

УДК 621.5

**В.Ю. РУТКОВСКИЙ¹, С.В. ЕПИФАНОВ², В.Н. ХАРИТОНОВ³, В.М. СУХАНОВ¹,
В.М. ГЛУМОВ¹**¹*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, РАН, Москва, Россия*²*Национальный аэрокосмический университет им Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*³*ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина*

РАСШИРЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СТАНДАРТНОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА СИЛОВЫХ ТРАНСМИССИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ*

Решается задача расширения информационных возможностей стандартной системы измерения частоты вращения вала силовых трансмиссий энергетических установок за счет дополнительной обработки массива данных дискретного выхода двух датчиков оборотов индукционного типа, установленных на противоположных концах вала без вмешательства в конструкцию измерительной части системы. Обсуждаются вопросы повышения степени устойчивости и точности предложенного алгоритма оценивания угла упругого скручивания вала.

упругая трансмиссия ТВД, датчик частоты вращения, измерения, обработка сигналов

Введение и постановка задачи

При функционировании силовых механических систем типа «генератор – привод» являются актуальными задачи, связанные с оценкой прочностных показателей трансмиссии и мощности, передаваемой от генератора к приводу. Для решения этих задач обычно используются различные вспомогательные системы, что требует увеличения количества каналов обработки сигналов.

В данной работе указанные задачи решаются путем специальной обработки сигналов уже имеющихся в системе датчиков, т.е. без установки дополнительных измерительных устройств. В качестве объекта исследования был выбран авиационный турбовинтовой двигатель (ТВД). Для измерения частоты вращения (n_T) вала турбины, как правило, используются магнитоиндукционные датчики частоты вращения (ДЧВ) [1], выходным сигналом которых является частота переменной составляющей

ЭДС, пропорциональная n_T . Два датчика ДЧВ-1 и ДЧВ-2, установленные на противоположных концах вала, предназначены как для измерения частоты вращения вала, так и для предотвращения аварийной ситуации, связанной с его обрывом. В последнем случае стандартная измерительно-информационная система осуществляет сравнение сигнала n_{T2} с датчика ДЧВ-2, установленного в области примыкания вала к турбине, с сигналом n_{T1} датчика ДЧВ-1, установленного на конце вала, примыкающего к винтам. Условие $n_{T2} > n_{T1}$, сопутствующее обрыву вала является сигналом для аварийного отключения ТВД. Недостатком такой системы, срабатывающей лишь по свершившемуся факту обрыва, является отсутствие гарантии предотвращения аварии.

Предупредить аварию указанного типа можно путем отключения двигателя по признаку начала пластических деформаций в материале вала, т.е. на стадии, предшествующей обрыву вала турбины. Таким признаком является, в частности, увеличение угла скручивания вала при отсутствии изменения

* Работа выполнена при финансовой поддержке Отделения ЭМПИУ РАН (Пр № 18)

входного сигнала (например, координаты расхода топлива). Для формирования такого признака необходимо иметь информацию о текущем значении угла скручивания $\delta_\alpha(t)$. В работе [1] была показана возможность определения угла скручивания вала силовой трансмиссии авиационного турбовинтового двигателя (ТВД) с помощью штатной системы измерения чисел оборотов вала и контроля его целостности, содержащей два ДЧВ и использующей в качестве начальных точек отсчета пониженные значения сигналов, получаемые за счет укорочения одного из «совмещенных» [1] зубьев индукторной шестерни датчика. Одним из недостатков указанного способа определения угла скручивания вала является нарушение балансировки индукторной шестерни датчика.

В данной работе, продолжающей исследования работы [1], предлагается модифицированный алгоритм оценивания угла скручивания вала силовой трансмиссии, не требующий вмешательства в конструкцию измерительного узла находящейся в эксплуатации системы измерения частоты вращения вала свободной турбины ТВД.

