

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», Харьков, Украина*³*ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина*

НОВЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ УГЛА СКРУЧИВАНИЯ ВАЛА ТРАНСМИССИИ ТВД ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОМЕНТА ТУРБИНЫ И ПОВЫШЕНИЯ СТЕПЕНИ БЕЗОПАСНОСТИ ЕЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Предложен новый алгоритм оценивания угла упругого скручивания вала с помощью расширенной системы измерения чисел оборотов, содержащей два индукционных датчика частоты вращения (ДЧВ), установленных на противоположных концах контролируемого вала. Данный алгоритм, предусматривающий введение метки (укорочения) одного из зубьев индукторной шестерни базового ДЧВ, является простым в части реализации вычислительных процедур и надежным по причине высокой степени защищенности начала отсчета от любого рода помех. Приведен пример вычисления оценки угла скручивания на основе анализа сигналов ДЧВ для крейсерского режима ТВД.

упругая трансмиссия ТВД, индукционный датчик оборотов, измерения и идентификация

Введение и постановка задачи¹

В процессе выработки жизненного цикла механических систем «генератор – привод» всегда актуальны задачи, связанные с оценкой прочностных показателей трансмиссии и мощности, передаваемой от генератора к приводу. Для решения этих задач обычно используются различные, автономно функционирующие системы. Как следствие приходится использовать разнотипные чувствительные элементы и увеличивать количество каналов обработки сигналов.

Целью данной работы является попытка решения указанных задач 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 турби-

ны, в рассматриваемом случае, используются магнитоиндукционные датчики частоты вращения (ДЧВ) [1], выходным сигналом которых является частота переменной составляющей ЭДС, пропорциональная n_T . ДЧВ-1 и ДЧВ-2, установленные на противоположных концах вала, являются идентичными и предназначены как для измерения частоты вращения вала, так и для предотвращения аварийной ситуации, связанной с его обрывом. ДЧВ-2 установлен в области примыкания вала к турбине. Указанная информационная система осуществляет сравнение сигнала n_{T2} с некоторой жестко заданной величиной n_{T*} . Условие $n_{T2} > n_{T*}$, при обрыве вала является сигналом для аварийного отключения ТВД. Недостатками такой системы, срабатывающей лишь по свершившемуся факту обрыва, являются невозможность предотвращения аварии и отсутствие возможности снижения степени разрушения ТВД.

Предупредить аварию указанного типа можно понижением режима или полным отключением дви-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Пр № 03-01-00062) и Отд. ЭММПУ РАН (Пр № 18)

гателя 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 входного сигнала (например, координаты расхода топлива). Для формирования такого признака необходимо иметь информацию о текущем значении угла скручивания $\delta_\alpha(t)$. Одновременно эта информация может служить основой для идентификации величины момента M_T , передаваемого от турбины к винтам ТВД [2].

В данной работе на примере длинномерного вала свободной турбины ТВД рассматривается возможность оценивания угла его скручивания $\delta_\alpha(t)$ с помощью дополнительной обработки сигналов двух стандартных датчиков частоты вращения, имеющих в штатной системе контроля оборотов вала и его целостности в составе трансмиссии ТВД.

1. Некоторые особенности измерительной системы и предварительные определения

В используемом типе датчика частоты вращения магнитное поле статорного полюса с размещенной на нем обмоткой периодически изменяется, увеличиваясь при прохождении под ним очередного зуба (полюса) напессованной на вал индукторной шестерни.

По конструктивным соображениям, связанным с изменяющимся вдоль вала профилем корпуса ТВД, диаметры индукторных шестерен датчиков, расположенных на противоположных концах вала, являются различными.

На рис. 1 представлен фрагмент измерительной системы ДЧВ, включающий в себя статорный полюс с обмоткой и индукторную шестерню (частично), напессованную на вал, числа оборотов которого n_T [об/с] подлежат измерению.

Пусть $z^{(i)}$ ($i=1,2$) – i -я индукторная шестерня, число зубьев (полюсов) которой равно z^i . При анализе получаемых в работе результатов будем считать, что в конкретном приложении число зубьев шестерня ДЧВ-1 равно $z^1 = 40$, а шестерня ДЧВ-2 имеет $z^2 = 12$ зубьев. В силу идентичности обоих датчиков ДЧВ геометрические размеры $a_c^{(i)}$ их статорных полюсов одинаковы (рис. 1). Ширина зуба шестерни равна ширине паза на делительном диаметре.

"Шагом" индукторной шестерни назовем угловой размер пары "зуб-паз", определенный в виде $\eta_i = 2\eta_{zi}$, где $\eta_{zi} \approx \pi/z^i$ – угловые размеры зубьев шестерни $z^{(i)}$. При заданных числах z^i радиусы внешних окружностей шестерен определяются по формуле $r_{zi} = a_i z^i / \pi$. Остальные обозначения, имеющиеся на рис. 1, разъясняются по ходу изложения.

