

УДК 321.3.016.001.57:621.3.018.12

**Ф. Ф. СИРЕНКО<sup>1</sup>, С. В. ЕПИФАНОВ<sup>1</sup>, П. Д. ЖЕМАНЮК<sup>2</sup>, С. А. НЕЧУНАЕВ<sup>2</sup>**<sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*<sup>2</sup> *ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина*

### **СИНТЕЗ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ФАЗОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ О СВОЙСТВАХ ИЗМЕРИТЕЛЯ**

*Современные требования к безопасности эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и объему измеряемой информации для решения задач управления и диагностики ГТД приводят к необходимости модификации измерительной системы при разработке новых ГТД на базе хорошо зарекомендовавшего себя прототипа. Для турбовальных двигателей (ТВад) эта модификация включает замену гидромеханических измерителей крутящего момента (ИКМ) на бесконтактные, основанные на фазометрическом принципе измерения. При проведении таких модификаций зачастую возникает проблема ограниченного объема данных о свойствах материалов деталей ИКМ, участвующих в формировании полезного сигнала. Получение более полной информации о свойствах материалов приводит к значительным материальным и временным затратам. Поэтому в статье предложена альтернативная методика синтеза алгоритма измерения крутящего момента, основанная на параметрической идентификации свойств объекта по результатам стендовых испытаний.*

**Ключевые слова:** измеритель крутящего момента, алгоритм, точность измерений, стендовые испытания, тарирование.

#### **Введение**

Одним из основных инструментов в совершенствовании авиационных ГТД, а именно: повышении эффективности их разработки, испытаний и эксплуатации, является совершенствование их систем автоматического управления и мониторинга их технического состояния.

Решив задачу улучшения качества управления, разработчики ГТД получают возможность расширить рабочий диапазон, снизить удельный расход топлива и увеличить ресурс разрабатываемого двигателя. Помимо технических преимуществ очевидными являются также экономические преимущества, такие как: снижение затрат на стендовую и летную доводку проектируемого двигателя. Эти преимущества особо актуальны в условиях жесткой конкуренции на мировом рынке производителей авиационных ГТД.

Для решения поставленной задачи разработчики должны решить задачу достоверного и точного определения параметров двигателя, которые применяются при управлении ГТД и контроле его технического состояния. Наиболее важным интегральным параметром для двигателей непрямой реакции, используемым при мониторинге и управлении, является мощность свободной турбины (СТ) [1], которая измеряется косвенно. Для ее определения необходимо измерять частоту вращения ротора СТ и крутящий момент на валу СТ. Измерение частоты вра-

щения хорошо изучено и выполняется с очень высокой точностью. Регистрация крутящего момента представляет собой более сложную задачу, не имеющую универсального решения. Точная регистрация крутящего момента играет ключевую роль, поскольку этот параметр напрямую характеризует мощность двигателя, а также используется в системе автоматического управления для синхронизации работы нескольких двигателей силовой установки.

#### **1. Описание конструкции и работы измерителя крутящего момента**

Все большее применение в современных ГТД находят бесконтактные системы измерения крутящего момента [2, 3], вытесняя гидромеханические и другие системы. Так, на двигателе ТВ3-117ВМА-СБМ1В 4Е серии применена фазометрическая система измерения крутящего момента, принцип работы которой основан на изменении угла скручивания нагруженной рессоры относительно ненагруженного вала при изменении передаваемого крутящего момента. Конструкция механической части ИКМ выполнена следующим образом. На рессору надевается экран (рис. 1), который с одного конца (место А) напрессовывается на рессору и фиксируется штифтами, а с другого – имеет посадку с зазором. На рессору также напрессован и зафиксирован штифтами индуктор таким образом, что угол между выступами индуктора и экрана составляет  $\varphi_{20}$ . Эк-

ран и индуктор имеют по восемь выступов, расположенных равномерно по окружности.

В процессе работы под действием крутящего момента, передаваемого от двигателя, рессора с индуктором скручивается на угол, величина которого зависит от величины момента и расстояния до места приложения крутящего момента.

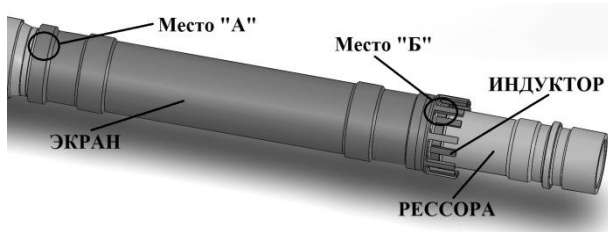


Рис. 1. Общий вид механической части ИКМ

Поскольку экран нагрузку не передает, угол его поворота относительно первоначального положения равен углу скручивания рессоры в месте А и меньше, чем угол скручивания рессоры в месте Б. Таким образом, при приложении нагрузки к рессоре угловые смещения выступов индуктора и выступов экрана имеют разные величины. Разность углового положения выступов индуктора и экрана фиксируется датчиком ИКМ. Крутящий момент определяется по изменению угла скручивания нагруженной рессоры относительно ненагруженного экрана посредством оценки временного интервала между сигналами, формируемыми при прохождении выступов индуктора и экрана в электромагнитном поле датчика ИКМ.