1. Определение угла скручивания при отсутствии укороченных зубьев индукторных шестерен ДЧВ

Использование основных результатов работы [1] дает возможность решить задачу оценивания угла скручивания вала δ_α и без операции укорачивания зуба. Напомним, что вычислительная составляющая этих результатов включает в себя три следующие формулы [1]:

$$\bar{\tau}_j = T_1 \text{fr} \left[\frac{\eta_C}{\eta_1} - j \text{fr}[\eta_{2/1}] \right], \quad j = 0, 1, 2, 0, \dots; \quad (1)$$

$$\Delta\tau_j = \tau_j - \bar{\tau}_j, \quad (2)$$

$$\delta_\alpha = \begin{cases} \eta_1 \frac{\Delta\tau_j}{T_1} & \text{при } \Delta\tau_j > 0, \quad j = 0, 1, 2, 0, \dots; \\ \eta_1 \left(1 + \frac{\Delta\tau_j}{T_1}\right) & \text{при } \Delta\tau_j \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

где η_C, η_1, η_2 – геометрические параметры измерительного узла системы измерения частоты вращения вала (рис. 1); $\text{fr}[\cdot]$ – дробная часть выражения

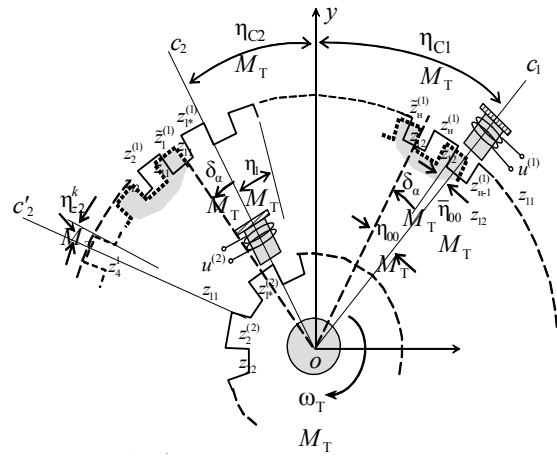


Рис. 1. Конфигурация измерительной системы

(числа), стоящего в квадратных скобках; j – метка моментов появления $0_{k2}^{(2)}$ -точек [1] опорного сигнала $u^{(2)}(t)$ датчика ДЧВ-2; T_1 – период сигнала датчика ДЧВ-1; τ_j – интервалы времени от $0_{k2}^{(2)}$ -точек до момента появления ближайших к ним на оси времени $0_{k1}^{(1)}$ -точек сигнала $u^{(1)}(t)$ датчика ДЧВ-1. При этом состояния ($u_{ki}^{(i)} = 0, \dot{u}_{ki}^{(i)} > 0$), определяющие точки пересечения графиков сигналов $u^{(1)}(t)$ и $u^{(2)}(t)$ с осью времени, названы в [1] « $0_{ki}^{(i)}$ -точками» (или «нулями») наблюдаемых процессов.

Рассмотрим представленный на рис. 2 фрагмент модельной реализации сигналов ДЧВ-1 и ДЧВ-2 при отсутствии укороченного зуба. Здесь T_{Π} – период повторения сигналов [1]. Очевидно относительное положение графиков функций $u^{(1)}(t)$ и $u^{(2)}(t)$ характеризуется определенной последовательностью чередования « $0_{ki}^{(i)}$ -точек», зависящей от конфигурации измерительного узла, т.е. от геометрических параметров его конструкции. Пусть t_0 – начальный момент наблюдения, связанный с появлением некоторой произвольной $0_{k2}^{(2)}$ -точки базового сигнала

$u^{(2)}(t)$. За локальный интервал наблюдения выберем отрезок времени $(t_k - t_0 = \Delta t > T_{\Pi})$, содержащий расширенную последовательность $\Pi' = (\tau_j)$ измерений равноотстоящих друг от друга временных отрезков $(\tau_j) = (\tau_0, \tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4)$, в которой в силу периодичности (T_{Π}) наблюдаемых процессов и, как видно из рис. 2, имеет место $\tau_3 \approx \tau_0$, $\tau_4 \approx \tau_1$.

Используя полученные результаты измерения $\tau_0, \tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$, сформируем три последовательности $\Pi_1 = (\tau_0, \tau_1, \tau_2)$, $\Pi_2 = (\tau_{02} = \tau_1, \tau_{12} = \tau_2, \tau_{22} = \tau_3)$, $\Pi_3 = (\tau_{03} = \tau_2, \tau_{13} = \tau_3, \tau_{23} = \tau_4)$, начала которых последовательно совпадают с моментами появления следующих друг за другом $0_{k_2}^{(2)}$ -точек, принадлежащих одному периоду повторения T_{Π} (рис. 2). В силу последнего, начало одной из последовательностей Π_1, Π_2 или Π_3 должно совпадать с $0_{k_2}^{(2)}$ -точкой, порождаемой одним из совмещенных зубьев индукторной шестерни ДЧВ-2, что в результате применения формальных операций (1) – (3) позволяет вычислить оценку $\hat{\delta}_\alpha$ текущего значения угла δ_α . Поскольку из-за отсутствия укороченного зуба неизвестно, какая именно из трех последовательностей начинается с $0_{k_2}^{(2)}$ -точки, то применяя

