

УДК 321.3.016.001.57: 621.3.018.12

С.В. ЕПИФАНОВ, Ф.Ф. СИРЕНКО, Р.Л. ЗЕЛЕНСКИЙ, Т.В. КУЛИК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ФАЗОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Данная статья посвящена измерителю крутящего момента (ИКМ) фазометрическим методом. Представлена твердотельная модель ИКМ, и обоснована оптимальная величина катета тринагулярной сетки, при помощи которой проводились исследования влияния различных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на погрешность определения крутящего момента. В статье приведены результаты расчетов по каждому фактору в ожидаемом диапазоне его изменения. Проанализированы полученные результаты и даны рекомендации по повышению достоверности вычисления значения крутящего момента.

Ключевые слова: измеритель крутящего момента, твердотельная модель, угол закрутки, рессора, индуктор.

Введение

Одним из важных направлений обеспечения надежности двигателей в условиях их конструктивного усложнения и интенсификации эксплуатации является совершенствование средств измерения параметров рабочего процесса, используемых для решения задач управления и диагностирования. В турбовальных и турбовинтовых двигателях (ТВаД и ТВД) наиболее актуальной в данном направлении является задача измерения крутящего момента.

На протяжении более 50 лет ТВаД и ТВД оснащаются гидромеханическими измерителями крутящего момента (ИКМ), основанными на преобразовании окружного усилия в перемещение (деформацию), а перемещения – в изменение давления масла, постоянный расход которого обеспечивается шестеренным насосом [1, 2]. В работе [3] предложено аналогичное устройство со струйным пневматическим вихревым датчиком. Однако такие устройства сложны и подвержены влиянию множества технологических факторов, в конечном результате влияющих на точность изготовления элементов датчика.

Другой подход основан на определении скручивания вала с использованием бесконтактных индуктивных датчиков, установленных на разных концах приводного вала над неоднородным в окружном направлении участком ротора - индуктором (например, над шестерней). Датчики генерируют электрические сигналы, частота которых пропорциональна частоте вращения ротора и количеству зубьев шестерен. Фазовое смещение этих сигналов в нагруженном состоянии вала относительно неподвижного состояния определяется крутильной деформацией вала и поэтому пропорционально крутящему моменту.

Для реализации этого подхода необходимо разработать средство измерения и алгоритм определения крутящего момента. Индукторы должны иметь один или несколько выступающих в радиальном направлении элементов. При прохождении выступа индуктора мимо датчика зазор между ними уменьшается, и в электрической цепи датчика возникает ЭДС, которая может быть зарегистрирована как импульс напряжения. Для определения угловой деформации вала трансмиссии необходимо регистрировать разность фаз сигналов, соответствующих двум индукторам, закрепленным на разных концах вала трансмиссии.

Задачами данной работы являются формирование модели деформируемого вала и исследование с ее использованием влияния геометрических, механических и термических факторов на значение фазового смещения и погрешность его определения.

1. Разработка твердотельной модели ИКМ

В состав ИКМ входят рессора (индуктор 1) и вал (индуктор 2), расположенные в трансмиссии (рис. 1).

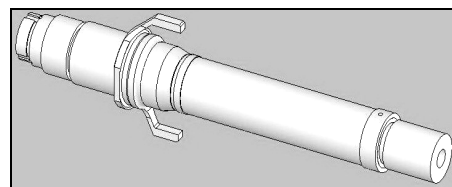


Рис. 1. Твердотельная модель ИКМ

Условия нагружения: ИКМ подвергается температурным нагрузкам ($t = -40...150^{\circ}\text{C}$) и воздействию центробежных сил. Но наиболее существенной нагрузкой является крутящий момент, пере-

дающийся рессорой. Его величина изменяется в зависимости от режима работы силовой установки

Условия закрепления: Закрепление деталей для формирования твердотельной модели выполнено в местах установки подшипников, чтобы обеспечить наибольшее соответствие с исследуемой моделью. При имитации подшипников отброшенный роликовый подшипник заменен радиальным ограничением перемещения, а шариковый – как радиальным, так и осевым. Вместо потребителя мощности использовано жесткое закрепление по шлицам.

Метод решения: Наиболее точный и эффективный метод решения данной задачи – метод конечных элементов. Для его реализации в модели детали была создана тригулярная сетка и применены граничные условия. Для наибольшей точности элементы сетки были максимально приближены к равнобедренной пирамиде.

Наиболее важной для точности расчета деформаций является величина катета треугольника, лежащего в основании пирамиды. С одной стороны, с уменьшением размера сетки растет потребность в вычислительной мощности компьютера, но с другой стороны крупная сетка приводит к значительной погрешности, которая может достигать 10 – 15%. Для определения оптимальной величины катета был проведен следующий тест.

