляется целесообразным наклеивать измерительный мост на вертикальные чувствительные элементы, испытывающие S-образную деформацию. На рис. 5 показан график распределения напряжений от воздействия компонента  $\vec{M}_z$  по длине балки  $l = 40$  мм.

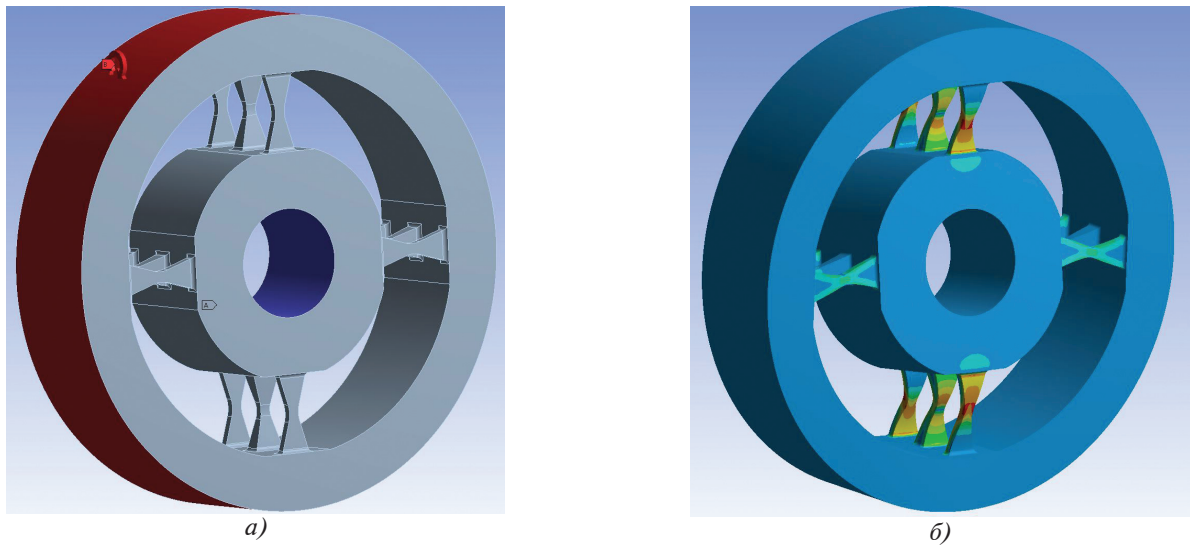


Рис. 4. Компонент  $\overline{M_z}$ : а — расчетная модель; б — вид деформации

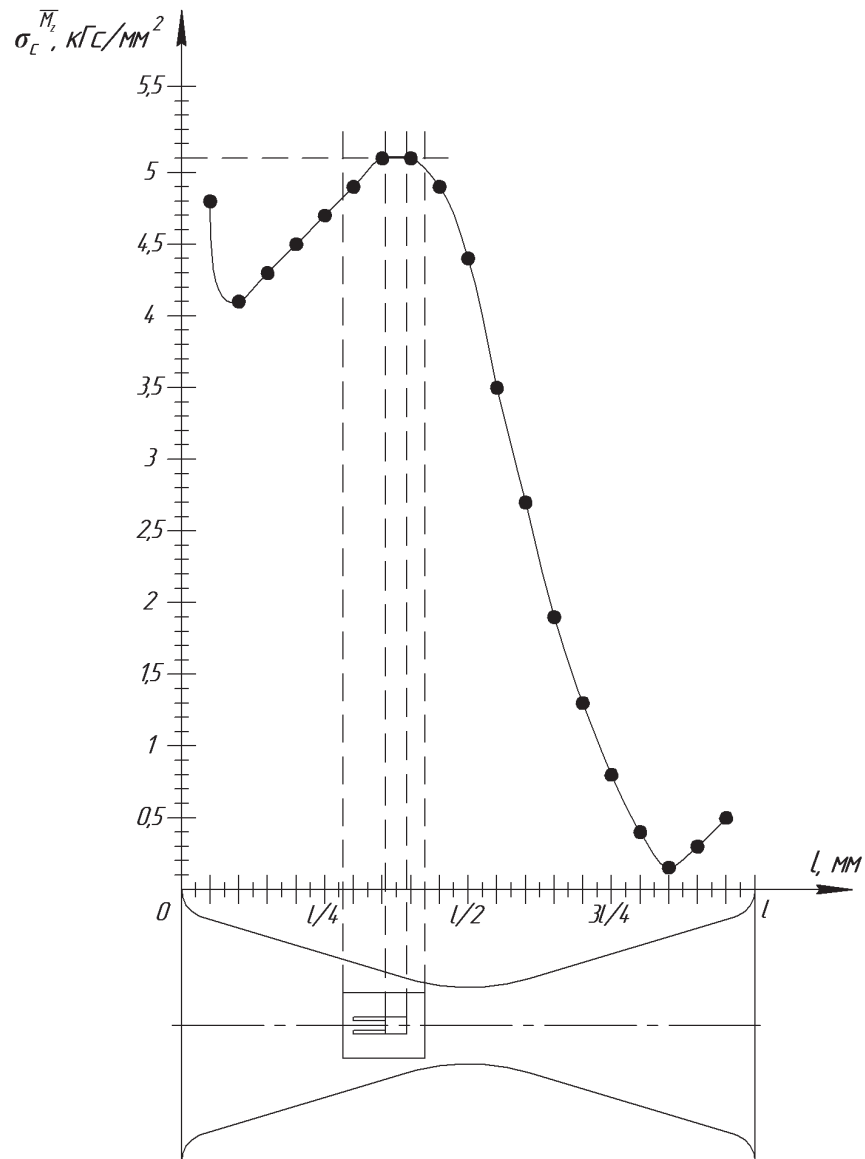


Рис. 5. График распределения напряжений от воздействия компонента  $\overline{M_z}$

Максимальное напряжение в конструкции от воздействия компонента  $M_z$  не превышает

$\sigma_{\overline{M_z}} \leq 5,9 \frac{\text{кГс}}{\text{мм}^2}$  в корневых сечениях, следовательно:

$$K_{\text{зп}}^{\overline{M_z}} = 18,6.$$

Поскольку  $K_{\text{зп}}^{\overline{M_z}} > 4$ , следовательно, условие прочности по компоненту конструкции  $\overline{M_z}$  выполняется.

Согласно рис. 5 наиболее высокие значения напряжения достигаются между  $l/4$  и  $l/2$  от корневого сечения балки. Максимальное значение сигнального напряжения в этой области

$\sigma_c^{\overline{M_z}} = 5,1 \frac{\text{кГс}}{\text{мм}^2}$ , соответственно, в этой области

целесообразно наклеивать тензорезистор, который схематично представлен на рисунке.