## 2. Алгоритм определения величины крутящего момента

При вращении выступы индуктора и экрана проходят через магнитное поле датчика; линии этого поля замыкаются частично через воздух, а частично – через металл. С ростом количества силовых линий, замыкающихся через металл, растет напряжение. Максимальное напряжение достигается при нахождении датчика и выступа в одной плоскости. При дальнейшем движении сигнал начинает спадать, что связано с магнитной разрядкой датчика.

Существует ряд известных алгоритмов определения величины крутящего момента при использовании фазометрического принципа измерения. Данные алгоритмы были исследованы на предмет их оптимальности применительно к конструкции измерителя крутящего момента двигателя ТВЗ-117ВМА-СБМ1В 4Е серии. Среди них был выбран оптимальный и адаптирован для разрабатываемого ИКМ. Таким образом, для определения величины крутящего момента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Зарегистрировать три момента времени (рис. 2):  $t_1$  – в магнитном поле датчика находится  $i$ -й выступ экрана,  $t_2$  – в магнитном поле датчика находится  $i$ -й выступ индуктора,  $t_3$  – в магнитном поле датчика находится  $(i+1)$ -й выступ экрана. В эти моменты времени величина напряжения, индуцируемого в обмотках датчика, одинакова. Это означает, что при отсутствии погрешностей в момент регистрации выступы находятся в одном и том же положении в магнитном поле датчика. Наиболее эффективно регистрировать эти моменты времени на переднем фронте сигнала по достижению положительного порогового значения напряжения (рис. 2), которое следует выбирать в области с наиболее интенсивным градиентом нарастания напряжения ( $\frac{dU}{dt} \rightarrow \max$ ).

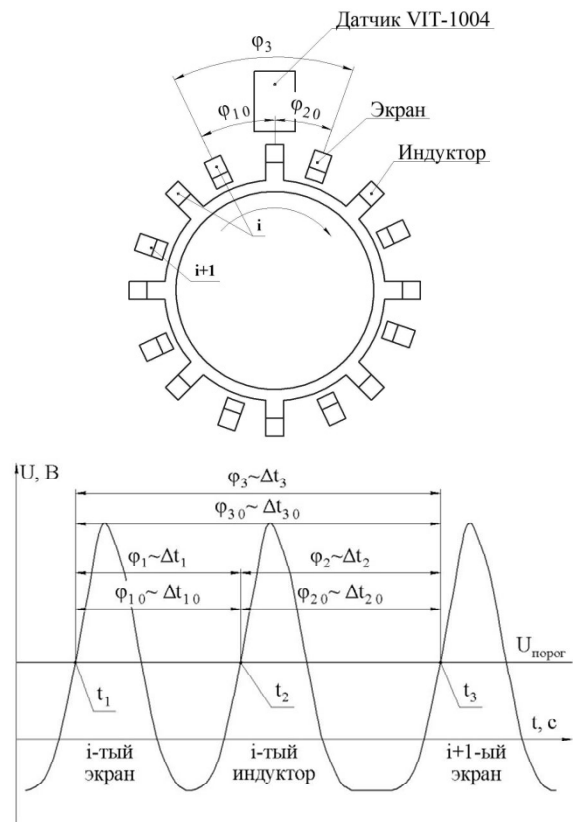


Рис. 2. Иллюстрация к алгоритму определения величины крутящего момента

2. Определить временные интервалы  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  и  $\Delta t_3$  между моментами времени  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$ :

$$\Delta t_1 = t_2 - t_1; \tag{1}$$

$$\Delta t_2 = t_3 - t_2; \tag{2}$$

$$\Delta t_3 = t_3 - t_1, \tag{3}$$

что соответствует времени между прохождением

порогового значения напряжения  $i$ -м выступом экрана и  $i$ -м выступом индуктора ( $\Delta t_1$ ),  $i$ -м выступом индуктора и  $(i+1)$ -м выступом экрана ( $\Delta t_2$ ),  $i$ -м выступом экрана и  $(i+1)$ -м выступом экрана ( $\Delta t_3$ ).