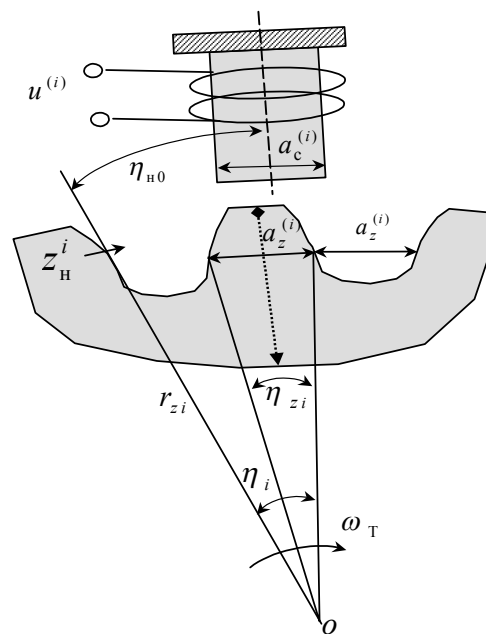


Рис. 1. Геометрия полюсов статора и индукторной шестерни i -го ДЧВ

Введем условие "нормальной" сборки индукторных шестерен на вале свободной турбины:

На каждой шестерне нанесем по одной условной "↓"-метке в виде линии (стрелка на рис. 1), совпадающей, например, с осью какого-либо зуба. При посадке индукторных шестерен на вал эти метки должны быть совмещены с продольной меткой (линией вала "0_в"), совпадающей с любой из образующих цилиндрической поверхности вала (рис. 2).

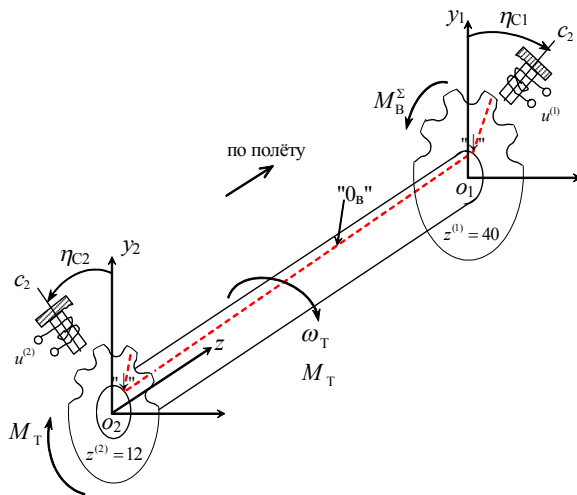


Рис. 2. Схема размещения ДЧВ на валу СТ

Выполнение условия "нормальной" сборки гарантирует наличие в измерительном узле, по крайней мере, одной пары "совмещенных" зубьев, т.е. таких зубьев двух шестерен, оси которых в проекции одной шестерни на другую совпадают. В частности, для случая $z^1 = 40$, $z^2 = 12$, и при выполнении условия "нормальной" сборки конфигурация такова, что ось каждого 4-го зуба шестерни $z^{(2)}$ (начиная с первого ($z_{1*}^{(2)}$), отмеченного "↓"-меткой) совпадает с осью каждого 11-го зуба шестерни $z^{(1)}$.

Узел, состоящий из вала и напесованных на его концы индукторных шестерен $z^{(i)}$ двух ДЧВ, назовем измерительным узлом расширенной системы измерения частоты вращения вала (рис. 2).

Под конфигурацией измерительного узла будем понимать геометрический образ (проекцию на общую плоскость) двух упорядоченных (по номерам

зубьев) множеств $z^{(1)} = (z_{k_1}^{(1)})$, $k_1 = 1, 2, \dots, z^1$ и $z^{(2)} = (z_{k_2}^{(2)})$, $k_2 = 1, 2, \dots, z^2$, элементы (зубья) которых расположены друг относительно друга вполне определенным образом, зависящим как от величины $z^2 / z^1 = \eta_2 / \eta_1$, так и от относительного сдвига условно первых (помеченных) зубьев $z_1^{(1)}$ и $z_1^{(2)}$.

Введенные на рис. 2 углы η_{C1} и η_{C2} представляют собой координаты положения осей статорных полюсов ДЧВ-1 и ДЧВ-2, отсчитываемых от связанных с корпусом ТВД коллинеарных осей $o_i y_i$.

"Набегающим" полюсом (в рассматриваемый момент времени t_0 и при заданном направлении вращения вала) условимся называть ближайший к статорному полюсу зуб индукторной шестерни (отмеченный на рис. 1 как z_n^i), угловое отклонение $\eta_{n0} = \eta_n(t_0)$ передней кромки которого от оси статора больше нуля, т.е. $\eta_n(t_0) \geq 0$.