формализм (1) – (3) к каждой из последовательностей Π_1, Π_2, Π_3 отдельно, получим три несовпадающих решения $\delta_\alpha(\Pi_1), \delta_\alpha(\Pi_2), \delta_\alpha(\Pi_3)$. Так как используемый в процедуре решения упорядоченный ряд параметров (1) геометрически был определен [1] в системе координат, связанной с $0_{k_2}^{(2)}$ -точкой, то истинным может быть лишь одно из трех возможных решений $\delta_\alpha(\Pi_j)$. Два других решения являются ложными в силу неправомерности применения в процедуре их вычисления операции (2).

Проведенный анализ возможного распределения решений $\delta_\alpha(\Pi_j)$ друг относительно друга показал, что искомые решения, вычисленные по первым интервалам $\tau_0(\Pi_j)$ последовательностей Π_j , имеют вид:

$$\begin{aligned} \delta_\alpha(\Pi_1) &= \eta_1 T_1^{-1} \Delta \tau_0(\Pi_1); \\ \delta_\alpha(\Pi_2) &= \eta_1 \left(T_1^{-1} \Delta \tau_0(\Pi_2) + \text{fr}[\eta_{2/1}] \right); \\ \delta_\alpha(\Pi_3) &= \eta_1 \left(T_1^{-1} \Delta \tau_0(\Pi_3) + 2 \text{fr}[\eta_{2/1}] \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\Delta \tau_0(\Pi_j) = \tau_0(\Pi_j) - \bar{\tau}_0$, $j = \overline{1, 3}$.

Интервал между соседними решениями равен

$$d = \left| \delta_\alpha(\Pi_{j+1}) - \delta_\alpha(\Pi_j) \right| = \eta_1 \text{fr}[\eta_{2/1}], \quad (5)$$

что для приложения из [2] составляет величину $d = 9 \text{fr}[30/9] = 3^\circ$.

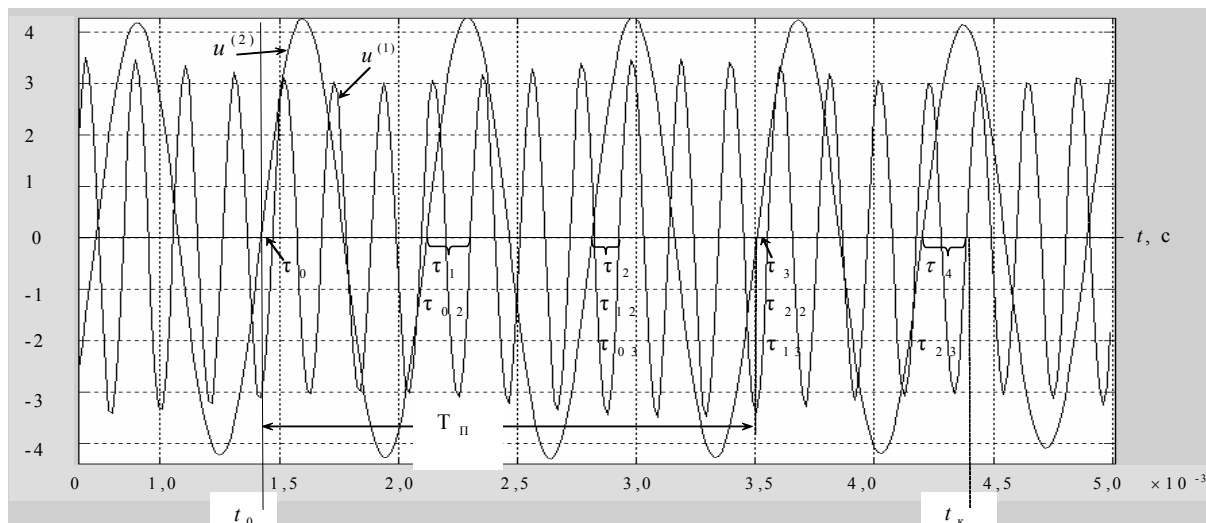


Рис. 2. Модель сигналов ДЧВ-2 и ДЧВ-1 при отсутствии укороченного зуба ($\eta_C = 67^\circ$; $n_T = 120$ об/с; $\delta_\alpha = 4^\circ$)