При передаче нулевого крутящего момента, отсутствии погрешностей в измерительных каналах и механических погрешностей изготовления деталей ИКМ и их сборки, эти интервалы времени пропорциональны соответствующим угловым смещениям:

$$\Delta t_{10} \rightarrow \varphi_{\text{экр}_i - \text{инд}_i} = \varphi_{10}; \quad (4)$$

$$\Delta t_{20} \rightarrow \varphi_{\text{инд}_i - \text{экр}_i} = \varphi_{20}; \quad (5)$$

$$\Delta t_{30} \rightarrow \varphi_{\text{экр}_i - \text{экр}_{i+1}} = \varphi_{30}, \quad (6)$$

где  $\varphi_{10}$  – идеальное значение угла между  $i$ -м выступом экрана и  $i$ -м выступом индуктора,  $\varphi_{20}$  – идеальное значение угла между  $i$ -м выступом индуктора и  $i+1$ -м выступом экрана,  $\varphi_{30}$  – идеальное значение угла между  $i$ -м и  $i+1$ -м выступами экрана.

3. Рассчитать текущий угол между  $i$ -м выступом индуктора и  $(i+1)$ -м выступом экрана ( $\varphi_2$ ) из пропорции

$$\frac{\varphi_2}{\Delta t_2} = \frac{\varphi_{30}}{\Delta t_3}, \quad (7)$$

откуда

$$\varphi_2 = \frac{\Delta t_2 \cdot \varphi_{30}}{\Delta t_3} = \frac{\Delta t_2 \cdot 45^\circ}{\Delta t_3}. \quad (8)$$

При ненагруженной рессоре идеального ИКМ величина угла  $\varphi_2$  составляет  $\varphi_{20}$  и увеличивается по мере увеличения передаваемого крутящего момента.

4. Определить угол скручивания рессоры:

$$\alpha = \varphi_2 - \varphi_{20}. \quad (9)$$

5. Определить величину крутящего момента по характеристике крутящего момента:

$$M_{\text{кр}} = f(\alpha, T). \quad (10)$$

6. Повторить пп. 1 – 5 для  $N$  последовательных измерений.

7. Усреднить величину крутящего момента по  $N$  измерениям:

$$M_{\text{кр усред}} = \frac{\sum_{i=1}^N M_{\text{кр} i}}{N}. \quad (11)$$

Количество измерений для осреднения оптимизируется исходя из следующих соображений. С одной стороны, по мере увеличения количества измерений увеличивается точность определения величины крутящего момента и уменьшается шум измеренной величины. С другой стороны, увеличивается время задержки формирования измеренного значения. Критическим событием, определяющим максимально возможное время задержки формирования измеренного значения, является допустимое время задержки регистрации обрыва вала.

Для корректной работы предложенного алгоритма необходимо выполнение следующего допущения о форме сигнала и требования к количеству моментов регистрации напряжения за один оборот вала свободной турбины:

– передний фронт сигнала является гладкой функцией (рис. 3), т.е. знак производной напряжения по времени на переднем фронте сигнала не изменяется;

– количество точек, фиксируемых на переднем фронте сигнала, достаточно для определения момента превышения напряжением порогового значения.

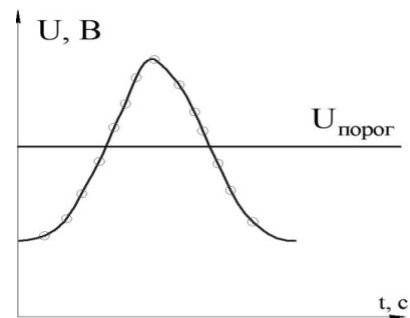


Рис. 3. Иллюстрация к допущению о форме сигнала

### 3. Основные факторы, влияющие на точность измерений

Погрешности измерений возникают по причине технологических погрешностей изготовления и сборки деталей ИКМ, а также по ряду других причин. Совокупность этих причин приводит к отклонению реальной характеристики ИКМ от эталонной.

Поэтому неотъемлемой частью разработки любого измерительного устройства является количественная оценка качества информации, получаемой с его помощью. Как правило, задача анализа погрешностей заключается в определении доверительной области измерений, в которой находится истинное значение с заданной вероятностью. В рассматриваемом случае доверительная область необходима для определения коэффициентов запаса по величине передаваемого крутящего момента, которые обеспе-

чивают заданные характеристики прочности и ресурса деталей двигателя. Здесь под коэффициентом запаса следует понимать величину, на которую должна быть снижена максимально допустимая величина передаваемого крутящего момента по причине возможной погрешности его измерения.

Рассмотрим структуру погрешности определения крутящего момента (рис. 4) и каждый источник погрешности в отдельности, получив его количественную оценку и определив наиболее значащие источники.

**Изменение свойств материала.** Основными свойствами материала, оказывающими влияние на точность определения величины крутящего момента, являются модуль упругости  $E$  и модуль упругости при сдвиге кручением  $G$ , которые целесообразно рассматривать совместно.