Выходной сигнал тензомоста от воздействия компонента  $M_z$ :

$$G^i = \frac{\Delta U}{U_n} = S \frac{\sigma_c^{\overline{M_z}}}{E} \cdot 10^3 = 0,5 \frac{\text{мВ}}{\text{В}}.$$

На рис. 6,а представлена расчетная модель для компонента  $\overline{F_x}$ , а на рис. 6,б — вид деформации конструкции.

Пакеты вертикальных и горизонтальных балок под воздействием нагрузки от компонента  $\overline{F_x}$  испытывают S-образную деформацию. С точки

зрения измерения воздействия компонента  $X$  представляется целесообразным наклеивать измерительный мост как на вертикальные пакеты балок, так и на горизонтальные, что снизит влияние смещения точки приложения нагрузки от оси  $X$  тензовесов. На рис. 7 показан график распределения напряжений от воздействия компонента  $X$ .

Максимальное напряжение в конструкции от воздействия компонента  $X$  не превышает

$$\sigma_{\overline{F_x}} \leq 15,9 \frac{\text{кГс}}{\text{мм}^2}.$$

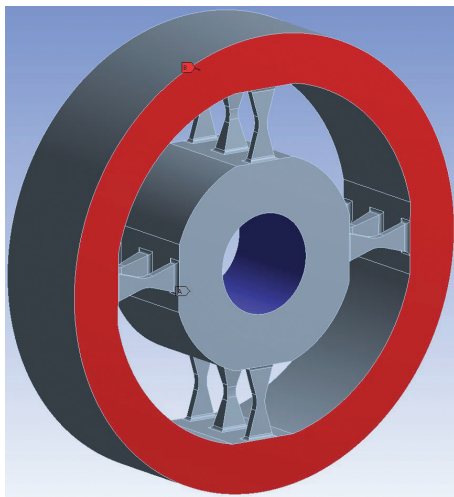
Следовательно,

$$K_{\text{зп}}^{\overline{F_x}} = 5,9.$$

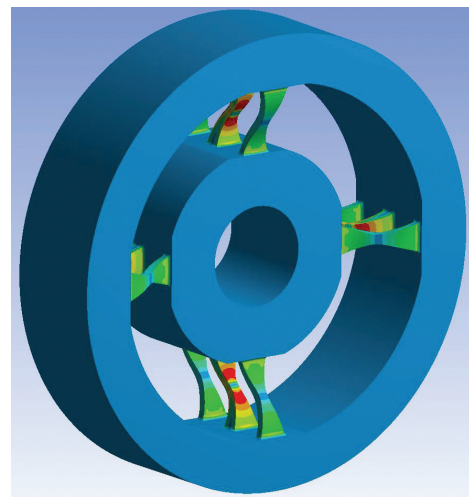
Поскольку  $K_{\text{зп}}^{\overline{F_x}} > 4$ , следовательно, условие прочности по компоненту конструкции  $\overline{F_x}$  выполняется.

Согласно рис. 7 наиболее высокие значения напряжения достигаются между корневым сечением балки и  $l/4$ , а также между  $3l/4$  и  $l$ . Значение сигнального напряжения в этих областях доходит до  $\sigma_c^{\overline{F_x}} = 9,7 \frac{\text{кГс}}{\text{мм}^2}$ . Однако скругление у основания балки требует несколько отступить от коневых сечений из-за технологии наклейки. С

учетом того, что резисторы для компонента  $\overline{M_z}$  предполагается наклеивать на удалении между  $l/2$  и  $l/4$  от основания, для компонента  $\overline{F_x}$  возьмем диапазон между  $3l/4$  и  $l$ , где достигается



а)



б)

Рис. 6. Компонент  $\overline{F_x}$ : а — расчетная модель; б — вид деформации

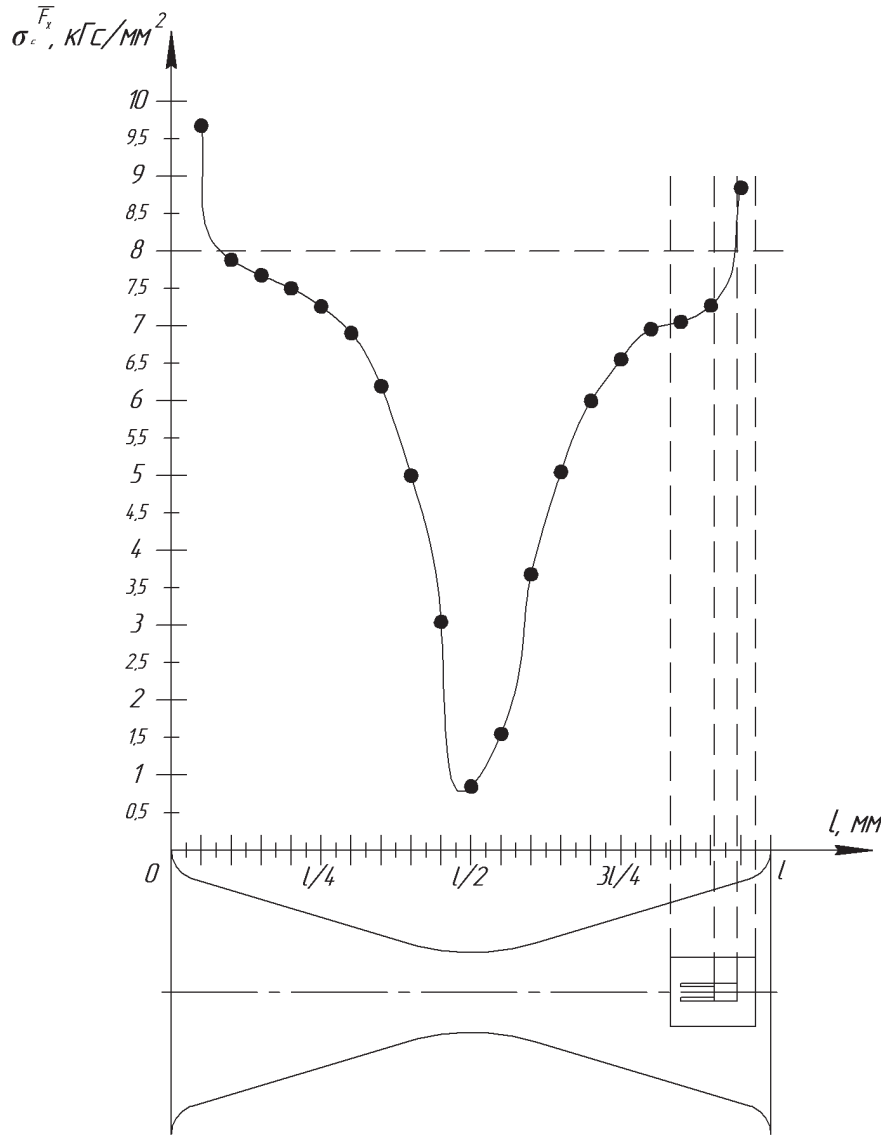


Рис. 7. График распределения напряжений от компонента  $\vec{F}_x$

$\sigma_c^{\vec{F}_x} = 8 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$ . Именно в этой области целесообразно наклеивать тензорезистор, который схематично представлен на рис. 7.

