

УДК 321.3.016.001.57:621.3.018.12

С.И. ШАНЬКИН<sup>1</sup>, А.А. СТУПАКОВ<sup>1</sup>, Ф.Ф. СИРЕНКО<sup>2</sup>, С.В. ЕПИФАНОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина<sup>2</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ФАЗОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Данная статья посвящена разработке алгоритма, позволяющего используя сигнал штатного датчика частоты вращения определять величину крутящего момента турбовального двигателя. Приведены результаты экспериментального исследования сигнала с использованием лабораторной установки и упрощенной модели выступа вала, а также сигнал со стендовых испытаний. Предложены две методики по обработке экспериментальных данных. Приведен алгоритм по определению величины крутящего момента и исследованы факторы, влияющие на точность определения величины крутящего момента и робастность алгоритма.

**Ключевые слова:** измеритель крутящего момента, экспериментальное исследование сигнала, алгоритм определения углового перемещения.

### Введение

Одним из основных направлений повышения технических характеристик, эффективности разработки, испытаний и эксплуатации авиационных ГТД является совершенствование их систем управления и мониторинга.

Повышение качества управления рабочим процессом ГТД обеспечивает расширение предельных режимов работы (ограничений по предельным температурам, частотам вращения и нагрузкам), снижает удельный расход топлива, продлевает ресурс двигателя, а также улучшает его динамические характеристики. Расширение информационных возможностей систем управления и мониторинга обеспечивает значительное снижение затрат на стендовые и лётные испытания при доводке проектируемых двигателей, что особенно актуально в условиях жёсткой экономии финансовых ресурсов.

Необходимым условием реализации указанного направления является достоверное и точное определение параметров двигателя, используемых при управлении и контроле. Одним из таких параметров, важность которого для турбовальных двигателей очевидна, является крутящий момент на валу свободной турбины. Его значение непосредственно характеризует основной параметр двигателя – мощность. Поэтому оно используется в контуре ограничения мощности системы автоматического управления, а также является наиболее предпочтительным параметром для обеспечения синхронизации работы двигателей силовой установки вертолета.

### 1. Объект исследования

Объектом исследования является измеритель крутящего момента (ИКМ), конструктивная схема которого предложена фирмой ОАО «Мотор Сич» (см. рис. 1).

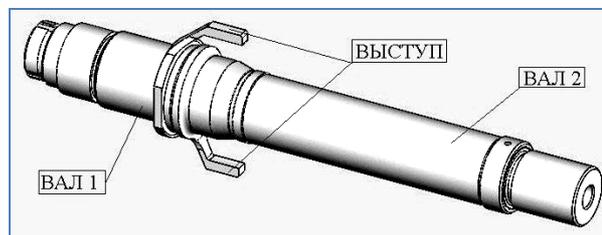


Рис. 1. Твердотельная модель ИКМ

ИКМ расположен в редукторе и состоит из двух валов: вал 1 передает крутящий момент, вал 2 консольно присоединен к валу 1 с помощью штифта и не передает крутящий момент. В плоскости выступов расположен штатный датчик частоты вращения (например, ДТА – 15).

Исходно выступы расположены под углом 180 градусов друг относительно друга. При работе вал 1 передает крутящий момент, что приводит к деформации вала, в то время как вал 2 не деформируется. Взаимное расположение выступов изменяется из-за деформации кручения (рис. 2).

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 выступам, расположенным на валу трансмиссии.