В полюсных обмотках статоров при прохождении под ними индукторных полюсов наводятся ЭДС, переменные составляющие которых можно представить в виде синусоидальных сигналов $u^{(1)}(t)$ и $u^{(2)}(t)$ вида [1]:

$$u^{(i)} = A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) + \xi_i, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где $A_i = k_i \omega_i$ – амплитуда; $\omega_i = z^i \omega_T$ – несущая частота сигнала ДЧВ; $\omega_T = \dot{\alpha}_T$ – угловая скорость вращения вала турбины; φ_i – фаза; ξ_i – шумы измерений. Выбирая в качестве опорного "низкочастотный" сигнал $u^{(2)}$, снимаемый с выхода ДЧВ-2, уравнения (1) можно переписать в виде

$$u^{(2)} = A_2 \sin z^2 \omega_T t + (\xi_2); \quad (2)$$

$$u^{(1)} = A_1 \sin(z^1 \omega_T t - \varphi_{00}) + (\xi_1), \quad (3)$$

где $\varphi_{00} = \bar{\varphi}_{00} + \tilde{\varphi}$ – фазовый сдвиг сигнала $u^{(1)}$ относительно $u^{(2)}$; $\tilde{\varphi}$ – переменная компонента фа-

зового сдвига сигналов, зависящая от угла скручивания упругого вала $\delta_\alpha(t)$; $\overline{\varphi}_{00} = const$ – статическая ("жесткая") компонента фазового сдвига, зависящая от геометрических параметров ($\eta_{C1}, \eta_{C2}, z^1, z^2$) элементов измерительной системы ДЧВ-1 и ДЧВ-2.

Взятые в скобки шумы ξ_i пока не принимаются во внимание. Кроме того, предполагается, что задача формирования импульсов δ_0 , соответствующих нулевым значениям сигналов $u^{(i)}(t)$ решена, причем

$$\text{sign } \delta_0 = \begin{cases} +1 & u^{(i)} = 0, \dot{u}^{(i)} > 0; \\ -1 & u^{(i)} = 0, \dot{u}^{(i)} < 0. \end{cases}$$

2. Определение фазового сдвига сигналов для случая жесткого вала ($c_\omega = \infty$)

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, назовем " $0_{ki}^{(i)}$ -точками" (или "нулями") наблюдаемых процессов.

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.

Количественно характер взаиморасположения (смещения) графиков сигналов может быть описан периодической (с периодом T_Π) последовательно равноотстоящих друг от друга временных отрезков $\Pi = (\tau_j), j \in (k_2 - 1) = 0, 1, 2, \dots, z_\Pi^{(2)}$, определяющих смещения $0_{k1}^{(1)}$ -точек относительно соответствующих $0_{k2}^{(2)}$ -точек базового сигнала $u^{(2)}(t)$ (рис.

3). В самом общем случае период T_Π совпадает с периодом вращения вала ($T_\Pi = 2\pi\omega_T^{-1}$).

Для рассматриваемой в работе конкретной конфигурации измерительного узла ($z^1 = 40$ и $z^2 = 12$) период повторения $T_{\Pi1} = T_{\Pi2} = \pi(2\omega_T)^{-1}$ последовательности $\Pi = (\tau_j)$ определяется наличием четырех пар "совмещенных" полюсов индукторных шестерен ДЧВ. В силу этого T_Π равен трем периодам базового сигнала $u^{(2)}(t)$, укладываемым на отрезке времени между моментами прохождения под статорным полюсом ДЧВ-2 двух следующих один за другим "совмещенных" зубьев. При этом $j \in (k_2 - 1) = 0, 1, 2, 0, \dots$ так, что $\Pi = (\overline{\tau}_0, \overline{\tau}_1, \overline{\tau}_2)$. Надстрочная черта ($\overline{\tau}_j$) отмечает, что указанные параметры определены для случая жесткого вала.

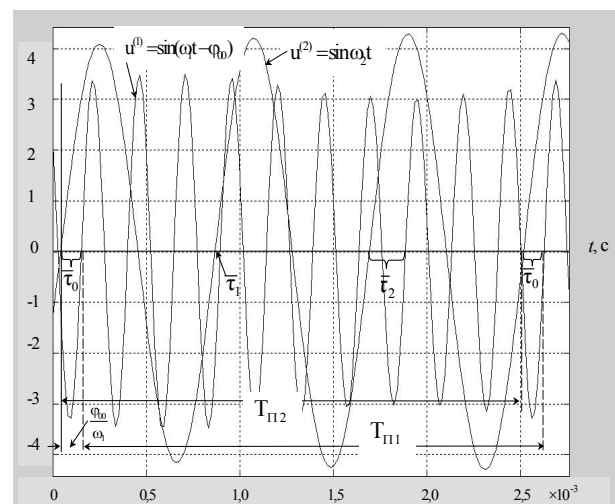


Рис. 3. Сигналы ДЧВ-2 и ДЧВ-1 для случая жесткого вала. ($\eta_C = 67^\circ, n_T = 101 \text{ об/с}$)