Выходной сигнал тензомоста от воздействия компонента  $\vec{F}_x$ :

$$G^i = \frac{\Delta U}{U_{\text{п}}} = S \frac{\sigma_c^{\vec{F}_x}}{E} \cdot 10^3 = 0,8 \frac{\text{мВ}}{\text{В}}$$

На рис. 8 представлен график влияния компонентов  $\vec{M}_z$  и  $\vec{F}_x$  друг на друга. Следует отметить, что при данном расположении тензорезисторов, при воздействии компонента  $\vec{M}_z$  влияние на

компонент  $\vec{F}_x$  от него не превышает  $0,5 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$ , т. е. при значении  $\sigma_c^{\vec{F}_x} = 8 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$  это не более 6% от  $\sigma_c^{\vec{F}_x}$ , что пренебрежимо мало для того, чтобы внести существенную погрешность в измерение компонента  $\vec{F}_x$ .

При воздействии компонента  $\vec{F}_x$  влияние на компонент  $\vec{M}_z$  от него достигает  $6,2 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$ , что при  $\sigma_c^{\vec{M}_z} = 5,1 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$  составляет 121,5% от  $\sigma_c^{\vec{M}_z}$ . Влияние более чем на 100% может привести к снижению точности, даже несмотря на соединение в мостовых схемах, которое исключает вли-

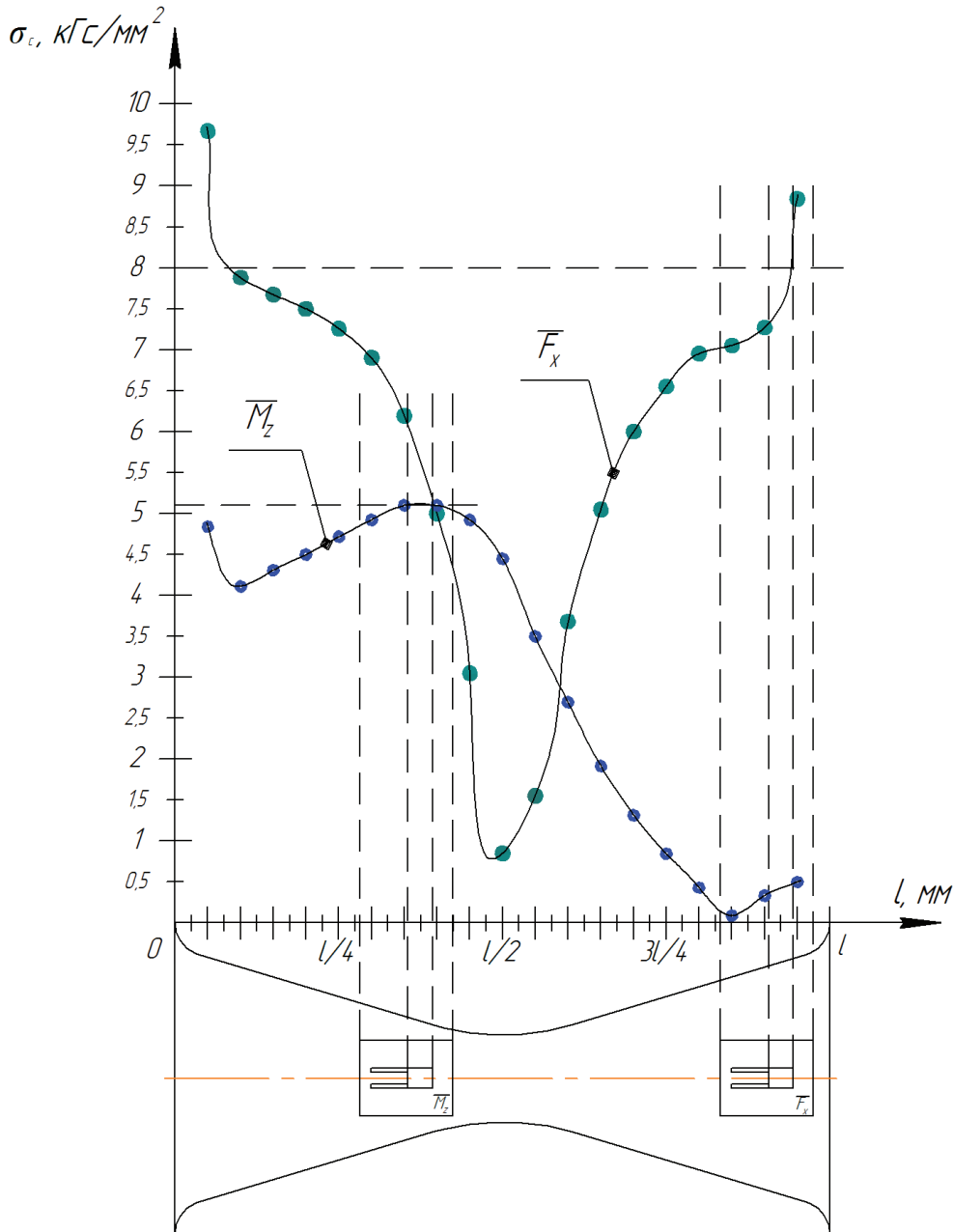


Рис. 8. График распределения напряжений от компонентов  $\vec{M}_z$  и  $\vec{F}_x$

яние одного компонента на другой. В связи с этим целесообразно тензорезистор по компоненту  $\vec{M}_z$  сместить к  $l/2$ , где влияние от компонента  $\vec{F}_x$  не превышает  $1,8 \text{ кгс/мм}^2$ . Это составляет не более 45% от  $\sigma_c^{\vec{M}_z} = 4,4 \text{ кгс/мм}^2$  в этой области, что допустимо.

Суммарные напряжения под тензорезисторами при воздействии одновременно  $\vec{M}_z$  и  $\vec{F}_x$  компонентов не превышают  $15 \text{ кгс/мм}^2$ , что в два-три раза ниже максимально допустимого напряжения

под тензорезистором в зависимости от конкретного производителя тензорезистора.

#### Компонент $\vec{M}_x$ и $\vec{F}_z$

Компонент  $\vec{M}_x$  (крутящий момент) является одним из основных компонентов вращающихся тензочувствительных элементов. Результаты измерения крутящего момента используются при сертификации винта, а измерение компоненты силы  $\vec{F}_z$  крайне актуально при исследовании косового обдува винта.