Фрагмент модели был закреплен, как показано на рис. 2.

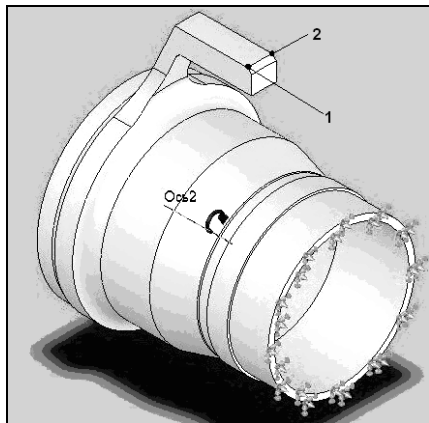


Рис. 2. Модель для определения величины катета пирамиды сетки

На него действует центробежная сила. Для определения оптимальной величины сетки было рассмотрено несколько вариантов величины катета. При этом оценивалась погрешность вычислений, которая определялась из условия, что величина перемещений у точек 1 и 2 должна быть одинакова по модулю и различна по знаку. Результаты теста приведены в табл. 1.

Как видно из результатов теста, необходимо и достаточно применить сетку с размером элемента, равным $l = 1.5$ мм.

Таблица 1

Результаты теста на величину катета пирамиды сетки

Величина катета, мм	x_1	x_2	$\delta = \frac{\Delta x}{x_{\max}} 100\%$
5	0,009186	0,009847	6,71
4	0,009201	0,009514	3,3
3	0,009619	0,009506	1,2
2	0,009817	0,009771	0,5
1	0,009864	0,009865	0,01

Но, так как величина катета размером 1.5 мм приведет к значительному количеству элементов и большому времени вычислений, был принят следующий выход из сложившейся ситуации:

- 1) для деталей модели использована сетка 5 мм;
- 2) для мелких элементов и выступов индуктора размер сетки уменьшен до 1,5 мм;
- 3) погрешность составила не более 0,3%.

Модель в сборе показана на рис. 1.

Метод определения угла закрутки: Предложенный метод определения угла закрутки заключается в определении величины радиального перемещения на выступах индуктора. Для получения качественных результатов расчеты были проведены в пяти точках обоих выступов. Величина угла закрутки определялась по следующему соотношению:

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{\Delta R_1}{R_1} - \arctan \frac{\Delta R_2}{R_2}.$$

Иллюстрация предложенного метода показана на рис. 3.

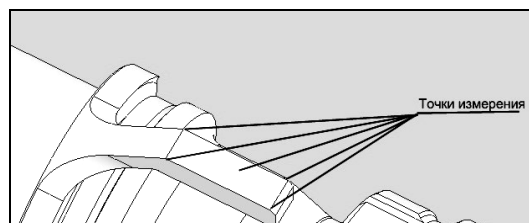


Рис. 3. Иллюстрация к методу определения угла закрутки

2. Определение влияния различных факторов на величину угла закрутки фазометрического ИКМ

2.1. Влияние частоты вращения ротора свободной турбины

Рассмотрим влияние частоты вращения на установившихся режимах в диапазоне частот от $n = 2000$ об/мин до $n = 8000$ об/мин.

Влияние температурного фактора и крутящего момента в данном случае не учитывается. Температура материала задана равной $T = 25^{\circ}\text{C}$. Среди всех сил, действующих на измеритель крутящего момента, учтем лишь центробежную силу.

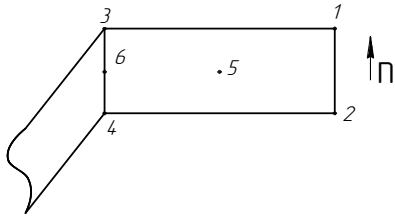


Рис. 4. Схема определения перемещений

Модель закрепления была описана ранее. Будем фиксировать только координату Y , непосредственно отвечающую за измеряемый датчиком параметр, в каждой из пяти точек. Точка 1 находится на максимальном удалении от консоли по направлению вращения, точка 2 – на максимальном удалении от консоли против направления вращения, точка 3 – на минимальном удалении от консоли по направлению вращения, точка 4 – на минимальном удалении от консоли против направления вращения, точка 5 – посередине площадки измерения (см. рис. 4).

График зависимости $\Delta\phi$ от частоты вращения приведен на рис. 5.