Таким образом, нулевые точки $0_{k2}^{(2)}$ базового сигнала $u^{(2)}(t)$, принадлежащие любому из периодов повторения T_Π , примем в качестве опорных точек, относительно которых будем осуществлять замеры промежутков времени τ_j до появления ближайших к ним на оси времени $0_{k1}^{(1)}$ -точек сигнала

ла $u^{(1)}(t)$. При этом фазовые смещения нулевых точек сигнала $u^{(1)}(t)$ относительно соответствующих нулей сигнала $u^{(2)}(t)$ вычисляются по формуле

$$\bar{\varphi}_{0j} = \bar{\tau}_j \omega_1, [\text{рад}]. \quad (4)$$

Определение 1.

Фазу $\bar{\varphi}_{00} = \bar{\tau}_0 \omega_1$, определенную в $0_{k^*}^{(2)}$ -точке, формируемой "совмещенным" полюсом индуктора ДЧВ-2, можно определить как фазу сдвига фрагмента ($T_{\Pi 1}$) сигнала $u^{(1)}(t \in T_{\Pi 1})$ относительно соответствующего фрагмента ($T_{\Pi 2}$) базового сигнала $u^{(2)}(t \in T_{\Pi 2})$, $T_{\Pi 1} = T_{\Pi 2}$.

Данное определение сохраняет силу и при рассмотрении сдвига сигналов двух датчиков при учете упругости вала.

Статическую компоненту $\bar{\varphi}_{0j}$ теоретически можно определить на основании анализа представленной на рис. 4 конфигурации измерительной системы в таком ее состоянии, при котором передняя кромка набегающего зуба $z_{1*}^{(2)}$ ("совмещенного" с $z_{1*}^{(1)}$), совпав с осью oc_2 полюса статора ДЧВ-2, определяет момент появления нулевого значения выходного сигнала $u^{(2)} = 0, \dot{u}^{(2)} > 0$.

Этому состоянию измерительной части "базового" датчика ДЧВ-2 соответствует угловое отклонение $\bar{\eta}_{00}$ передней кромки "набегающего" полюса $z_H^{(1)}$ ДЧВ-1 от оси oc_1 его статорного полюса.

Очевидно, что интервал времени, необходимый для перемещения полюса $z_H^{(1)}$ на угол $\bar{\eta}_{00}$, при котором реализуется $0_H^{(1)}$ -точка сигнала $u^{(1)}(t)$ ($u_1 = 0, \dot{u}_1 > 0$), составляет величину

$$\bar{\tau}_0 = \bar{\eta}_{00} \omega_T^{-1}. \quad (5)$$

Принимая в (4) $j = 0$ и $\omega_1 = z^1 \omega_T$ и сравнивая результат с (5), получим уравнение связи между фазовым сдвигом сигналов $u^{(1)}(t)$ и $u^{(2)}(t)$ и углом поворота измерительного узла

$$\bar{\varphi}_{00} = z^1 \bar{\eta}_{00}. \quad (6)$$

Понятно, что справедливо и более общее уравнение этой связи для промежуточных $0_k^{(2)}$ -точек

$$\bar{\varphi}_{0j} = z^1 \bar{\eta}_{0j}. \quad (7)$$

Обозначим далее:

$\eta_C = \eta_{C1} + \eta_{C2}$ – угловой раствор осей статоров; $\text{in} [\eta_C / \eta_1]$ – целое число "шагов" ($\eta_1 = 2\eta_{z1}$) шестерни $z_1^{(1)}$, укладываемое в раствор η_C .

Тогда, как видно из рис. 4, угол $\bar{\eta}_{00}$ можно определить по следующей формуле

$$\bar{\eta}_{00} = \eta_C - \eta_1 \text{in} [\eta_C / \eta_1] = \eta_1 \text{fr} [\eta_C / \eta_1] \geq 0. \quad (8)$$

Анализ конфигурации измерительной части системы на этом и следующем шагах поворота позволяет получить общее выражение для углов $\bar{\eta}_{0j}$, определяющих фазовые сдвиги сигнала $u^{(1)}$ относительно $u^{(2)}$ для всех $0_{k2}^{(2)}$ -точек на любом из периодов повторения T_{Π} :

$$\begin{aligned} \bar{\eta}_{0j} &= \eta_C - \left\{ j \text{fr} [\eta_{2/1}] + \text{in} \left[\frac{\eta_C - j \text{fr} [\eta_{2/1}] \eta_1}{\eta_1} \right] \right\} \eta_1 = \\ &= \eta_1 \text{fr} [(\eta_C / \eta_1) - j \text{fr} [\eta_{2/1}]], \quad j \square (k_2 - 1) = 0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (9)$$