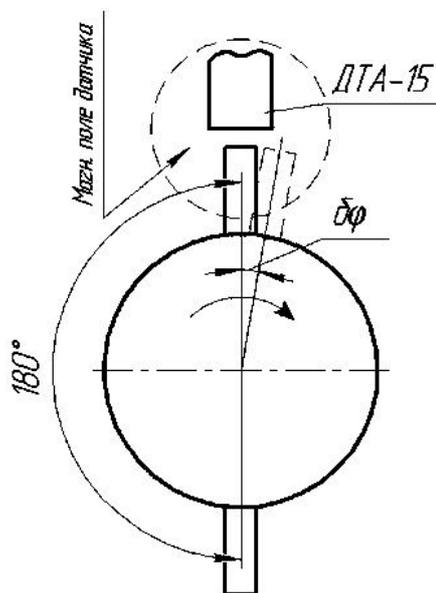


Рис. 2. Принцип работы ИКМ

Для разработки алгоритма определения крутящего момента на основании измерения данного электрического сигнала необходимо выполнить анализ всех факторов, влияющих на величину этого сигнала, определить основные влияющие факторы и предложить методику выделения полезной составляющей, связанной с изменением крутящего момента. В данной работе основное внимание уделено анализу параметров электрического сигнала и формированию алгоритма определения разности фаз.

## 2. Условия проведения испытаний

### 2.1. Экспериментальная установка

Испытания выполнены на экспериментальной установке, представляющей собой однодисковый ротор с установленными по бокам ограничителями прогиба.

Ротор приводится во вращение электродвигателем постоянного тока. Управляют частотой вращения ротора плавным изменением напряжения в обмотке возбуждения электродвигателя с помощью автотрансформатора. Частота вращения ротора контролируется тахометром, индикатор которого смонтирован на пульте управления. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.

Для получения сигнала использовался беспроводной магнитоиндукционный датчик частоты вращения ДТА-15, предназначенный для выдачи элек-

трического сигнала с частотой, пропорциональной частоте вращения вала двигателя, на котором установлен индуктор.

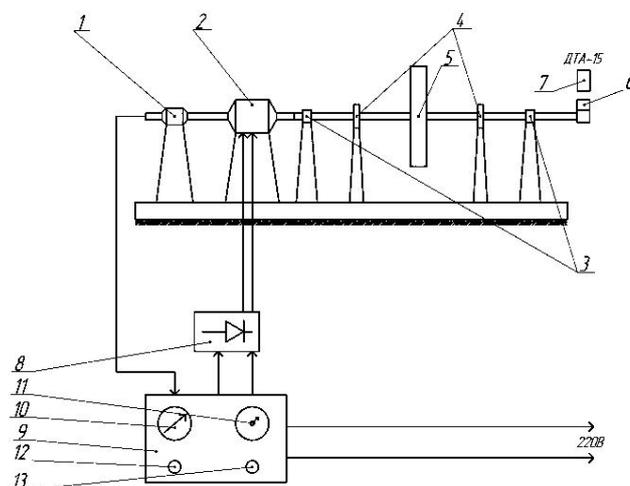


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

- 1 – тахометр, 2 – электродвигатель постоянного тока,
- 3 – жесткая опора, 4 – ограничители прогиба,
- 5 – массивный диск, 6 – модель индуктора,
- 7 – беспроводной магнитоиндукционный датчик ДТА-15, 8 – выпрямитель, 9 – приборная панель,
- 10 – автотрансформатор, 11 – индикатор частоты вращения, 12 – выключатель напряжения, 13 – контрольная лампа

Он представляет собой генератор электрических импульсов напряжения, частота следования которых  $f$  пропорциональна частоте вращения ротора двигателя  $n$ :

$$f = \frac{n}{60}. \quad (1)$$

### 2.2. Модель индуктора и регистрация сигналов датчика

Основной целью эксперимента являлось исследование влияния частоты вращения и погрешностей установки датчика (зазора между датчиком и индуктором, а также перекоса датчика) на параметры сигнала. На этом этапе исследований реальный индуктор был заменен упрощенным макетом, который приведен на рис. 4.

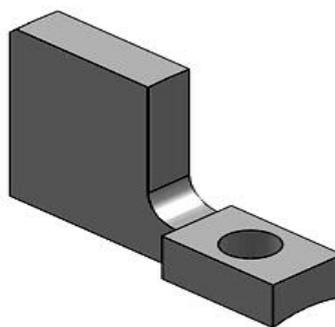


Рис. 4. Модель индуктора

Регистрация сигнала проводилась с частотой 20 кГц. Сигнал датчика через делитель напряжения подавался на звуковую карту компьютера. Настройки выполнены с помощью программного обеспечения звуковой карты.