Значение модуля упругости  $E$  влияет на угол наклона характеристики  $M_{кр} = f(\alpha, T = \text{const})$ . Из закона Гука следует, что при ошибке в определении свойств материала, величина погрешности определения крутящего момента не зависит от величины крутящего момента и пропорциональна ошибке задания модуля упругости. По причине сложности геометрической формы деталей ИКМ, определение величины крутящего момента целесообразно проводить с применением трехмерного моделирования, результаты которого представлены на рис. 5.

Анализ полученных зависимостей  $M_{кр} = f(\alpha, T = \text{const})$  показывает, что ошибка в 1%,

при определении модуля Юнга, приводит к погрешности 0,795% в определении величины крутящего момента, откуда следует. Значение модуля упругости зависит от температуры деталей измерительного устройства, поэтому определение теплового состояния измерителя является важной задачей.

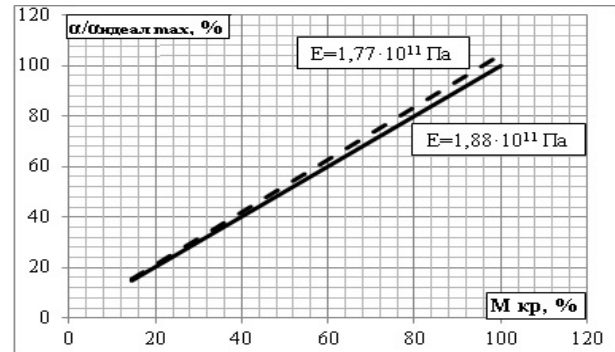


Рис. 4. Зависимости  $M_{кр} = f(\alpha, T = \text{const})$  при различных значениях модуля упругости

**Погрешности, обусловленные радиальными, окружными и осевыми температурными деформациями деталей**

Рассмотрим деформации деталей во всех направлениях. Наиболее значительными являются радиальные деформации. Количественную оценку радиальных деформаций можно провести путем анализа радиальных перемещений  $x_R$  с помощью трехмерного моделирования.



Рис. 5. Структура погрешности определения крутящего момента

На рис. 6 приведена зависимость только для выступа индуктора, т.к. радиальные перемещения выступа экрана отличаются менее чем на 0,001%.

Анализ (рис. 6) показывает, что уменьшение магнитного зазора (зазора между выступами и датчиком частоты вращения) может достигать 0,1211 мм при температуре 300°C, что составляет 12,1% при номинальном значении зазора 1 мм.

Радиальные температурные деформации приводят к изменению радиального зазора  $\delta(\Delta_{\text{зазор}})$ , что, в свою очередь, приводит к изменению динамики увеличения напряжения в обмотках датчика ИКМ, возникающего при прохождении выступов индуктора ( $t_2$ ) и экрана ( $t_1$ ) в магнитном поле датчика.

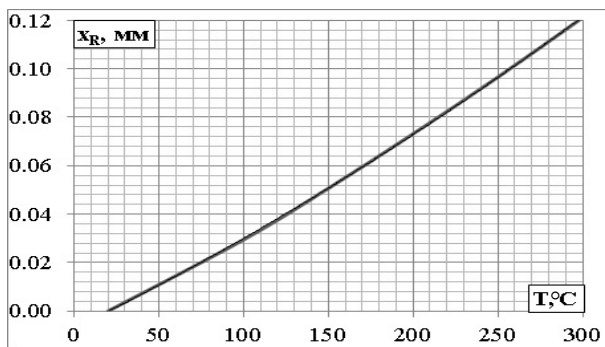


Рис. 6. Зависимость радиальных перемещений, вызванных температурными деформациями деталей ИКМ

Момент достижения порогового значения напряжения изменяется как при прохождении выступа индуктора ( $t'_2$ ), так и при прохождении выступа экрана ( $t'_1$ ,  $t'_3$ ). При этом интервалы времени  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ , а также интервалы времени  $\Delta t'_1$  и  $\Delta t'_2$ , равны. Следовательно, влиянием данного фактора на точность определения крутящего момента можно пренебречь.

Рассмотрим окружные температурные деформации. Детали ИКМ представляют собой тела вращения, которые при равномерном прогреве могут деформироваться только в радиальном направлении и не могут деформироваться в окружном, если в окружном направлении нет зазора (прорези). Т.к. выступы индуктора и рессоры являются телами вращения с прорезями, рассмотрению подлежат только их окружные деформации. Трехмерное исследование окружных перемещений показывает, что их величина не превышает 0,003%. Очевидно, что погрешностью, вызванной данным источником, можно пренебречь.