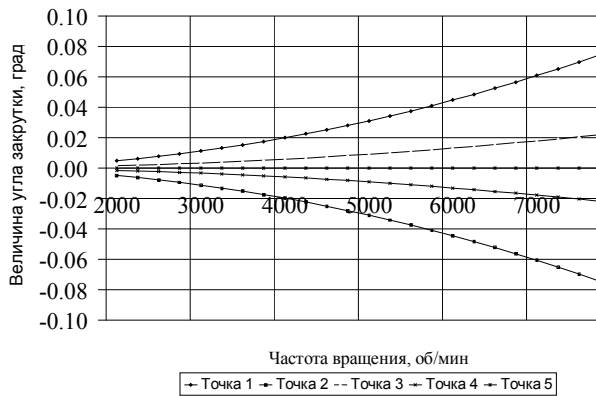


Рис. 5. Зависимость угла закрутки $\Delta\phi$ от частоты вращения ротора ИКМ

В результате анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

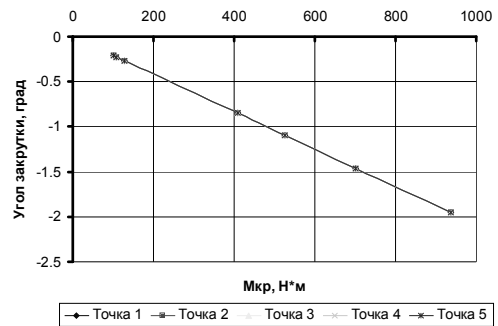
- величина угла закрутки зависит от частоты вращения;
- эта зависимость имеет нелинейный характер;
- максимальные значения угла закрутки получены в точках 1 и 2, что можно объяснить максимальными значениями радиальных перемещений в этих точках;
- наиболее устойчивой к влиянию частоты вращения является точка 5.

2.2. Влияние температурного фактора

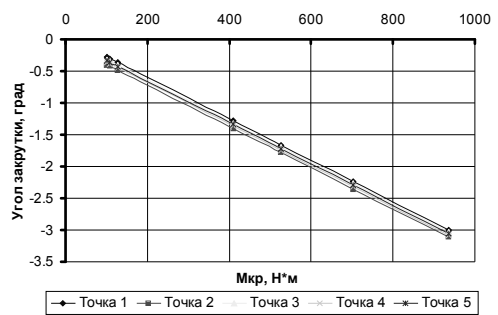
Рассмотрим влияние крутящего момента и температуры на установившихся режимах работы. Влияние частоты вращения учитывать не будем – рассмотрим неподвижный нагретый ротор, нагруженный заданным крутящим моментом.

Рабочие температуры будем задавать в диапазоне от $T = 25^{\circ}\text{C}$ до $T = 350^{\circ}\text{C}$. Среди всех нагрузок, действующих на ИКМ, учтем крутящий момент, который непосредственно характеризует передаваемую мощность.

Результаты представлены на рис. 6 и 7.

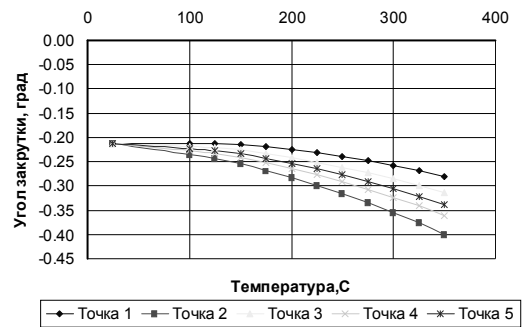


а

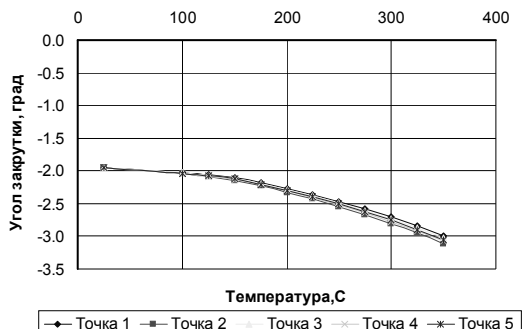


б

Рис. 6. Изменение $\Delta\phi$ в зависимости от $M_{кр}$ при $T = \text{const}$: а – $T = 25^{\circ}\text{C}$; б – $T = 350^{\circ}\text{C}$



а



б

Рис. 7. Изменение $\Delta\phi$ в зависимости от T при $M_{кр} = \text{const}$: а – режим МГ; б – взлетный режим