На рис. 9,а представлена расчетная модель для компонента  $\vec{M}_x$ , а на рис. 9,б — вид деформации конструкции.



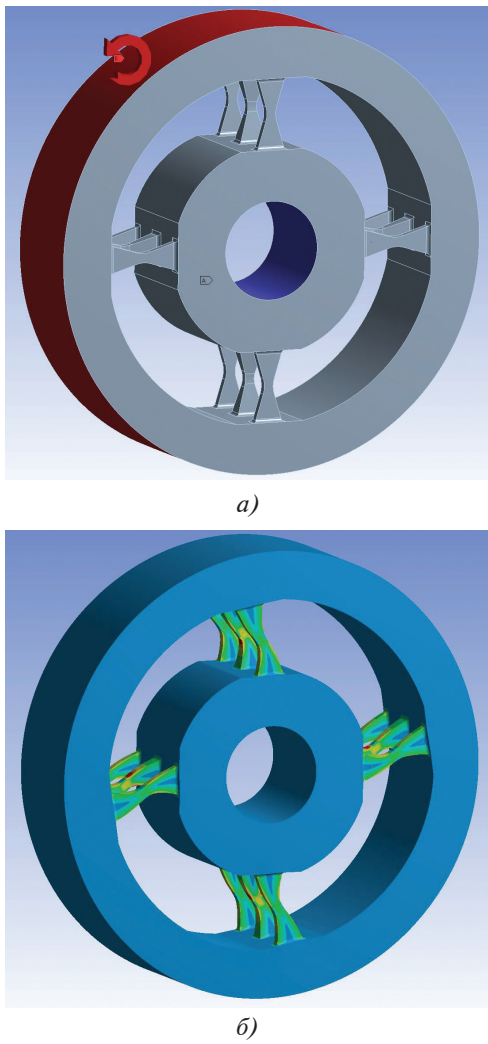


Рис. 9. Компонент  $\overline{M}_x$ : а — расчетная модель; б — вид деформации

Пакеты вертикальных балок под воздействием нагрузки от компонента  $\overline{M}_x$  испытывают S-образную деформацию в плоскости ZY.

Для минимизации влияния остальных компонентов на  $\overline{M}_x$  целесообразно наклеивать измерительный мост на боковые грани центральных балок всех четырех пакетов балок. На рис. 10 показан график распределения напряжений от воздействия компонента  $\overline{M}_x$ .

Максимальное напряжение в конструкции от воздействия компонента  $\overline{M}_x$  не превышает

$$\sigma_{\overline{M}_x \max} \leq 26 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}. \text{ Следовательно:}$$

$$K_{\text{зп}}^{\overline{M}_x} = 4,2$$

Поскольку  $K_{\text{зп}}^{\overline{M}_x} > 4$ , следовательно, условие прочности по компоненту конструкции  $\overline{M}_x$  выполняется.

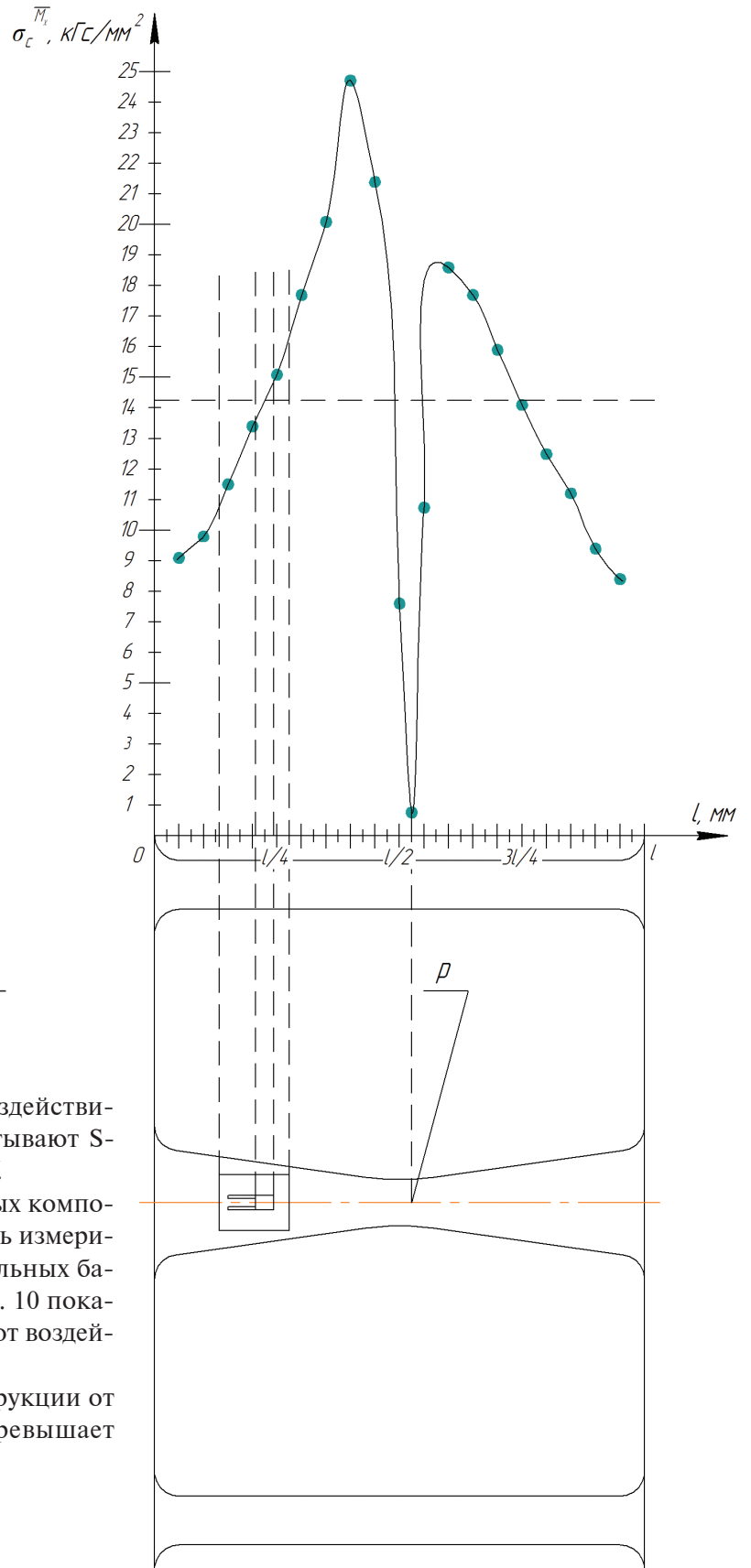


Рис. 10. График распределения напряжений от компонента  $\overline{M}_x$

На диаграмме отметим точку  $p$ , где значение  $\sigma_c^{\overline{M}_x} = 0,7 \text{ кгс/мм}^2$ . Это точка минимального напряжения от воздействия компонента  $\overline{M}_x$ , следовательно, это точка минимального влияния компонента  $\overline{M}_x$  на остальные компоненты.