### 3. Методика проведения эксперимента и обработки полученных данных

Пример полученного сигнала представлен на рис. 5. При «подходе» площадки индуктора к датчику линии магнитного поля начинают замыкаться частично через воздух, а частично через металл. С ростом количества силовых линий, замыкающихся через металл, растет напряжение. Максимальное напряжение достигается при нахождении датчика и индуктора в одной плоскости. Далее сигнал начинает падать до нуля. По достижении нуля сигнал продолжает падать и достигает минимального значения. Это связано с магнитной разрядкой датчика.

При анализе полученных данных использовались два метода.

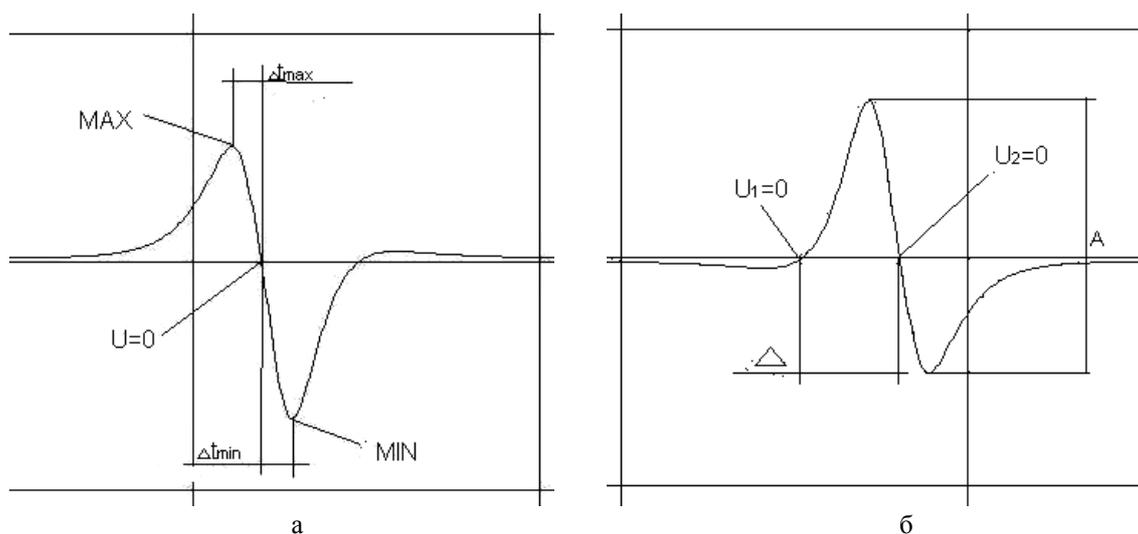


Рис. 5. Сигнал и его параметры: а – первый метод; б – второй метод

### 4. Результаты экспериментального исследования модели индуктора

В эксперименте исследовалось четыре варианта установки датчика:

- зазор 1,75 мм,
- зазор 2,2 мм,
- зазор 2,8 мм.

«Перекося» (установка датчика с перекося на 1 град 30 мин при максимальном удалении датчика от индуктора на расстояние 2,8 мм).

Результаты приведены на рис. 6 – 8.