Осевые температурные деформации приводят к погрешности по причине изменения измерительной базы, которой является расстояние между плоскостями установки штифтов, соединяющих попарно вал-

рессору с индуктором, и вал-рессору с экраном. При нагреве деталей ИКМ измерительная база увеличивается на величину, которую можно определить с помощью трехмерной модели ИКМ (рис. 7).

Величину погрешности, вносимой удлинением измерительной базы, можно оценить с помощью следующей формулы:

$$\delta(\alpha) = \frac{M_{\text{кр}} \cdot \delta(1)}{G \cdot J_p}, \quad (12)$$

где  $\delta(1)$  – величина удлинения измерительной базы,  $G$  – модуль сдвига,  $J_p$  – полярный момент инерции.

Величина погрешности, обусловленной учетом данного фактора, составит  $\delta(\alpha) = 0,416\%$  в рабочем диапазоне рабочих температур.

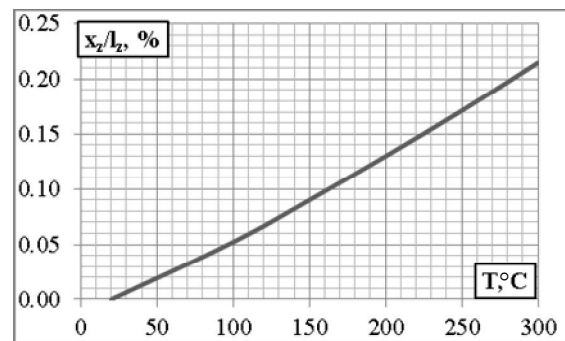


Рис. 7. Величина относительных осевых перемещений, вызванных температурными деформациями деталей ИКМ

**Погрешность, обусловленная изменением зазора между датчиком и выступами индукторов вследствие действия центробежных сил**

Так как индуктор и экран вращаются во время работы под действием центробежных сил, их выступы (измерительные площадки) деформируются и изменяют зазор между датчиком и выступами. Эти деформации могут приводить к изменению формы сигнала. В случае значительных деформаций возможна недопустимая ситуация, когда вращающиеся выступы могут касаться закрепленного в корпусе датчика.

Оценим величину радиальных перемещений, рассмотрев измерительную площадку как консольно закрепленную балку. Известно, что при работе в упругой зоне величина прогиба может быть рассчитана по следующей зависимости:

$$x_R = \frac{P \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot J}, \quad (13)$$

где  $P$  – центробежная сила массы выступа,  $l$  – длина выступа,  $E$  – модуль упругости,  $J$  – массовый момент инерции.

Величина радиальных перемещений, вызван-

ных действиями центробежных сил, мала:  $x_R = 3,727 \cdot 10^{-4}$  мм в предполагаемом рабочем диапазоне по причине малой массы выступов.

Очевидно, что величина радиальных перемещений мала и не окажет влияния на точность определения величины крутящего момента, поэтому влиянием этого фактора можно пренебречь.

#### **Угловое смещение выступов индуктора и экрана вследствие неточности изготовления отверстий под штифты**

Согласно размерам, указанным в сборочном чертеже, максимальное значение углового смещения составляет 0,65% от номинального значения угла между выступами индуктора и экрана. Это приводит к ошибке 1,3% в определении угла скручивания (удваивание погрешности связано со структурой алгоритма, который учитывает эту ошибку дважды). Очевидно, что этой ошибкой нельзя пренебречь, и каждый изготовленный индуктор нуждается в тарировке.

#### **Неточность монтажа датчика**

При монтаже датчика возникают осевое, радиальное и окружное смещения. Окружное и осевое смещения не оказывают влияния на точность определения величины крутящего момента. Радиальное смещение оказывает влияние на магнитный зазор. Диапазон изменения монтажного зазора составляет  $\pm 30\%$  от номинального значения зазора.

Погрешность монтажного зазора  $\delta(\Delta_{\text{зазор}})$  влияет на измерения аналогично радиальным тепловым деформациям. Как это было показано, при анализе влияния радиальных тепловых деформаций, погрешностью, вызванной данным источником, можно пренебречь, а, следовательно, погрешностью неточности монтажа датчика можно также пренебречь.

#### **Неточность ширины выступа**

Следствием отклонения ширины выступа от номинального значения является изменение его геометрии и массы. Изменение массы приведет к изменению центробежной силы и момента инерции выступа. Как было показано, при анализе влияния центробежных сил, изменение массы индуктора в пределах допуска на его изготовление не оказывает значительного влияния на точность определения величины угла скручивания.