Согласно рис. 10 наиболее высокие значения напряжения достигаются между  $l/4$  и  $l/2$ , ближе к  $l/2$ . Значение сигнального напряжения в этих областях доходит до  $\sigma_c^{\overline{M}_x} = 24,7 \text{ кгс/мм}^2$ . Однако в этом случае выходной сигнал тензомоста от воздействия компонента  $\overline{M}_x$  будет равен:

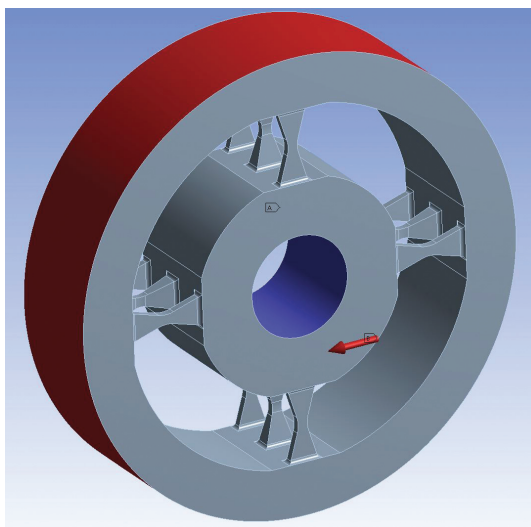
$$G^i = \frac{\Delta U}{U_{\Pi}} = S \frac{\sigma_c^{\overline{M}_x}}{E} \cdot 10^3 = 2,5 \frac{\text{мВ}}{\text{В}}$$

Данное значение превышает допустимое по формуле (3). Поэтому сместим тензорезистор ближе к корневому сечению, до  $l/4$ , где  $\sigma_c^{\overline{M}_x} = 14,2 \text{ кгс/мм}^2$ .

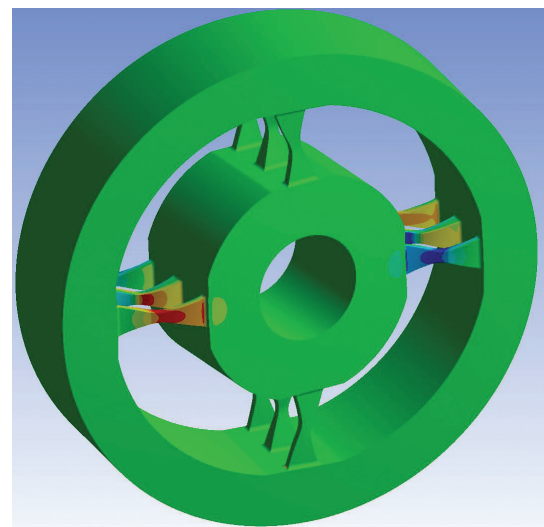
Выходной сигнал тензомоста от воздействия компонента  $\overline{M}_x$  для данного диапазона:

$$G^i = \frac{\Delta U}{U_{\Pi}} = S \frac{\sigma_c^{\overline{M}_x}}{E} \cdot 10^3 = 1,42 \frac{\text{мВ}}{\text{В}}$$

На рис. 11,а представлена расчетная модель для компонента  $\overline{F}_z$ , а на рис. 11,б — вид деформации конструкции.



а)



б)

Рис. 11. Компонент  $\overline{F}_z$ : а — расчетная модель; б — вид деформации

Поскольку начало координат тензочувствительных элементов смещено на 108 мм относительно оси центральной балки пакета балок и совпадает с предполагаемой осью испытываемых винтов, пакеты вертикальных балок под воздействием нагрузки от компонента  $\overline{F}_z$  испытывают S-образную деформацию.

Для уменьшения влияния остальных компонентов на  $\overline{F}_z$  и для повышения сигнального напряжения целесообразно наклеивать измерительный мост на боковые грани центральных балок в середине, на скруглении. Однако, если для остальных компонентов мы рассчитывали сигнальные напряжения по Мизесу по формуле (1), то в данном случае нам необходимо выделить нормальное напряжение по оси  $\overline{F}_z$ , поскольку тензорезистор по данному компоненту будет «чувствовать» только напряжение от растяжения – сжатия балки, а составляющая от S-образной деформации не будет влиять на измерения тензорезистора. На рис. 12 показан график распределения напряжений от воздействия компонента  $\overline{F}_z$ .

Максимальное напряжение в конструкции от воздействия компонента  $\overline{F}_z$  не превышает

$$\sigma_{\overline{F}_z \text{ max}} \leq 5 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}, \text{ следовательно:}$$

$$K_{\text{зп}}^{\overline{F}_z} = 22.$$

Поскольку  $K_{\text{зп}}^{\overline{F}_z} > 4$ , следовательно, условие прочности по компоненту конструкции  $\overline{F}_z$  выполняется.