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- величина угла закрутки зависит от температуры и величины крутящего момента;
- зависимость угла закрутки от температуры имеет нелинейный характер, а зависимость от величины крутящего момента линейна, что объясняется упругим деформированием вала и является положительным фактором, так как в случае необходимости индивидуальной тарировки позволяет использовать один настроечный коэффициент для каждого двигателя;
- максимальная величина изменения значений $\Delta\varphi$ от температурного воздействия при изменении температуры на 325°C составляет 37...47% от максимального перемещения на конкретном режиме, что составляет от 0.1 до 0.15% на один градус;
- влияние температуры велико, поэтому ИКМ необходимо располагать в узлах с небольшим диапазоном изменения температуры;

– желательно в алгоритм определения крутящего момента ввести анализ температурного состояния узла, в котором расположен ИКМ; если нет достоверной информации для определения температуры вала и внесения соответствующих поправок, то следует хотя бы идентифицировать состояние, в котором из-за возможных существенных изменений температуры снижается достоверность вычисленного значения крутящего момента.

2.3. Влияние неточностей изготовления

Рассмотрим влияние неточности изготовления и неточности сборки. Под неточностями изготовления будем понимать следующие:

- 1) неточность углового расположения зуба индуктора;
- 2) неточность изготовления ширины и толщины зуба индуктора (площадки измерений) (рис. 8);
- 3) неточность изготовления ширины консоли, соединяющей вал с индуктором (рис. 9);
- 4) неточность диаметрального расположения площадок измерений (рис. 10, 11).

Расчет проведем на установившемся режиме с учетом влияния вращения следующим образом.

Сначала выполним расчет номинальных значений на режиме «Взлетный» с температурой $T = 350^{\circ}\text{C}$. Далее внесем изменения в каждый из исследуемых влияющих факторов и повторим расчеты, определяя влияние каждой конкретной неточности на величину угла закрутки $\Delta\varphi$.

Рассмотрев влияние неточностей изготовления и сборки, можно сделать следующие выводы:

- величина угла закрутки крайне слабо зависит от неточности изготовления, за исключением влияния толщины консолей рессоры и индуктора;
- величина угла закрутки линейно зависит от погрешности изготовления зуба индуктора;

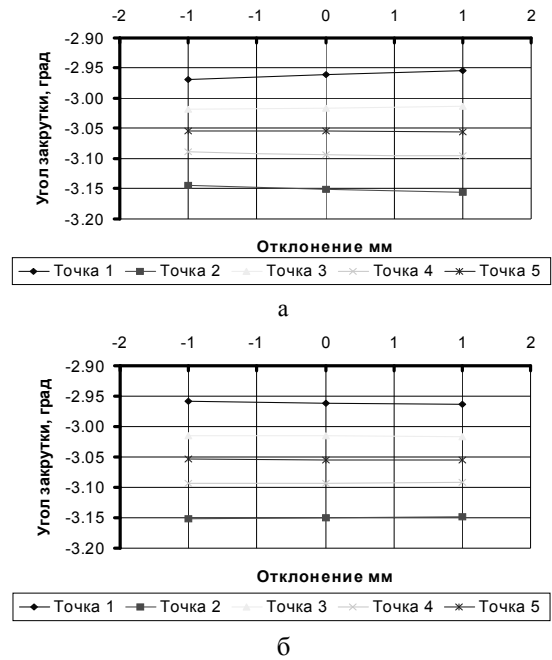


Рис. 8. Влияние неточности расположения зуба на угол закрутки $\Delta\varphi$: а – рессора; б – индуктор

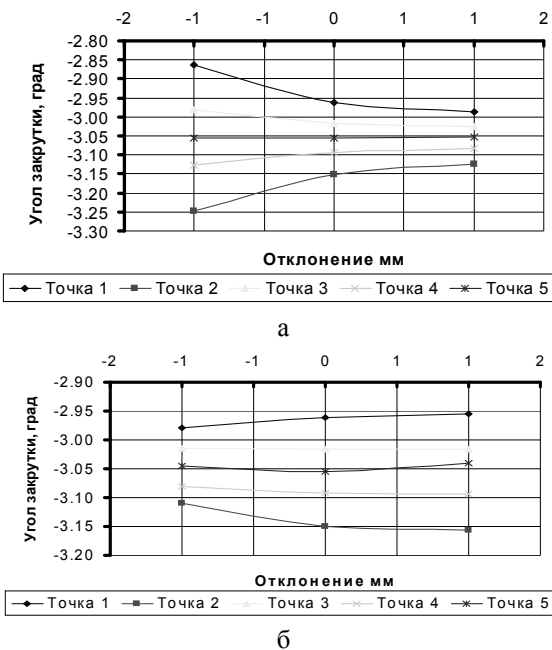


Рис. 9. Влияние неточности толщины консоли на угол закрутки $\Delta\varphi$: а – рессора; б – индуктор