Вторым фактором, влияющим на погрешности, является изменение геометрической формы выступа. Согласно полученным исходным данным, выступ (его ширина) изготавливается по 11 качеству (h11). Максимальная величина отклонения ширины составляет  $\delta = -0,075$  мм, что составляет

$\delta(b) = \frac{\delta}{b} = 1,44\%$  от номинального значения ширины

выступа. Рассмотрим наиболее неблагоприятный случай, когда все отклонение сосредоточено на стороне выступа, входящего в магнитное поле датчика. Угол между выступами индуктора и экрана изменится на 0,72%. Аналогично погрешности углового смещения выступов индуктора и экрана по причине неточности изготовления отверстий под штифты, величина погрешности удваивается, что вызвано структурой представленного выше алгоритма. Этот источник погрешностей не может быть устранен полностью, но может быть уменьшен путем увеличения количества усредняемых измерений, индивидуальной тарировкой и увеличением точности изготовления ширины выступа.

#### **Неточность радиуса наружной поверхности выступа**

Суть рассматриваемого метода измерения крутящего момента заключается в определении момента времени, в который напряжение в обмотках ДЧВ достигает порогового значения при прохождении в его магнитном поле выступа индуктора или экрана. Фиксируемые моменты времени «идеального» ИКМ (точно изготовленного с идеально определенными свойствами материала) зависят от частоты вращения и величины крутящего момента. При ненормальном значении расчетного радиуса описанные моменты времени не изменяются, т.к. ни частота вращения, ни величина крутящего момента не изменяются. Поэтому данный источник погрешностей не будет приводить к погрешностям измерений.

#### **Погрешность, вызванная неточностью длины выступа**

Допуски на длину выступов индуктора и экрана составляют 0,084 мм и 0,2 мм соответственно. Эти неточности изготовления оказывают влияние на величину центробежной силы, действующей на выступ. Как было показано выше, центробежная сила оказывает слабое влияние на угол скручивания, а, следовательно, погрешность длины выступа также не будет оказывать существенного влияния на угол скручивания.

#### **Радиусы наружной и внутренней поверхностей вала**

Изменение наружного и внутреннего радиусов вала приводит к изменению толщины измерительной базы вала-рессоры. Погрешность, вызванная изменением толщины измерительной базы, может быть оценена по следующей формуле:

$$\delta(\alpha) = \frac{M \cdot l}{G \cdot \delta(J_p)} \quad (14)$$

Для более точной оценки воспользуемся трехмерной моделью механической части измерительного устройства. Результаты моделирования представлены в табл. 1

Таблица 1  
Влияние неточности изготовления вала-рессоры на величину угла скручивания

	Угол скручивания, $\alpha$ , град	Относит. погрешность, $\delta(\alpha)$ , %
$D = D_0 - \delta(D)$ $d = d_0$	1,5339	9,66
$D = D_0$ $d = d_0$	1,3988	0
$D = D_0$ $d = d_0 + \delta(d)$	1,5003	7,26

Очевидно, что этот источник погрешности оказывает наибольшее влияние на точность определения величины крутящего момента.

#### 4. Процедура идентификации характеристики устройства в условиях стендовых испытаний

Погрешности геометрических размеров деталей, входящих в состав ИКМ, а также погрешности их сборки могут приводить к значительным ошибкам при определении величины крутящего момента, что было показано выше. Поэтому каждый ИКМ должен быть подвержен в процедуре идентификации его индивидуальной характеристики в условиях моторного стенда.

Для описания характеристики устройства была предложена следующая формула:

$$M_{кр} = A \cdot \alpha + B \cdot T + C \cdot \alpha \cdot T - D, \quad (15)$$

где  $A, B, C, D$  – коэффициенты характеристики.

Структура этой формулы выбрана исходя из соображений учета теоретической информации о природе влияния основных факторов, влияющих на точность измерений.

Все факторы можно разделить на 4 группы.

1. Группа факторов, влияющих на изменение сопротивления сечения скручиванию ( $G \cdot J_p$ ): радиусы наружной и внутренней поверхностей валов. Факторы этой группы зависят только от изменения геометрических размеров сечения и описываются коэффициентом  $A$ .

2. Группа факторов, зависящих только от температуры деталей ИКМ: окружные, осевые и радиальные деформации деталей. Влияние этой группы факторов на величину регистрируемого крутящего момента описывается коэффициентом  $B$ .

3. Группа факторов, зависящих как от темпе-

ратуры деталей ИКМ, так и от сопротивления сечения скручиванию ( $G \cdot J_p$ ): изменение свойств материала. Влияние этой группы факторов на величину регистрируемого крутящего момента описывается коэффициентом  $C$ .

4. Группа факторов, зависящих только от неточностей изготовления и сборки деталей ИКМ: угловое смещение выступов индуктора и экрана по причине неточности изготовления отверстий под штифты, неточность монтажа датчика, неточности изготовления выступов индуктора и экрана (ширины выступа, радиуса наружной поверхности выступа и длины выступа). Влияние этой группы факторов на величину регистрируемого крутящего момента описывается коэффициентом  $D$ .