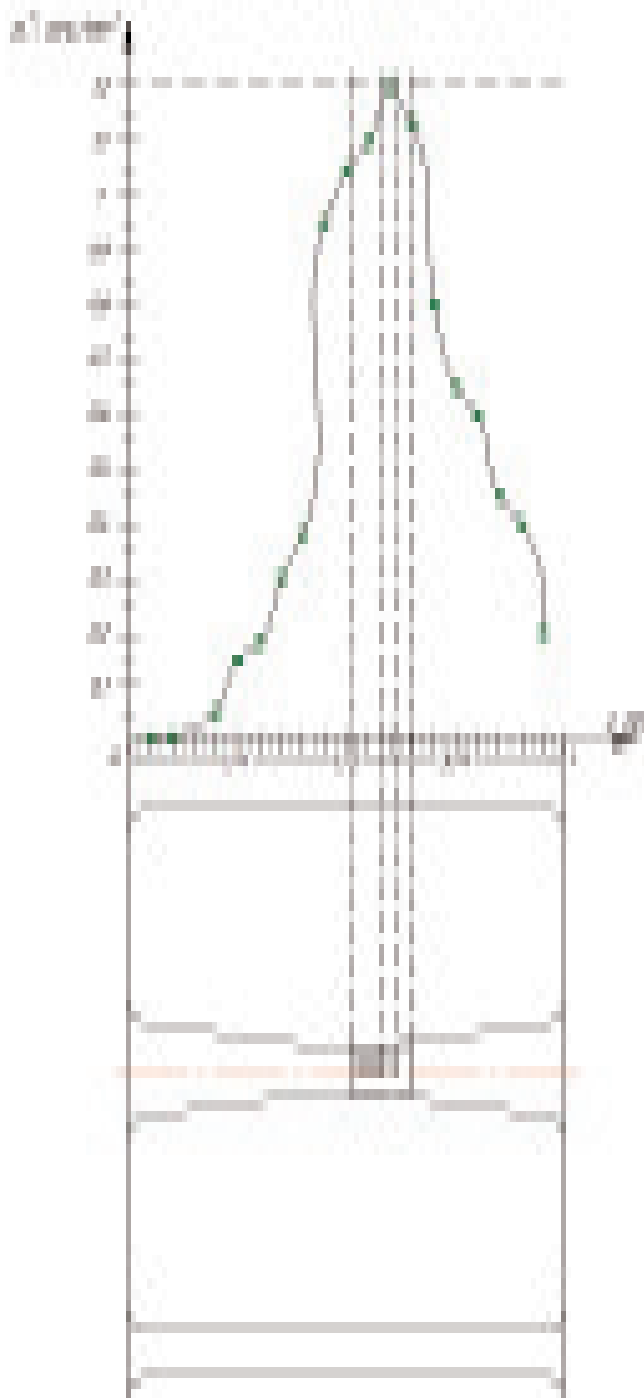


Рис. 12. График распределения напряжений от компонента  $\vec{F}_z$

Согласно рис. 12 наиболее высокие значения напряжения достигаются в диапазоне между  $l/2$  и  $3l/4$ , ближе к  $l/2$ . Значение сигнального напряжения в этой области доходит до  $\sigma_c^{\vec{F}_z} = 1,2 \text{ кгс/мм}^2$ .

Выходной сигнал тензомоста от воздействия компонента  $\vec{F}_z$ :

$$G^i = \frac{\Delta U}{U_{\text{п}}} = S \frac{\sigma_c^{\vec{F}_z}}{E} \cdot 10^3 = 0,12 \frac{\text{мВ}}{\text{В}}$$

На рис. 13 показана диаграмма распределения напряжений от компонентов  $\vec{M}_x$  и  $\vec{F}_z$ . Слева, на диаграмме  $\vec{M}_x$ , толстыми линиями представлен тензорезистор компонента  $\vec{M}_x$ , тонкими – тензорезистор компонента  $\vec{F}_z$ , а справа – наоборот. Поскольку  $\sigma_c^{\vec{F}_z}$  имеет относительно невысокое значение, необходимо совместить измерительную решетку тензорезистора по компоненту  $\vec{F}_z$  в диапазоне между  $l/2$  и  $3l/4$  с точкой  $p$ , которую мы выделили на рис. 10, где  $\sigma_c^{\vec{M}_x} = 0,7 \text{ кгс/мм}^2$ . При значении  $\sigma_c^{\vec{F}_z} = 1,2 \text{ кгс/мм}^2$  влияние от компонента  $\sigma_c^{\vec{M}_x}$  не превышает 59%, что допустимо.

**Схема соединения тензорезисторов**

При разработке конструкции и расчете тензочувствительных элементов необходимо учитывать расположение тензорезисторов и их соединение в мосты. На рис. 14 схематически показаны вид спереди и вид сзади тензочувствительных элементов с тензорезисторами. В табл. 3 представлен список компонентов и номера тензорезисторов, собираемых в мост Уитстона для их измерения.

Таблица 3

**Измеряемые компоненты и номера тензорезисторов**

Измеряемый компонент		Номера резисторов
Сила тяги, кгс	$\vec{F}_x$	от R1 до R8
Продольная сила, кгс	$\vec{F}_y$	от R25 до R28
Боковая сила, кгс	$\vec{F}_z$	от R29 до R32
Крутящий момент, кгс·м	$\vec{M}_x$	от R17 до R24
Изгибающие моменты, кгс·м	$\vec{M}_y$	от R13 до R16
	$\vec{M}_z$	от R9 до R11

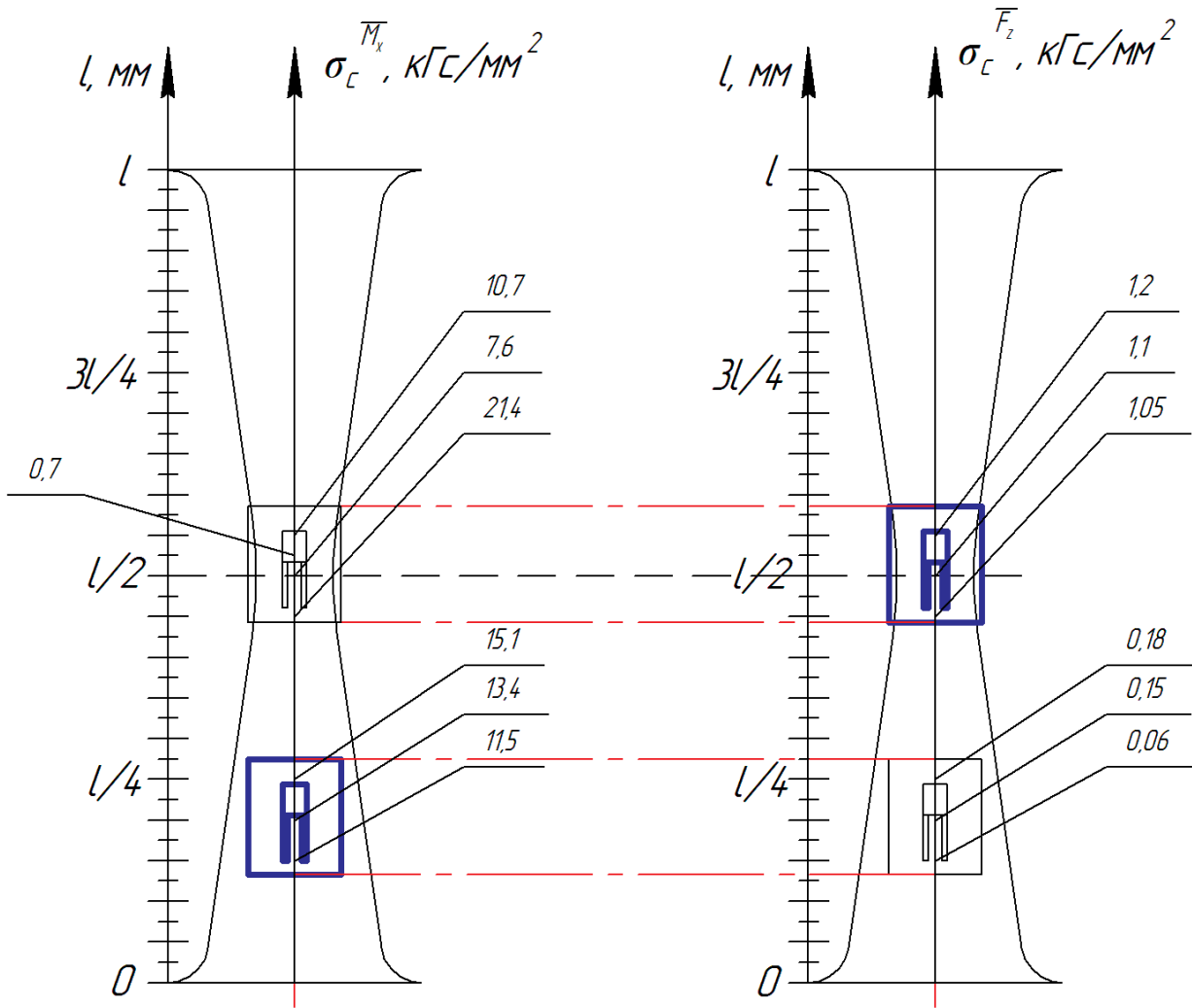


Рис. 13. Диаграмма распределений напряжений от компонентов  $\vec{M}_x$  и  $\vec{F}_z$