Численный анализ распределения решений $\delta_\alpha(\Pi_j)$ в более общем случае (с использованием измерений промежуточных интервалов $\tau_1(\Pi_j)$, $\tau_2(\Pi_j)$), осуществленный для ряда процессов, один из которых представлен на рис. 2, подтвердил справедливость результата (4) во всех рассмотренных случаях. Особо следует отметить то, что характерных признаков того, какое из найденных значений можно считать истинным, при решении задачи не найдено.

Тем не менее, выявленное свойство (4), устанавливающее факт значительного различия между решениями $\delta_\alpha(\Pi_j)$, может быть использовано далее в задаче выбора истинного значения угла скручивания вала, величина которого, как известно, пропорциональна передаваемому валом моменту M_T . Для решения этой задачи воспользуемся полученным в работе [3] результатом, устанавливающим связь между множеством режимов, задаваемых фиксированными значениями массового расхода топлива ($G_R = const$, $R = \overline{1,7}$, начиная с ЗМГ – G_1 , до взлетного – G_7) с мощностью $N_T = M_T n_T / 716,2$ и далее (через момент турбины M_T) с углом скручивания вала. Этот результат, учитывающий приведенные в [3] соотношения: $M_T = c_\omega \delta_\alpha$, $M_T = 716,2 N_T n_T^{-1}$, $N_T = k_G G_T$ ($k_G \approx 0,35$ [3]), позволяет ввести в рассмотрение приближенную зависимость

$$\delta_\alpha \approx \frac{716,2 k_G G_T}{c_\omega n_T} \text{ [рад]}, \quad (6)$$

степень неточности которой определяется приближенностью задания коэффициентов k_G , c_ω .

При ориентировочно заданных коэффициентах k_G , c_ω и неизменности числа оборотов турбины (n_T) на различных режимах функционирования ТВД [3], соотношение (6) позволяет получить грубую оценку угла скручивания вала в зависимости от реализуемого режима G_R . Сравнивая теперь формальные решения $\delta_\alpha(\Pi_j)$ (предварительно найден-

ные по результатам измерения интервалов τ_j) с приближенной оценкой $\delta_\alpha^{\sim}(G_R)$, по признаку:

$$f_j = \left| \delta_\alpha(\Pi_j) - \delta_\alpha^{\sim}(G_R) \right| = \min_j, \quad j = 0, 1, 2, \quad (7)$$

из множества решений (4) можно однозначно выбрать истинное значение угла скручивания вала δ_α^r , соответствующее текущему режиму ТВД:

$$\delta_\alpha^r = \delta_\alpha(\Pi_r), \quad r = j. \quad (8)$$

Начало первого интервала $\tau_0(\Pi_r)$ последовательности Π_r , давшей истинное решение (8), соответствует $0_{k_2}^{(2)}$ -точке, которая может быть зафиксирована как начальная точка текущего периода повторения T_{Π} . Осуществляя с этого момента отсчет последовательно возникающих $0_{k_2}^{(2)}$ -точек, нетрудно организовать слежение за появлением $0_{k_2}^{(2)}$ -точек, порождаемых прохождением под полюсом статора ДЧВ-2 "совмещенных" зубьев его индуктора. Такой способ выявления $0_{k_2}^{(2)}$ -точек позволяет далее применить для вычисления текущего значения угла δ_α предложенный в [1] простой алгоритм оценивания угла скручивания вала:

1. Фиксация момента времени t_0 , соответствующего $0_{k_2}^{(2)}$ -точке сигнала $u^{(2)}$ при прохождении «совмещенного» зуба $z_{1*}^{(2)}$ под полюсом статора ДЧВ-2, как начала отсчета для последующих измерений.
2. Фиксация ближайшего к t_0 момента времени t_1 , в который реализуется $0_k^{(1)}$ -точка сигнала $u^{(1)}$, и последующее вычисление интервала $\tau_0 = t_1 - t_0$.
3. Фиксация момента времени t_2 , соответствующего моменту реализации $0_{k+1}^{(1)}$ -точки сигнала $u^{(1)}$, и определение величины периода этого сигнала $T_1 = t_2 - t_1$. Для получения усредненного значения T_{1cp} эта операция может быть повторена на

множестве $0_{k+2}^{(1)}, 0_{k+3}^{(1)}, \dots$ -точек, принадлежащих текущему периоду повторения T_{Π} .