Для тарирования ИКМ предложен следующий алгоритм:

1. Двигатель выводится на режим малого газа и в течение некоторого времени стендовым ИКМ регистрируются значения угла между  $i$ -м выступом индуктора и  $(i+1)$ -м выступом экрана ( $\varphi_{2k}$ ) (см. (8)), величины крутящего момента ( $M_{кр\text{стенд}k}$ ). При этом величины угла скручивания и крутящего момента усредняются для всего времени регистрации.

2. Определяется угол скручивания рессоры по следующей формуле.

$$\alpha_{\text{эксп}} = \varphi_2 - \varphi_{20}, \quad (16)$$

где  $\alpha_{\text{эксп}}$  – экспериментально определенный угол скручивания при номинальном значении угла  $\varphi_{20}$ .

1) Определяется разность между расчетным и измеренным значениями угла скручивания:

$$\delta(\alpha) = \alpha_{\text{расч}} - \alpha_{\text{эксп}}, \quad (17)$$

где расчетное значение угла скручивания  $\alpha_{\text{расч}}$  определяется с применением трехмерного моделирования

3. На основе разности  $\delta(\alpha)$ , определенной в предыдущем пункте, формируется поправка, которую необходимо внести для приведения экспериментально определенного угла скручивания к расчетному. Поправка вносится путем изменения значения угла  $\varphi_{20}$ :

$$\varphi_{20\text{тар}} = \varphi_{20} - \delta(\alpha). \quad (18)$$

Следует предусмотреть возможность аппаратно изменять величину  $\varphi_{20}$  на предполагаемую сум-

марную величину погрешности измерения ( $\varphi_{20 \text{ тар}} = \varphi_{20} \pm 3^\circ$ ).

4. Вносится поправка в значение угла  $\varphi_{20}$ . Новый  $\varphi_{20} = \varphi_{20 \text{ тар}}$ . Это непонятно: согласно формуле (18),  $\varphi_{20}$  отличается от  $\varphi_{20 \text{ тар}}$ , а затем написано, что они равны.

5. Выполняется регистрация величины крутящего момента стендовым ИКМ ( $M_{\text{кр СТЕНД}}$ ) и величины угла скручивания ( $\alpha$ ) с представленного алгоритма регистрации на трех максимальных режимах (см. п. 1 данного алгоритма). При этом величина угла скручивания должна быть равна  $\varphi_{20} = \varphi_{20 \text{ тар}}$ .

6. Выполняется параметрическая идентификация характеристики  $M_{\text{кр}} = f(\alpha, T)$  путем аналитического решения следующей системы уравнений:

$$Y \cdot X = M_{\text{кр СТЕНД}}, \quad (18)$$

$$\text{где } Y = \begin{bmatrix} \alpha_{\text{реж 1}} & T_{\text{реж 1}} & \alpha_{\text{реж 1}} \cdot T_{\text{реж 1}} & 1 \\ \alpha_{\text{реж 2}} & T_{\text{реж 2}} & \alpha_{\text{реж 2}} \cdot T_{\text{реж 2}} & 1 \\ \alpha_{\text{реж 3}} & T_{\text{реж 3}} & \alpha_{\text{реж 3}} \cdot T_{\text{реж 3}} & 1 \\ 0 & 0 & 0 \cdot 0 & 0 \end{bmatrix} -$$

основная матрица системы,

$$M_{\text{кр СТЕНД}} = \begin{bmatrix} M_{\text{кр СТЕНД КР}} \\ M_{\text{кр СТЕНД МП}} \\ M_{\text{кр СТЕНД 2,5 мин}} \\ M_{\text{кр СТЕНД 0}} \end{bmatrix} -$$

столбец свободных членов,

$$X = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} - \text{столбец решений системы.}$$

7. Коэффициенты характеристики, определенные при идентификации, вносятся в блок обработки данных ИКМ.

После выполнения параметрической идентификации характеристики ИКМ выполняется ее проверка на всех режимах для подтверждения необхо-

димого уровня точности, который, как правило, характеризуется максимальной погрешностью ( $\delta(M_{\text{кр}}) < 1\%$ ).

## Выводы

В работе поставлена и решена задача синтеза алгоритма определения величины крутящего момента с применением бесконтактного ИКМ. Данное исследование позволило синтезировать и аппаратно реализовать алгоритм определения величины крутящего момента для двигателя ТВЗ-117ВМА-СБМ1В 4Е серии.