Первый метод (рис. 5, а) заключается в фиксации максимального и минимального пиков, а также момента времени, в который величина индукции равна нулю, с последующим вычислением:

- амплитуды

$$A = U_{\max} - U_{\min}; \quad (2)$$

- разности между нулем и минимальным пиком

$$\Delta_{\min} = t_{U=0} - t_{U=\min}; \quad (3)$$

- разности между максимальным пиком и нулем

$$\Delta_{\max} = t_{U=\max} - t_{U=0}. \quad (4)$$

Второй метод (рис. 5, б) заключается в фиксации моментов времени, в которые величина индукции равна нулю в начале и конце максимального пика, с последующим вычислением:

- амплитуды (2);

- разности между точками с нулевой величиной индукции в начале и конце максимального пика:

$$\Delta = t_{2\_U=0} - t_{1\_U=0}. \quad (5)$$

По результатам испытаний зависимости каждого из перечисленных выходных параметров ( $U_{\max}$ ,  $U_{\min}$ ,  $A$ ,  $\Delta_{\min}$ ,  $\Delta_{\max}$ ,  $\Delta$ ) от входных параметров (величины зазора, и частоты вращения) были аппроксимированы полиномами вида

$$Y = k_1 + k_2 \cdot Z + k_3 \cdot n + k_4 \cdot Z^2 + k_5 \cdot Z \cdot n + k_6, \quad (6)$$

где  $Y$  – выходной параметр;

$k_i$  – коэффициенты;

$z_i$  – величина зазора;

$n_i$  – частота вращения.

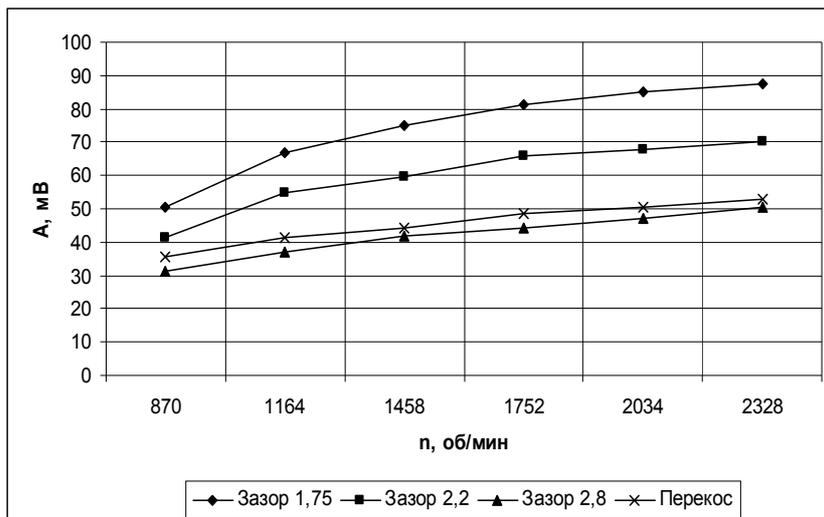


Рис. 6. Зависимость амплитуды от частоты вращения при различных зазорах и «перекосе»

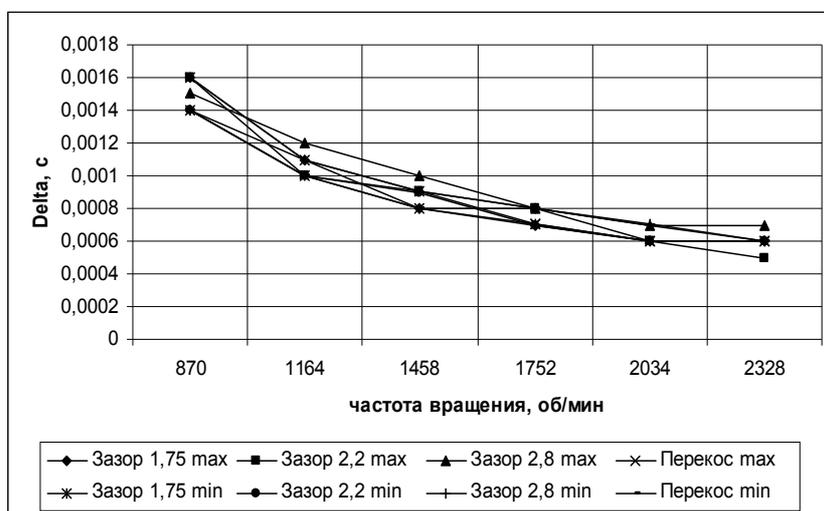


Рис. 7. Зависимость разности между точками с нулем и минимальным пиком и максимальным пиком и нулем от частоты вращения при различных зазорах и «перекосе» (первый метод)