4. Вычисление значения $\bar{\tau}_0 = T_1 \text{fr}[\eta_C / \eta_1]$.
5. Вычисление разности $\Delta\tau_0 = \tau_0 - \bar{\tau}_0$, включая операцию определения знака $\Delta\tau_0$.
6. Вычисление текущего значения угла упругого скручивания вала по формуле

$$\delta_\alpha = \begin{cases} \eta_1 \frac{\Delta\tau_0}{T_1} & \text{при } \Delta\tau_0 > 0; \\ \eta_1 \left(1 + \frac{\Delta\tau_0}{T_1}\right) & \text{при } \Delta\tau_0 \leq 0. \end{cases}$$

2. Компьютерная реализация модифицированного алгоритма оценивания угла скручивания вала в среде системы MATLAB-Simulink

В обобщенном виде блок-схема системы, реализующей модифицированный алгоритм вычисления оценки $\hat{\delta}_\alpha$, изображена на рис. 3.

В основу построения модели расширенной системы измерения частоты вращения вала, содержащей два штатных датчика оборотов (ДЧВ-1 и ДЧВ-2), были положены введенные в [1] уравнения их сигналов $u^{(2)} = A_2 \sin z^2 \omega_T t$ и $u^{(1)} = A_1 \sin(z^1 \omega_T t - \varphi_{00})$, реализация которых в среде Simulink потребовала формирования двух генераторов гармонических колебаний с изменяющейся амплитудой и с регулируемой фазой одного из них. Частота дискретизации сигналов ДЧВ (64 КГц) обеспечивается выбором шага интегрирования при моделировании, равным $1,6 \cdot 10^{-5}$ с.

Реализация координированного функционирования системы оценивания, представленной на рис. 3

блок-схемой, осуществляется управляющей программой моделирования в виде файла-сценария в среде MATLAB:

```
clear; dmms;
dts=1/nt; dalg=zeros(1,4); talg=dalg;
for js=1:600
    ts1=(js-1)*dts; ts2=ts1+dts;
    sim('mmds',[ts1 ts2]);
    ufi=u1240;
    if js==1
        ufi1=ufi;daxal;
    end
    daxap;
    dalg=[dalg dalc];
    talg=[talg tal];
end
% ===== graphics =====
dalg=[0 dalg]; talg=[0 talg];
stairs(talg,dalg),grid.
```

Базовые параметры измерительной системы соответствуют рассматриваемому в работе приложению ($z^1 = 40$, $z^2 = 12$). Считается, что выполнено условие «нормальной» сборки, обеспечивающее наличие «совмещенных» зубьев индукторных шестерен датчиков, и известен угол раствора осей статорных полюсов $\eta_C = 67^\circ$. Полученные в процессе реализации модельных режимов массивы данных соответствующих интервалов наблюдения поступают в блок «Алгоритм вычисления $\hat{\delta}_\alpha$ » (рис. 3), который формирует оценку угла скручивания, выдаваемую в конце каждого интервала наблюдения, совпадающего с периодом повторения T_{Π} .

Для примера на рис. 4 приведен процесс оценивания угла скручивания вала на последовательности режимов работы двигателя («0,4 N», «M_{кр}», «ВЗЛ») [3], связанных между собой переходными процессами, вызванными плавным изменением управляющей координаты G_T .