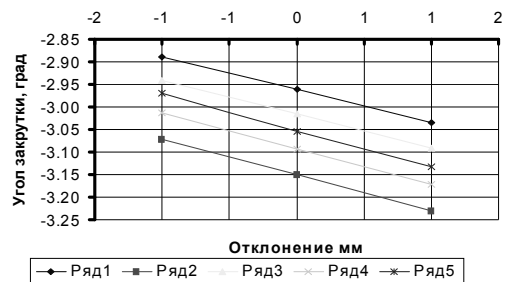


Рис. 10. Влияние неточности диаметральных размеров рессоры на угол закрутки $\Delta\varphi$

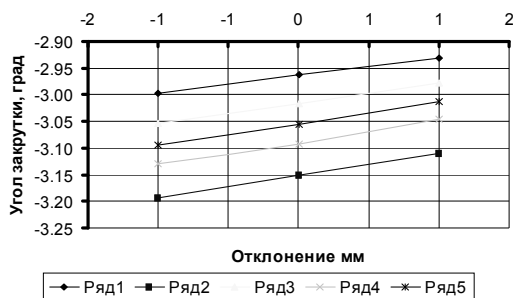


Рис. 11. Влияние неточности толщины вала рессоры на угол закрутки $\Delta\varphi$

- влияние толщины консоли выражается квадратичной зависимостью, что объясняется недостаточной жесткостью для противостояния влиянию центробежных сил;
- влияние неточности сборки имеет строго линейный характер;
- большинство неточностей изготовления можно устранить путем тарировки уже готового изделия (при условии обеспечения достаточной толщины консоли).

Выводы

Исследование показало, что наиболее существенное влияние на угол закрутки оказывает величина крутящего момента и температура. Влияние остальных факторов, таких как неточности изготовления и сборки, существенно меньше. Окончательные выводы и рекомендации следует сделать после анализа совместного действия конструктивных и технологических факторов, а также с учетом инструментальных и методических погрешностей расшифровки электрических сигналов, формируемых ИКМ.

Литература

1. *Авиационный турбовинтовой двигатель АИ-20А. ТО.* – М.: ОБОРОНГИЗ, 1962. – 128 с.
2. *Авиационный турбовинтовой двигатель НК-12. ТО.* – М.: ОБОРОНГИЗ, 1957. – 255 с.
3. *Сентяков Б.А. Применение струйного датчика в устройстве для измерения крутящего момента / Б.А. Сентяков, Г.П. Исупов // Станки и инструмент.* – 1979. – № 4. – С. 215-220.

Поступила в редакцию 12.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. кафедры теоретической и практической механики В.Н. Доценко, Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», Харьков.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ, ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ НА ПОХИБКУ ВИЗНАЧЕННЯ ОБЕРТАЛЬНОГО МОМЕНТУ ФАЗОМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ

С.В. Єпіфанов, Ф.Ф. Сіренко, Р.Л. Зеленський, Т.В. Кулик

Стаття присвячена вимірювачу обертального моменту (ВОМ) фазометричним методом. Представлена твердотільна модель ВОМ, за допомогою якої проводились дослідження впливу різноманітних конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів на похибку визначення обертального моменту. Наведено результати розрахунків по кожному фактору в очікуваному діапазоні його змінення. Проаналізовано результати, а також дано рекомендації щодо підвищення достовірності обчислювання значення обертального моменту.

Ключові слова: вимірювач обертального моменту, твердотільна модель, кут закрутки, рессора, індуктор.

THE ANALYSIS OF INFLUENCE OF CONSTRUCTIVE, TECHNOLOGICAL AND OPERATIONAL FACTORS ON THE ERROR OF THE TORSION DEFINITION TORQUE BY THE PHASE-ANGLE METERING METHOD

S.V. Yepifanov, F.F. Sirenko, R.L. Zelenskiy, T.V. Kulik

Article is devoted to a twisting moment measuring instrument (TMMI) based on the phase-angle metering method. Solid-state model of TMMI with which allows to research influences of various constructive, technological and operational factors on an error of definition of a torsion torque is presented. Results of calculations are represented for each factor, in an expected range of its change. Recommendations for increase reliability of torsion torque calculation are given.

Keywords: torsion torque measuring instrument, solid-state model, twist angle, driveshaft, inductor.

Епифанов Сергей Валерьевич – д-р. техн. наук, профессор, зав. кафедрой конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

Сиренко Феликс Феликсович – магистрант кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Зеленский Роман Леонидович – ассистент кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

Кулик Тамара Васильевна – ст. научн. сотр. кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.