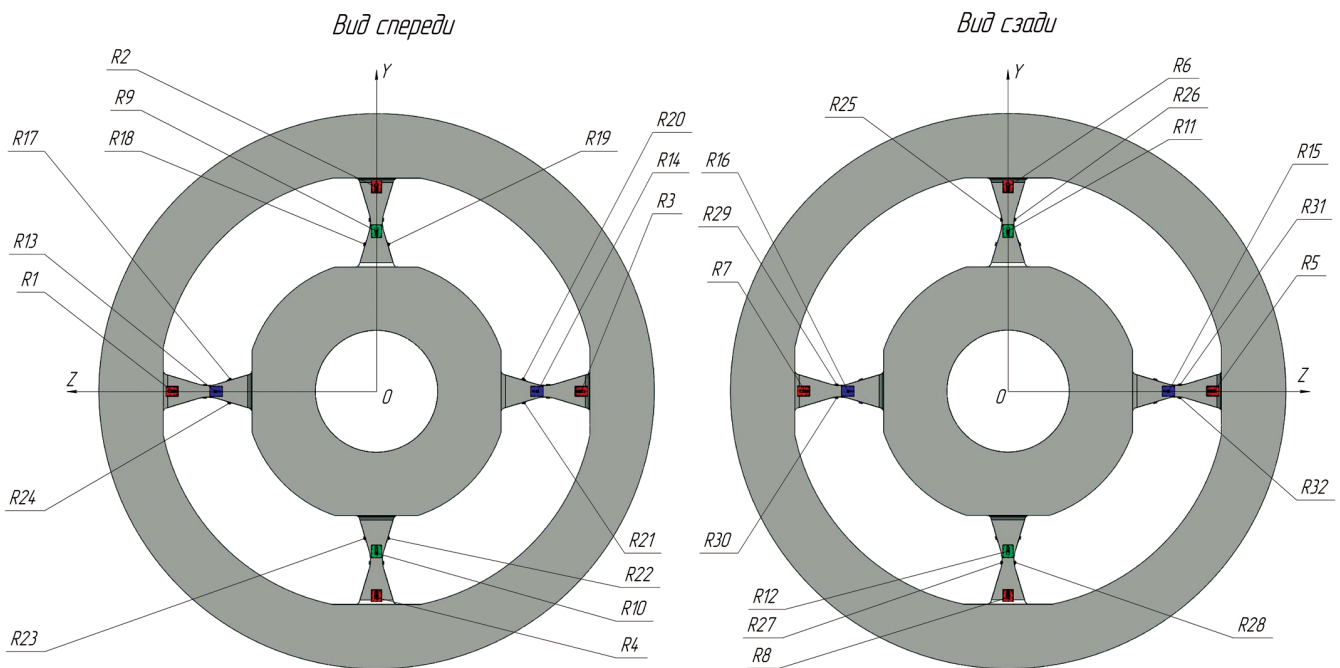


Рис. 14. Вид спереди и вид сзади тензовесов с тензорезисторами

## Будущие исследования

Следующим этапом исследования станет монтаж тензорезисторов по разработанной схеме, их коммутация в мост и калибровка тензовесов с выводом формул, описывающих взаимосвязи компонентов от приложенной нагрузки и их взаимовлияние – исследование на калибровочном стенде.

Калибровка тензовесов один из наиболее ответственных этапов при создании тензовесов, поскольку именно после этого этапа определяется погрешность измерительного устройства. Для проведения корректной калибровки с учетом динамических воздействий необходимо разработать стенд для динамической и статической калибровки тензовесов, для того чтобы учесть в процессе калибровки все источники погрешности как динамические, так и статические, и внести соответствующие поправки в формулы весов.

Для работы подобных тензовесов требуется высокоскоростная телеметрическая система с частотой опроса измерительных каналов не ниже 30 кГц. Телеметрическая система должна включать в себя также систему определения углового положения тензовесов, от погрешности работы которой напрямую будет зависеть погрешность измерения компонентов  $\vec{F}_y$ ;  $\vec{F}_z$  и  $\vec{M}_y$ ;  $\vec{M}_z$ . Подобные системы существуют и активно применяются за рубежом [19, 20]. Разработка отечественного аналога потребует дополнительных исследований.

## Выводы

Результаты исследования шестикомпонентных вращающихся тензометрических весов с новой измерительной схемой из двенадцати чувствительных балок, которые предназначены для измерения суммарных нагрузок на винты при исследовании влияния газодинамических процессов на технические характеристики и конструкцию ЛА, в частности для испытания рулевых винтов одновинтовых вертолётов, показали, что разработанная схема масштабируема и может быть применена для решения задач по измерению нагрузок на винты в различных диапазонах нагрузок.

Максимальное напряжение в тензовесах по условиям прочности  $\sigma_{\max} \leq 35$  кгс/мм<sup>2</sup>, а сигнальные напряжения компонентов весов лежат в пределах  $\sigma_c = (1,2...14)$  кгс/мм<sup>2</sup>. С учетом возможностей современной измерительной аппаратуры

типа НВМ MGC Plus и опыта разработки шестикомпонентных вращающихся тензометрических весов в [15] диапазон сигнальных напряжений достаточен для измерения шести компонентов полной аэродинамической силы и момента на винты с ожидаемой относительной погрешностью не хуже 1% от диапазона измерения.

Разработана оптимальная схема наклейки тензорезисторов на основе расчета сигнальных напряжений конструкции под воздействием заданных нагрузок от рулевого винта вертолёта.