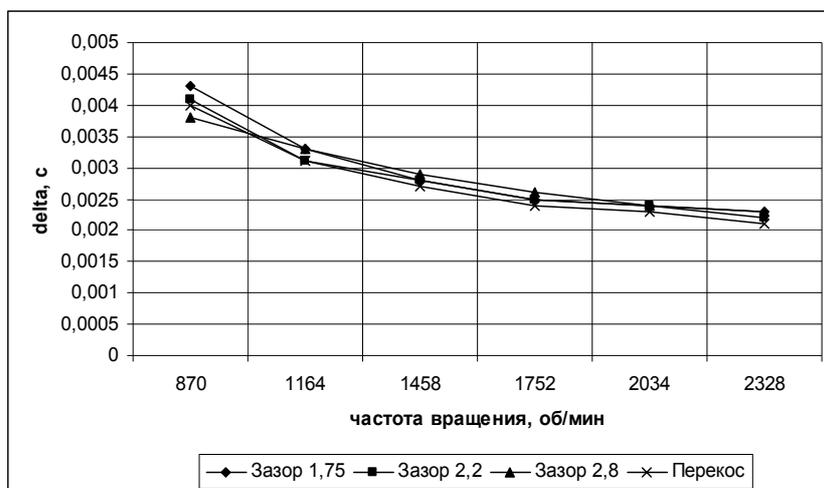


Рис. 8. Зависимость разности между точками, в которых величина индукции равна нулю от частоты вращения при различных зазорах и «перекосе» (второй метод)

## 5. Стендовые испытания измерителя крутящего момента

Стендовые испытания проводились в ОАО «Мотор Сич». На рис. 9 приведен фрагмент сигнала датчика.

Частота регистрации составляла около 60 кГц. При частоте вращения 6000 об/мин длительность «полезного» сигнала (верхний и нижний заброс) составляет около 0,001 с. Это означает, что на каж-

дый заброс приходится около 30 замеров, и приведенные графики дают хорошее представление о форме сигналов и их зависимости от варьируемых факторов.

Как видно из рис. 9, сигнал, полученный при стендовых испытаниях, и сигнал при испытаниях упрощенной модели индуктора (рис. 6) не имеют значительных различий по форме, что доказывает обоснованность проведения первого этапа испытаний на упрощенной модели индуктора.