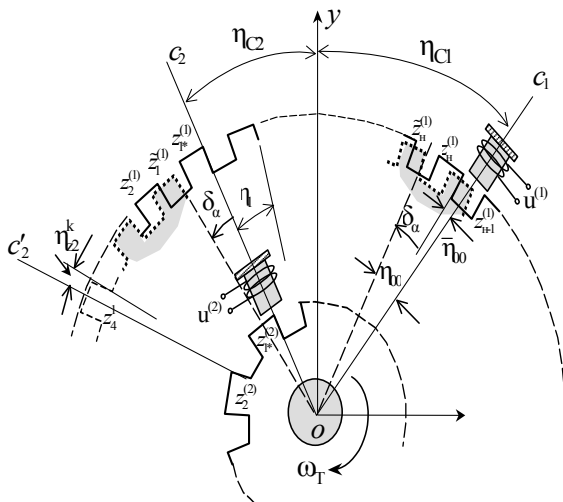


Рис. 4. Конфигурация измерительной системы ДЧВ в $0_{k^*}^{(2)}$ -точке

где введены следующие обозначения:

$$\text{fr} [\eta_{2/1}] = (\eta_{2/1} - \text{in} [\eta_{2/1}]) -$$

дробная часть отношения $\eta_{2/1} = \eta_2 / \eta_1$;

$$\text{in} [\eta_2 / \eta_1] \square \text{in} [\eta_{2/1}] -$$

целое число шагов шестерни $z^{(1)}$, укладываемое на одном шаге шестерни $z^{(2)}$.

Учитывая (7), из уравнения (9) получим

$$\bar{\tau}_j = \frac{\eta_1}{\omega_T} \left\{ \frac{\eta_C}{\eta_1} - j \text{fr} [\eta_{2/1}] - \text{in} \left[\frac{\eta_C}{\eta_1} - j \text{fr} [\eta_{2/1}] \right] \right\}, \quad (10)$$

$$j = 0, 1, 2, \dots$$

Заметив, что $(\eta_1 / \omega_T) = T_1$, выражение (10) можно переписать в более простом виде

$$\bar{\tau}_j = T_1 \text{fr} \left[\frac{\eta_C}{\eta_1} - j \text{fr} [\eta_{2/1}] \right], \quad j = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

4. Учет упругости вала на скручивание ($c_\omega \neq \infty$)

Из-за упругости вала при передаче момента от турбины к винтам появляется угол упругого скручивания вала δ_α , изменяющий конфигурацию измерительного узла. Это изменение вызывается поворотом индукторной шестерни $z^{(1)}$ относительно шестерни $z^{(2)}$ на угол δ_α . На рис. 4 данный поворот определен через смещение зуба $z_1^{(1)}$ (в положение $\bar{z}_1^{(1)}$, обозначенное пунктирной линией с затенением), на величину δ_α по отношению к "совмещенному" с ним (в недеформированном состоянии вала) зубу $z_1^{(2)}$ (ДЧВ-2).

В положении измерительного узла, соответствующем $0_{k^*}^{(2)}$ -точке (рис. 4), отклонение η_{00} передней кромки "набегающего" зуба $\bar{z}_H^{(1)}$ индукторной шестерни $z^{(1)}$ от оси статора ДЧВ-1 с учетом упругого сдвига вала на угол δ_α понятным из рис. 4 образом определяется по формуле

$$\eta_{00} = \eta_C + \delta_\alpha - \eta_1 \text{in} [(\eta_C + \delta_\alpha) / \eta_1]. \quad (12)$$

Общая формула определения параметра η_{0j} , в остальных $0_{k_2}^{(2)}$ -точках, принадлежащих периоду повторения имеет вид, аналогичный (9):

$$\eta_{0j} = \tilde{\eta}_C - \left\{ j \text{fr} [\eta_{2/1}] + \text{in} \left[\frac{\tilde{\eta}_C}{\eta_1} - j \text{fr} [\eta_{2/1}] \right] \right\} \eta_1, \quad (13)$$

где для краткости обозначено

$$\tilde{\eta}_C = \eta_C + \delta_\alpha.$$

Поскольку интервал времени, необходимый для перемещения полюса $z_H^{(1)}$ на угол η_{0j} , при котором реализуется $0_{k_1}^{(1)}$ -точка сигнала $u^{(1)}(t)$

($u_1 = 0, \dot{u}_1 > 0$), составляет величину

$$\tau_j = \eta_{0j} \omega_T^{-1}, \quad (14)$$

то из (13) найдем

$$\tau_j = T_1 \left\{ \frac{\tilde{\eta}_C}{\eta_1} - j \text{fr} [\eta_{2/1}] - \text{in} \left[\frac{\tilde{\eta}_C}{\eta_1} - j \text{fr} [\eta_{2/1}] \right] \right\}. \quad (15)$$

5. Определение угла скручивания вала при наличии укороченного по высоте зуба индукторной шестерни ДЧВ-2

Укорочение зуба $z_{k^*}^{(2)}$ индуктора ДЧВ-2 приводит к заметному уменьшению амплитуды сигнала $u^{(2)}$ при прохождении этого зуба под полюсом статора, что позволяет идентифицировать $0_{k^*}^{(2)}$ -точку как начало отсчета $t = t_0$.