*Авторы выражают 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., Богданову Василию Васильевичу за вклад, отзывы и ценные рекомендации.*

## Библиографический список

1. Анимца В.А., Леонтьев В.А. О «самопроизвольном» вращении одновинтовых вертолётов // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. №172. С. 96-102.
2. Анимца В.А., Крымский В.С., Леонтьев В.А. Расчетные исследования характеристик рулевых винтов с различными значениями заполнения на режиме висения при вращении вертолёта // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=76969>
3. Анимца В.А., Головкин В.А., Никольский А.А. Аэродинамическое проектирование вертолетных профилей ЦАГИ // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 2. С. 16-28. DOI: 10.34759/vst-2020-2-16-28
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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. № 4-1(84). С. 70-75.
8. Антропов В.Ф., Бураков Г.Б., Дьяченко А.С. и др. Экспериментальные исследования по аэродинами-

- ке вертолѐта. — М.: Машиностроение, 1980. — 240 с.
9. *Богданов В.В., Волобуев В.С.* Многокомпонентные тензометрические весы // Датчики и системы. 2004. №3. С. 3-8.
  10. *Горлин С.М., Слезингер И.И.* Аэромеханические измерения: Методы и приборы. — М.: Наука, 1964. — 720 с.
  11. *Никитин С.О., Макеев П.В.* Проект скоростного вертолѐта схемы «Синхроптер» с толкающим воздушным винтом // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 82-95.
  12. *Philipsen I., Hoeijmakers H.* Dynamic check and temperature correction for six-component rotating shaft balances // 4<sup>th</sup> International Symposium on Strain-Gauge Balances (10-13 May 2004; San Diego, California, USA).
  13. *Zimmermann C., Haberli W., Monkewitz M.* Precise Measurement Technology Based on new Block-type and Rotary Shaft Balances // 27th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference (28 June 2010 - 01 July 2010; Chicago, Illinois, USA). DOI: 10.2514/6.2010-4541
  14. *Fetet T., Bret J.F., Leconte P., Vieira J.P.* 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
  15. *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
  16. *Bogdanov V.V., Lytov 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
  17. *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.
  18. *Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А.* и др. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учеб. пособие. — Самара: Самарский гос. технический ун-т, 2010. Ч. 1. — 271 с.
  19. *Bardet S.M., Zwemmer R., Faasse P.R., 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, Germany). DOI: 10.1049/cp.2016.0827
  20. *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: Clean Sky Breakthroughs and worldwide status” (12-14 March 2014, Brussels, Belgium).

## STUDY ON SIX-COMPONENT ROTATING STRAIN-GAUGE BALANCE DEVELOPMENT FOR HELICOPTER TAIL ROTOR TESTING

Petronevich V.V.\* , Lyutov V.V.\* , Manvelyan V.S.\*\* , Kulikov A.A.\*\*\* , Zimogorov S.V.\*\*\*\*

Central Aerohydrodynamic Institute named after prof. N.E. Zhukovsky (TsAGI),  
1, Zhukovsky str., Zhukovsky, Moscow Region, 140180, Russia

\* e-mail: mera@tsagi.ru

\*\* e-mail: vagan.manvelyan@tsagi.ru

\*\*\* e-mail: kulikov@tsagi.ru

\*\*\*\* e-mail: szimogorov@yandex.ru

### Abstract

Measuring total forces and torques affecting the helicopter tail rotor became an up-to-date task of aerodynamics with the advent of the interest to studying “spontaneous” left rotation of single rotor helicopters.

A strain gauge balance is employed to measure the six components of the total aerodynamic force and moment. As far as the case in hand is the loads on the rotating propeller measuring, the strain-gauge balance should be a rotating one (RSB) to measure the six components. The article presents the results of the further development of the spoke-type RSB design with twelve measuring beams, which were presented in the earlier works of the authors. The article demonstrates that the structure consisted of the twelve measuring beams is scalable and applicable with various combinations of the expected loads, affecting the propeller in rotation. Besides, the anticipated places for the strain-gauge gluing are shown demonstrably, and the scheme of their connection into the Wheatstone measuring bridge is proposed.

Computations revealed that components interaction in such structure are minimal at maximum value of signal stresses in the supposed places of strain-gauge resistors gluing. Besides this, the strain-gauge balance design ensures high strength factor no less than four.

The expected errors of the six-component RSB proposed in the article are no worse than 1% of the measurement range. The further development of this work will be the RSB calibration, and the study of characteristics in rotation on a special test bench.

**Keywords:** rotating strain-gauge balances, rotor testing, helicopter tail rotor, experimental basics of aerial vehicle creation.

### References

1. Animitsa V.A., Leont'ev V.A. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*, 2011, no. 172, pp. 96-102.

2. Animitsa V.A., Krymskii V.S., Leont'ev V.A. *Trudy MAI*, 2017, no. 92. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=76969>
3. Animitsa V.A., Golovkin V.A., Nikol'skii A.A. Aerodynamic design of TSAGI helicopter airfoils. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 2, pp. 16-28. DOI: 10.34759/vst-2020-2-16-28
4. 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.
5. 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.
6. Shaidakov V.I. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*, 2016, no. 226(4), pp. 165-175.
7. Nazarov D.V., Kondryakova A.V. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2018, vol. 20, no. 4-1(84), pp. 70-75.
8. Antropov V.F., Burakov G.B., D'yachenko A.S. et al. *Eksperimental'nye issledovaniya po aerodinamike vertoleta* (Experimental studies on helicopter aerodynamics), Moscow, Mashinostroenie, 1980, 240 p.
9. Bogdanov V.V., Volobuev V.S. *Datchiki i sistemy*, 2004, no. 3, pp. 3-8.
10. Gorlin S.M., Slezinger I.I. *Aeromekhanicheskie izmereniya: Metody i pribory* (Aeromechanical measurements: Techniques and devices), Moscow, Nauka, 1964, 720 p.
11. 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.
12. Philipsen I., Hoeijmakers H. Dynamic check and temperature correction for six-component rotating shaft balances. *4th International Symposium on Strain-Gauge Balances (10-13 May 2004; San Diego, California, USA)*.
13. Zimmermann C., Haberli W., Monkewitz M. Precise Measurement Technology Based on new Block-type and Rotary Shaft Balances. *27th AIAA Aerodynamic*

- Measurement Technology and Ground Testing Conference (28 June 2010 - 01 July 2010; Chicago, Illinois, USA)*. DOI: 10.2514/6.2010-4541
14. Fetet T., Bret J.F., Leconte P., Vieira J.P. 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
  15. 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
  16. Bogdanov V.V., Lytov 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
  17. Bogdanov V.V., Lytov V.V., Manvelyan V.S. *Patent RU 2657340 C1*, 13.06.2018.
  18. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A. et al. *Inzhenernyi analiz v ANSYS Workbench (Engineering Analysis in ANSYS Workbench)*, Samara, Samarskii gos. tekhnicheskii universitet, 2010. Part 1, 271 p.
  19. Bardet S.M., Zwemmer R., Faasse P.R., 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, Germany)*. DOI: 10.1049/cp.2016.0827
  20. 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: Clean Sky Breakthroughs and worldwide status" (12-14 March 2014, Brussels, Belgium)*.