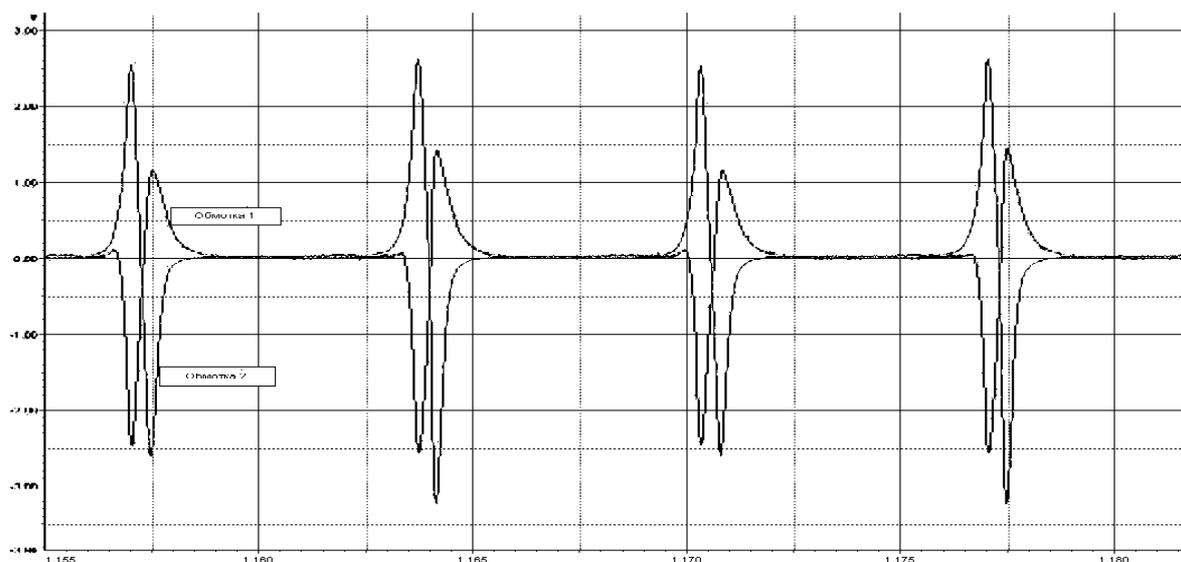


Рис. 9. Фрагмент сигнала ИКМ, полученного при стендовых испытаниях

Результаты стендовых испытаний показывают, что изменение зазора влияет на амплитуду электрического сигнала. Увеличение зазора в 2 раза вызывает уменьшение амплитуды сигнала в 1,8 раза (например, от 0,5 до 1 мм амплитуда снижается в 1,8 раза) как при стендовых испытаниях, так и при испытаниях упрощенной модели. При исследованиях на экспериментальном стенде задавались большие значения зазора.

Анализ данных стендовых испытаний показывает, что влияние зазора – нелинейное: с уменьшением зазора влияние его изменения увеличивается.

## 6. Формирование алгоритма определения величины крутящего момента

Как показали результаты предварительных исследований, выполненных с использованием твердотельной модели, величина крутящего момента линейно зависит от фазы, а зависимость от температуры имеет нелинейный характер, что требует введения специальной процедуры коррекции по температуре. Поэтому для формирования окончательного алгоритма необходимо провести эксперимент с замером температуры в области ИКМ.

Рассматриваемый измеритель крутящего момента расположен в узле редуктора. Он интенсивно

охлаждается маслом, подаваемым непосредственно из маслобака. Поэтому температурная коррекция показаний ИКМ может быть реализована по значениям температуры масла в баке, которые измеряются в эксплуатации.

Предложенный алгоритм обеспечивает получение данных с ИКМ с последующей их обработкой и определением величины крутящего момента.

Он использует постоянное пороговое значение напряжения  $U_{ПОР}$  и определяет на основании анализа сигнала датчика 3 момента времени (рис. 10) при прохождении импульсов первого и второго выступов:

1) время  $t_{11}$  – момент времени возникновения порогового значения напряжения на «переднем гребне» сигнала при прохождении выступа вала 1;

2) точка  $t_{12}$ , характеризует момент времени возникновения порогового значения напряжения  $U_{ПОР}$  на «переднем гребне» сигнала при прохождении выступа вала 2;

3) точка  $t_{13}$ , характеризует момент времени возникновения порогового значения  $U_{ПОР}$  на «переднем гребне» сигнала при повторном прохождении выступа вала 1.