Пусть t_1 – ближайший к t_0 момент реализации $0_k^{(1)}$ -точки сигнала $u^{(1)}$. Зафиксируем $\tau_0 = t_1 - t_0$. Аналогичным образом могут быть определены интервалы τ_j при $0_k^{(2)}$ -точках, формируемых "несовмещенными" полюсами индуктора ДЧВ-2.

Пусть далее t_2 – момент реализации $0_{k+1}^{(1)}$ -точки сигнала $u^{(1)}$. Тогда $t_2 - t_1 = T_1$ поддающийся изменению период сигнала $u^{(1)}$.

Рассмотрим один из возможных способов вычисления угла скручивания δ_α по результатам измерения интервала τ_0 и периода T_1 .

Положив в (15) $j = 0$, получим

$$T_1 \left\{ \frac{\eta_C + \frac{\delta_\alpha}{\eta_1} - \operatorname{in} \left[\frac{\eta_C + \frac{\delta_\alpha}{\eta_1}}{\eta_1} \right] \right\} = \tau_0. \quad (16)$$

Аналогичным образом из (10) следует

$$T_1 \left\{ \frac{\eta_C}{\eta_1} - \operatorname{in} \left[\frac{\eta_C}{\eta_1} \right] \right\} = \bar{\tau}_0. \quad (17)$$

Вычитая из (16) выражение (17), получим нелинейное уравнение относительно угла δ_α :

$$T_1 \left\{ \frac{\delta_\alpha}{\eta_1} - \left(\operatorname{in} \left[\frac{\eta_C + \frac{\delta_\alpha}{\eta_1}}{\eta_1} \right] - \operatorname{in} \left[\frac{\eta_C}{\eta_1} \right] \right) \right\} = \Delta\tau_0, \quad (18)$$

где обозначено

$$\Delta\tau_0 = \tau_0 - \bar{\tau}_0. \quad (19)$$

Введем понятное и вполне реализуемое ограничение на область существования решения δ_α , устанавливающее следующее правило проектирования:

Максимально возможное значение угла скручивания вала не должно превышать угловой размер "шага" η_1 индукторной шестерни ДЧВ-1:

$$\delta_\alpha \in (0, \delta_{\alpha \max}], \delta_{\alpha \max} < \eta_1. \quad (20)$$

В частности, для рассматриваемого в работе приложения имеем $\delta_{\alpha \max} \approx 6^\circ$, $\eta_1 = 9^\circ$, т.е. требование (20) выполняется, что позволяет использовать уравнение (18) для вычисления δ_α .

Рассмотрим выражение (•), стоящее в левой части уравнения (18). Здесь $\delta_\alpha / \eta_1 < 1$ в силу (20).

Тогда область значений переменной

$$\delta_\alpha < \delta_{\alpha 1} = \eta_1 (1 - \operatorname{fr} [\eta_C / \eta_1]) \quad (21)$$

определим как область малых значений $\delta_\alpha = (0, \delta_{\alpha 1}]$, $\delta_{\alpha 1} \leq \delta_{\alpha \max}$, в которой понятным образом выполняется условие

$$\operatorname{in} \left[\frac{\eta_C + \frac{\delta_\alpha}{\eta_1}}{\eta_1} \right] \equiv \operatorname{in} \left[\frac{\eta_C}{\eta_1} \right]. \quad (22)$$

При этом, как видно из (19),

$$\Delta\tau_0 = \tau_0 - \bar{\tau}_0 > 0$$

и решением уравнения (18) является выражение

$$\delta_\alpha = \frac{\eta_1}{T_1} \Delta\tau_0. \quad (23)$$

Из (21) видно, что диапазон применимости формулы (23) для вычисления δ_α увеличивается с уменьшением величины $\operatorname{fr} [\eta_C / \eta_1]$ и максимален ($\delta_{\alpha 1} = \delta_{\alpha \max}$), если $\operatorname{fr} [\eta_C / \eta_1] = 0$.