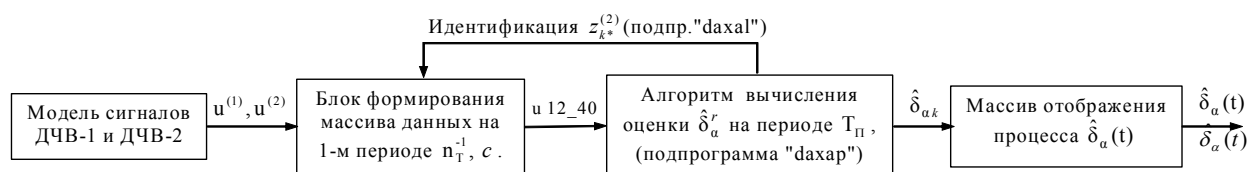


Рис. 3. Блок-схема алгоритма вычисления угла скручивания вала при отсутствии укороченного зуба

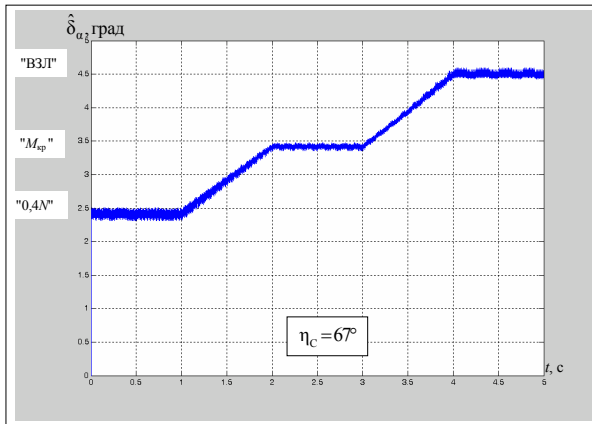


Рис. 4. Моделирование процесса оценивания угла скручивания вала с учетом шума измерения $\delta_\xi = 0,1$

В данном случае используется описанная в [1] методика оценивания δ_α , содержащая процедуру идентификации «совмещенного» зуба ($0_k^{(2)}$ -точки сигнала $u^{(2)}$). Оценивание угла $\delta_\alpha(t)$ проводилось при наличии шума измерений (с.к.о. $\sigma_\xi = 0,1$). Исследования показали, что при увеличении интенсивности шума ($\sigma_\xi > 0,1$) в малой окрестности $0_k^{(2)}$ -точек сигнала могут возникать дополнительные («ложные») нулевые точки, вызывающие локальную неустойчивость алгоритма оценивания. Для расширения области устойчивости в этом случае необходима фильтрация шумов, либо применение более защищенных от помех способов индикации $0_k^{(2)}$ -точек сигналов ДЧВ.

3. Оценка угла $\delta_\alpha(t)$ по результатам стендовых испытаний ряда основных режимов работы ТВД

Предложенная процедура оценивания угла скручивания вала с использованием измерительной системы, не имеющей укороченного зуба индукторной шестерни, была применена для обработки массивов дискретных (64 КГц) значений реальных сигналов двух датчиков оборотов, записанных в различных режимах работы двигателя («ЗМГ», «0.4N», «0.7N», «М_р», «МП», «ВЗЛ») в процессе эксперимента, осуществленного в ЗМКБ «Прогресс» (г. Запоро-

жье). Из-за отсутствия требуемой точности знания углов установки датчиков ($\eta_{C1} \approx 30 \div 35^\circ$, $\eta_{C2} \approx 35 \div 38^\circ$) на начальной стадии реализации процедуры было принято допущение о том, что в режиме «ЗМГ» в ориентировочно известном диапазоне углов скручивания ($1^\circ \div 6,5^\circ$) реализуется минимальное значение $\delta_\alpha = 1^\circ$, что позволило уточнить величину углового смещения осей датчиков друг относительно друга $\eta_C = \eta_{C1} + \eta_{C2} \approx 65^\circ$.

Далее имеющиеся массивы данных, содержащиеся в файловых папках с наименованиями выделенных режимов работы двигателя, последовательно использовались как входные массивы алгоритма оценивания угла скручивания вала с помощью измерительной системы без укороченного зуба. Результаты обработки этих массивов предложенным в работе методом представлены на рис. 5 в виде графика дискретных значений угла δ_α , изменяющихся при переходе от одного режима ТВД к другому.