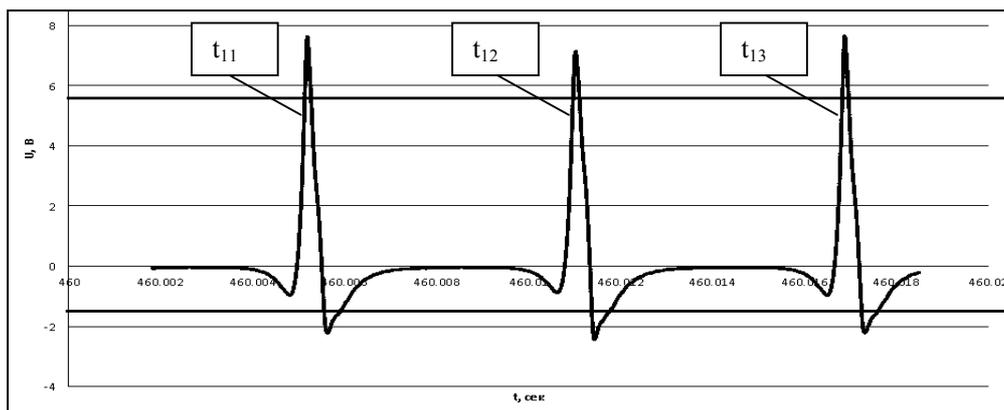


Рис. 10. Схема расположения точек измерения в алгоритме

Далее алгоритм реализует следующие формулы:

1) время одного полного поворота:

$$\Delta t_{i3} = t_{i3} - t_{i1}; \quad (7)$$

2) время поворота вала 1 к валу 2:

$$\Delta t_{i1} = t_{i2} - t_{i1}; \quad (8)$$

3) время поворота вала 2 к валу 1:

$$\Delta t_{i2} = t_{i3} - t_{i2}; \quad (9)$$

4) разница времени поворота:

$$\Delta(\Delta t_i) = \frac{\Delta t_{i1} - \Delta t_{i2}}{2}; \quad (10)$$

5) угол поворота рессоры за единицу времени:

$$Q_i = \frac{360^\circ}{\Delta t_{i3}}; \quad (11)$$

6) угловое перемещение:

$$\varphi_i = Q_i \cdot \Delta(\Delta t_i); \quad (12)$$

7) величина крутящего момента:

$$M_{кр\_i} = \varphi_i \cdot k_{ТАР} \cdot k_t; \quad (13)$$

8) осредненная величина крутящего момента

$$M_{кр} = \sum_{i=0}^n M_{кр\_i} / n. \quad (14)$$

Индекс  $i$  соответствует номеру точки, в которой выполнено измерение.

## 7. Экспериментальное исследование устойчивости алгоритма к шумам и неточности определения амплитуды напряжений

Предложенный алгоритм разрабатывался для случая идеального сигнала. Однако реальный сигнал имеет определенную величину случайных отклонений (шум). Дополнительные погрешности могут быть обусловлены отличиями жесткости смоделированного и реального ИКМ. С использованием имитационного моделирования исследовано влияние вышеупомянутых факторов на устойчивость работы алгоритма. В основу модели положен сигнал реального ИКМ, в который были дополнительно внесены шумы и погрешность определения амплитуды (погрешность

настройки алгоритма). Шумы задавались с помощью генератора псевдослучайных чисел и составляли 5% от максимального напряжения.

Максимальная величина погрешности определения амплитуды составила 10%. Фрагмент сигнала при имитационном моделировании влияния указанных факторов представлен на рис. 11.

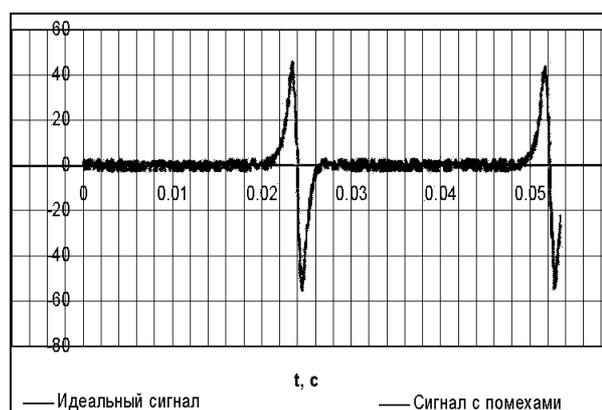


Рис. 11. Фрагмент сигнала имитационного моделирования

При превышении определенной величины шумов алгоритм начинает работать нестабильно, т.к. возникают дополнительные точки перехода порогового уровня. В этом случае необходимо предусмотреть специальную защиту от «ложных переходов» либо рассмотреть альтернативный способ определения величины крутящего момента.