Предложенный алгоритм реализован на базе измерительного блока, спроектированного и изготовленного специалистами НТ СКБ «Полисвет». Испытания двигателя и измерительного блока проведены на моторном стенде АО «Мотор Сич» с использованием предложенного алгоритма параметрической идентификации.

Результаты испытаний показали, что этот алгоритм обеспечивает автоматическую настройку измерителя.

По результатам испытаний установлено, что максимальная погрешность регистрируемой величины крутящего момента не превысила 1%, что соответствует требованиям к современным измерителям крутящего момента.

## Литература

1. Юламанов, Э. Ф. Разработка методов поузлового диагностирования стационарных газотурбинных газоперекачивающих агрегатов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Юламанов Эдуард Фанилевич ; Рос. гос. ун-тет нефти и газа им. И. М. Губкина. – М., 2007. – 24 с.
2. Пономарев, В. С. Бесконтактная система измерения крутящего момента [Текст] / В. С. Пономарев, И. К. Рудаков, Н. А. Яковлев [и др.] // Газотурбинные технологии. – 2003. – № 5. – С. 32–37.
3. Шанькин, С. И. Разработка алгоритма определения крутящего момента фазометрическим методом [Текст] / С. И. Шанькин, А. А. Ступаков, Ф. Ф. Сиренко [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 8(85). – С. 157–163.

Поступила в редакцию 30.05.2015, рассмотрена на редколлегии 22.06.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В. Н. Доценко, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный университет», Харьков.



**СИНТЕЗ АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ КРУТИЛЬНОГО МОМЕНТУ  
ФАЗОМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОЇ ІНФОРМАЦІЇ  
ПРО ВЛАСТИВОСТІ ВИМІРЮВАЧА**

*Ф. Ф. Сіренко, С. В. Єпіфанов, П. Д. Жеманюк, С. О. Нечунаєв*

Сучасні вимоги до безпеки експлуатації авіаційних ГТД і обсягу інформації, що вимірюється для рішення задач керування і діагностики ГТД, призводять до необхідності модифікації вимірювальної системи при розробці нових ГТД на базі прототипу, що добре себе зарекомендував. Для ТВаД ця модифікація включає заміну гідромеханічних ВКМ на безконтактні, що їх роботу засновано на фазометричному принципі вимірювання. При проведенні таких модифікацій досить часто виникає проблема обмеженого об'єму даних про властивості матеріалів деталей ВКМ, що беруть участь у формуванні корисного сигналу. Отримання більш повної інформації про властивості матеріалів призводить до значних матеріальних і часових витрат. Тому в статті запропоновано альтернативна методика синтезу алгоритму вимірювання крутильного моменту, що засновано на параметричній ідентифікації властивостей об'єкта за результатами стендових випробувань.

**Ключові слова:** вимірювач крутильного моменту, алгоритм, точність вимірювань, стендові випробування, тарування.

**SYNTHESIS TECHNIC OF A TORQUE MEASURING ALGORITHM FOR A TORQUE  
MEASURING UNIT, WHICH IMPLEMENTS THE PHASE METERING PRINCIPLE,  
IN CONDITIONS OF LIMITED INFORMATION ABOUT THE PROPERTIES OF UNIT**

*F. F. Sirenko, S. V. Yepifanov, P. D. Zhemanyuk, S. A. Nechunayev*

Measuring system of new gas turbine engine requires for a deep modification comparing to a measuring system of an engine-prototype. This is important to meet the modern requirements to safe maintenance of GTE and amount of information to be measured for solving the problems of control and diagnostics of GTE. The modification of GTE of indirect reaction inter alia concerns the substitution of old hydro-mechanical torque measuring units (TMU) by the new contactless TMU, which implement the phase metering principle. These modifications usually meet problems with getting the properties of materials TMU, parts are made of. Obtaining the required information about the properties of materials tends to drastic money and time expenses. This problem became the subject of the research. This paper deals with the alternative method of torque measuring algorithm synthesis, which is based on the parametric identification of TMU properties by the test data.

**Keywords:** torque measuring unit, algorithm, measurement accuracy, rig test, calibration.

**Сіренко Фелікс Феліксович** – канд. техн. наук, доц. каф. конструкції авіаційних двигателів, Національний аэрокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна, e-mail: sirenkofelix@mail.ru.

**Єпіфанов Сергій Валер'євич** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструкції авіаційних двигателів, Національний аэрокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна, e-mail: aedlab@gmail.com.

**Жеманюк Павел Дмитрієвич** – канд. техн. наук, технічний директор, ОАО «Мотор Сич», Запоріжжє, Україна, e-mail: motor@motorsich.com.

**Нечунаєв Сергій Александрович** – нач. групи відділа зубчатих передач, ОАО «Мотор Сич», Запоріжжє, Україна, e-mail: ugk@motorsich.com.