В общем случае при $\delta_\alpha \geq \delta_{\alpha 1} = \eta_1 (1 - \operatorname{fr} [\eta_C / \eta_1])$ соотношение (22) принимает следующий вид:

$$\operatorname{in} \left[\frac{\eta_C + \frac{\delta_\alpha}{\eta_1}}{\eta_1} \right] = \operatorname{in} \left[\frac{\eta_C}{\eta_1} \right] + 1, \quad (24)$$

подсказывающий, что из-за возрастания δ_α произошло скачкообразное увеличение на единицу целого числа "шагов" индукторной шестерни, содержащихся в растворе $\tilde{\eta}_C = \eta_C + \delta_\alpha$.

При этом вместо $z_n^{(1)}$ "набегающим" становится зуб $z_{n-1}^{(1)}$ (рис. 4), вышедший на позицию η'_{00} , сколь угодно близкую к статорному полюсу ДЧВ-1. По этой причине величина интервала τ_0 скачком уменьшается до малой величины $\tau'_0 < \bar{\tau}_0$, вследствие чего вычисляемая по формуле (19) разность $\Delta\tau_0$ принимает отрицательное значение. Данный факт подтверждается подстановкой выражения (23) в уравнение (17), в результате которой имеем

$$\Delta\tau_0 = T_1 \left\{ \frac{\delta_\alpha}{\eta_1} - 1 \right\} < 0. \quad (25)$$

Отсюда решением уравнения (18) в области повышенных значений

$$\delta_\alpha \geq \delta_{\alpha 1} = \eta_1 (1 - \operatorname{fr} [\eta_C / \eta_1])$$

является выражение

$$\delta_\alpha = \eta_1 \left(1 + \frac{\Delta\tau_0}{T_1} \right). \quad (26)$$

Аналогичным образом можно получить соотношения для определения угла δ_α по результатам из-

мерения интервалов τ_j в промежуточных $0_k^{(2)}$ -точках, формируемых "несовмещенными" полюсами индуктора ДЧВ-2. При этом разность

$$\Delta\tau_j = \tau_j - \bar{\tau}_j \quad (27)$$

является практически измеряемой.

Используя соотношения (10) и (15), можем записать

$$\Delta\tau_j = T_1 \left\{ \frac{\delta_\alpha}{\eta_1} - \left(\operatorname{in} \left[\frac{\eta_C}{\eta_1} - j \operatorname{fr} [\eta_{2/1}] + \frac{\delta_\alpha}{\eta_1} \right] - \operatorname{in} \left[\frac{\tilde{\eta}_C}{\eta_1} - j \operatorname{fr} [\eta_{2/1}] \right] \right) \right\}. \quad (28)$$

Здесь выражение (\bullet) в силу (20) может принимать два значения:

$$(\bullet) = \begin{cases} 0 & \text{при } \frac{\delta_\alpha}{\eta_1} + \operatorname{fr} \left[\frac{\eta_C}{\eta_1} - j \operatorname{fr} [\eta_{2/1}] \right] < 1; \\ 1 & \text{при } \frac{\delta_\alpha}{\eta_1} + \operatorname{fr} \left[\frac{\eta_C}{\eta_1} - j \operatorname{fr} [\eta_{2/1}] \right] \geq 1. \end{cases}$$

Из (28) видно, что значению $(\bullet) = 0$ соответствует $\Delta\tau_j > 0$. При $(\bullet) = 1$ имеем $\Delta\tau_j \leq 0$.

Отсюда следует, что решениями уравнения (28) относительно переменной δ_α для любого j -го измерения являются

$$\delta_\alpha = \begin{cases} \eta_1 \frac{\Delta\tau_j}{T_1} & \text{при } \Delta\tau_j > 0, \quad j = 0, 1, 2, 0, \dots; \\ \eta_1 \left(1 + \frac{\Delta\tau_j}{T_1} \right) & \text{при } \Delta\tau_j \leq 0. \end{cases} \quad (29)$$

Таким образом, в основу простейшего алгоритма вычисления угла δ_α при наличии укороченного зуба $z_{1*}^{(2)}$ индукторной шестерни $z^{(2)}$ может быть положена следующая последовательность операций, повторяющаяся на каждом периоде T_{Π} :

1. Фиксация момента t_0 , соответствующего $0_{1*}^{(2)}$ -точке сигнала $u^{(2)}$ при прохождении укороченного 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 его периода $T_1 = t_2 - t_1$.

4. Вычисление значения $\bar{\tau}_0 = T_1 \operatorname{fr} [\eta_C / \eta_1]$.

5. Вычисление разности $\Delta\tau_0 = \tau_0 - \bar{\tau}_0$, включая операцию определения знака $\Delta\tau_0$.

6. Вычисление оценки текущего значения угла δ_α :

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

Небольшое усложнение рассмотренного простейшего алгоритма дает возможность улучшить качество оценивания δ_α . Это достигается осуществлением на периоде повторения T_{Π} дополнительных измерений промежуточных значений интервалов τ_j , что позволяет за счет использования (29) повысить частоту получения информации о координате δ_α . Повышение качества оценивания при этом реализуется путем осреднения локальных результатов на периоде T_{Π} .