## Выводы

Величина индукции зависит от зазора. С увеличением зазора величина индукции падает по зависимости, близкой к линейной. Это связано с тем, что при увеличении зазора меньшее количество силовых линий магнитного поля замыкается через индуктор.

Величина индукции зависит от частоты вращения.

С увеличением частоты вращения величина индукции растет.

При установке датчика с перекосом амплитуда сигнала увеличивается. Это связано с расположением силовых линий магнитного поля. Все полученные сигналы показывают, что величина реально шума менее допустимого порога, что позволяет использовать предложенный алгоритм.

По результатам эксперимента более точным и устойчивым к конструкционным и технологическим погрешностям является первый метод измерения.

Предложен вариант алгоритма определения крутящего момента по сигналам датчика. Данные результаты получены с некоторыми упрощениями и допущениями. Они характеризуют в основном форму получаемого сигнала и зависимости, которые справедливы как для модели, так и для индуктора. Для уточнения результатов необходимо провести эксперимент с индуктором в реальных условиях.

## 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. *Епифанов С.В. Анализ влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на погрешность определения крутящего момента фазометрическим методом / С.В. Епифанов, Ф.Ф. Сиренко, Р.Л. Зеленский, Т.В. Кулик // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 7 (74). – С. 213-217.*
4. *Датчики частоты вращения [Электронный ресурс] / Мин-во промышленности и энергетики РФ, ОАО «Казанский завод «ЭЛЕКТРОПРИБОР»». – URL: [http://priborist.net/rus/images/stories/files/datchik\\_i\\_chastotu\\_vrash.pdf](http://priborist.net/rus/images/stories/files/datchik_i_chastotu_vrash.pdf). – 29.05.2011 г.*

Поступила в редакцию 30.05.2011

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

### РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ КРУТИЛЬНОГО МОМЕНТУ ФАЗОМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ

*С.І. Шанькін, О.А. Ступаков, Ф.Ф. Сиренко, С.В. Єпифанов*

Дана стаття присвячена розробці алгоритму, що дозволяє визначити величину крутильного моменту турбовального двигуна, використовуючи сигнал штатного датчика частота обертання. Наведено результати експериментального дослідження сигналу з використанням лабораторної установки і спрощеної моделі виступу вала, а також сигнал зі стендових випробувань. Запропоновано дві методики щодо обробки експериментальних даних. Наведено алгоритм з визначення величини крутильного моменту та досліджені фактори, що впливають на точність визначення величини крутильного моменту і працездатність алгоритму.

**Ключові слова:** вимірювач крутильного моменту, експериментальне дослідження сигналу, алгоритм визначення кутового переміщення.

### DEVELOPING OF A TORSION TORQUE CALCULATION ALGORITHM, BASED ON PHASE-ANGLE METERING METHOD

*S.I. Shan'kin, A.A. Stupakov, F.F. Sirenko, S.V. Yepifanov*

This article is devoted to developing an algorithm that allows calculating the torsion torque value in turboshaft engines, using signal of regular rotational speed sensor. Given an experimental study of a signal using laboratory stand and a simplified model of protrusion of shaft, as well as the signal from the test bench. Proposed two methods for processing experimental data. Given a torsion torque calculation algorithm and investigated factors affecting the accuracy of the torsion torque calculation and the robustness of the algorithm.

**Key words:** torsion torque measuring instrument, experimental study of a signal, angle displacement algorithm.

**Шанькин Сергей Иванович** – главный конструктор ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, [or.oku@motorsich.com](mailto:or.oku@motorsich.com).

**Ступаков Александр Анатольевич** – начальник отдела зубчатых передач ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, [uran.ugk@motorsich.com](mailto:uran.ugk@motorsich.com).

**Сиренко Феликс Феликсович** – аспирант кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: [aedlab@gmail.com](mailto:aedlab@gmail.com).

**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](mailto:aedlab@gmail.com).