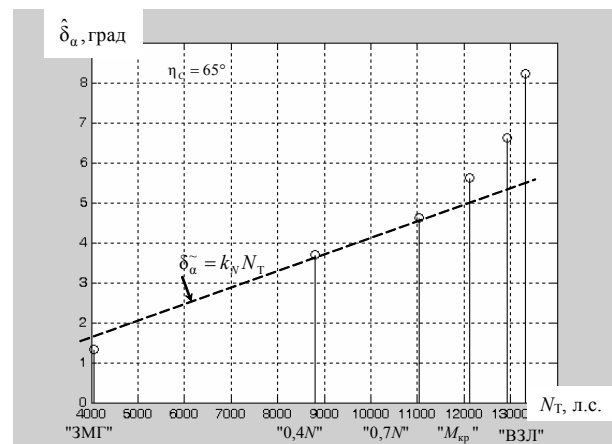


Рис. 5. Зависимость величины угла δ_α от режима двигателя, полученная на основе обработки массивов экспериментальных данных

Режимы, начиная с малого газа («ЗМГ») до взлетного («ВЗЛ»), распределены вдоль оси абсцисс в соответствии с величиной мощности ($[N_T] = \text{л.с.}$), снимаемой с турбины в том или ином режиме.

Пунктирной линией на рис. 5 введен полученный на основании соотношения (6) график приближенной оценки $\delta_\alpha \approx k_N N_T$, используемой в ал-

горитме оценивания без укороченного зуба для выбора истинного решения δ_α^r по критерию (7). Коэффициент k_N , вычисленный в системе СИ (при ориентировочно заданном в [3] коэффициенте крутильной жесткости $c_\omega \approx 1,4 \cdot 10^5$, Н·м/рад, $n_T \approx 120$ об/с, ($\omega_T = 2\pi n_T$), $[N_T] = \text{Н} \cdot \text{м}/\text{с}$), составил величину $k_N = 3,9 \cdot 10^{-4}$.

Наблюдаемый на рис. 5 нелинейный характер дискретной зависимости оценок $\hat{\delta}_\alpha$ от режима работы двигателя объясняется изменением числа оборотов двигателя при переходе от одного режима к другому. В частности, при обработке массивов данных было выявлено, что режиму «ЗМГ» соответствует (\rightarrow) $n_T = 101$ об/с, режиму «0.4N» $\rightarrow n_T = 115$ об/с, на взлетном режиме («ВЗЛ») $\rightarrow n_T = 137$ об/с.

Заключение

Рассмотренный алгоритм оценивания угла скручивания вала является относительно сложным в вычислительном плане, требует введения дополнительной процедуры, связанной с идентификацией начальной $0_{k_2}^{(2)}$ -точки отсчета, и принятия специальных мер слежения за моментами появления этих точек путем счета последовательно возникающих промежуточных $0_k^{(2)}$ -точек. Возможный сбой в счете, например, из-за появления ложного нуля при наличии шума приводит к потере связи с начальной $0_{k_2}^{(2)}$ -точкой и, соответственно, к нарушению работы алгоритма. Повысить устойчивость функционирования алгоритма в указанном отношении можно за счет регулярного воспроизведения процедуры идентификации $0_{k_2}^{(2)}$ -точки на каждом интервале наблюдения.

Для обеспечения нормального функционирования обоих алгоритмов оценивания является необхо-

димость знания угловых координат установки датчиков ДЧВ-1 и ДЧВ-2 на корпусе двигателя, задающих параметр $\eta_C = \eta_{C1} + \eta_{C2}$. Также достаточно важным требованием является выполнение введенного в начальной части работы [1] условия «нормальной» сборки индукторных шестерен на вале свободной турбины.

Точность оценивания угла скручивания вала с помощью предложенного алгоритма зависит в основном от точности задания параметра η_C , от точности определения моментов реализации $0_k^{(i)}$ -точек сигналов ДЧВ.

Литература

1. Новый подход к определению угла скручивания вала трансмиссии ТВД для целей идентификации момента турбины и повышения степени безопасности ее функционирования / В.Ю. Рутковский, С.В. Епифанов, В.Н. Харитонов, В.М. Суханов, В.М. Глумов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 10/26. – С. 125-134.
2. Муравченко О.Ф., Хусточка А.Н. Поэлементная математическая модель турбовинтовентиляторного двигателя Д-27 // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2003. – № 6 (41). – С. 61-64.
3. Суханов В.М., Глумов В.М., Епифанов С.В., Куликов Г.Г. Исследование работоспособности алгоритмов идентификации момента свободной турбины в установившихся и переходных режимах ТВД на компьютерном имитаторе полунатурного стенда // *Вестник двигателестроения*. – 2004. – № 2. – С. 177-183.

Поступила в редакцию 22.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.И. Кузнецов, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.