Работоспособность рассмотренных алгоритмов подтверждает анализ процессов, представленных на рис. 5. Здесь воспроизведены модели сигналов ДЧВ-1 и ДЧВ-2 (с угловым раствором статорных полюсов $\eta_C = 67^\circ$), регистрирующих вращение вала турбины в крейсерском режиме, отличающимся от режима, близкого к ЗМГ (рис. 4), числом оборотов турбины ($n_T = 120$ об/с) и повышенным значением передаваемого момента, вызывающим угол скручивания вала $\delta_\alpha = 4^\circ$.

Один из "совмещенных" зубьев $z_{k^*}^{(2)}$ шестерни $z^{(2)}$ "укорочен", что на осциллограмме отображается полуволевой с уменьшенным значением амплитуды.

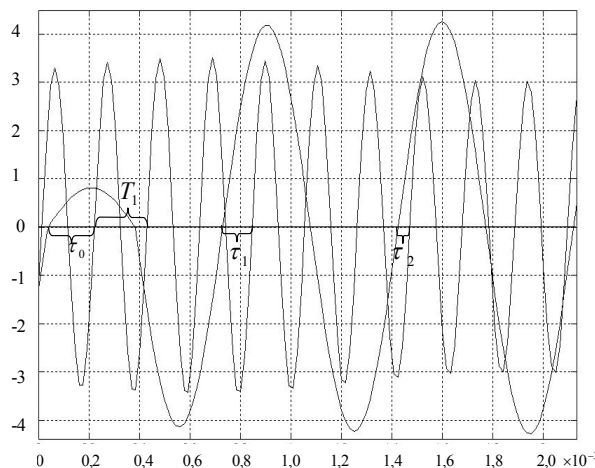


Рис. 5. Модель сигналов ДЧВ-2 и ДЧВ-1.
Крейсерский режим
($\eta_C = 67^\circ$, $n_T = 120$ об/с, $\delta_\alpha = 4^\circ$)

Из осциллограммы прямыми измерениями получаем: $\tau_0 = 1,809 \cdot 10^{-4}$, $T_1 = 2,067 \cdot 10^{-4}$ с, $\tau_1 = 1,137 \cdot 10^{-4}$ с, $\tau_2 = 4,522 \cdot 10^{-5}$ с. Учитывая, что $\eta_1 = 9^\circ$, $\eta_2 = 30^\circ$ и, принимая во внимание измеренное значение T_1 , по формулам (11) найдем: $\bar{\tau}_0 = 9,187 \cdot 10^{-5}$ с, $\bar{\tau}_1 = 2,297 \cdot 10^{-5}$ с, $\bar{\tau}_2 = 1,608 \cdot 10^{-4}$ с.

С учетом измеренных значений τ_j вычислим следующие разности: $\Delta\tau_j = \tau_j - \bar{\tau}_j$; $\Delta\tau_0 = 8,9 \cdot 10^{-5}$; $\Delta\tau_1 = 9,07 \cdot 10^{-5}$; $\Delta\tau_2 = -1,156 \cdot 10^{-4}$. Применяя формулы (29), вычисляем $\delta_{\alpha 0} = \delta_\alpha(\Delta\tau_0) = 3,88^\circ$, $\delta_{\alpha 1} = \delta_\alpha(\Delta\tau_1) = 3,95^\circ$, $\delta_{\alpha 2} = \delta_\alpha(\Delta\tau_2) = 3,97^\circ$ и, как итог, получаем оценку угла скручивания вала на рассматриваемом периоде повторения T_{Π} : $\hat{\delta}_\alpha = 3,93(3)^\circ$.

Заключение

Рассмотренная методика оценивания угла скручивания вала является простой в части реализации

вычислительных процедур и надежной по причине высокой степени защищенности начала отсчета ($0_{k^*}^{(2)}$ -точки) от любого рода помех.

Важным требованием для обеспечения нормального функционирования алгоритма является минимизация допуска угловых координат установки датчиков ДЧВ-1 и ДЧВ-2. Достаточно важным является также выполнение условия "нормальной" сборки индукторных шестерен на вале свободной турбины.

Точность оценивания угла скручивания вала зависит от точности задания параметра η_C и от точности определения моментов реализации $0_k^{(i)}$ -точек.

Литература

1. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
2. Рутковский В.Ю., Епифанов С.В., Земляков С.Д., Суханов В.М., Глумов В.М. Алгебраический и адаптивный подходы к задаче идентификации крутящего момента свободной турбины ТВД // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. тр. – Х.: ХАИ, 2002. – Вып. 31. Двигатели и энергоустановки. – С. 197 – 201.
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 29.04.2005

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