

# Подход к совершенствованию систем диагностики технического состояния в авиационной отрасли на базе цифровых технологий

Е. Д. Позднякова, К. Г. Потапов

Представлен подход к анализу систем мониторинга с точки зрения принципов их построения.

Предложено описание методики использования фазохронометрического подхода применительно к элементам трансмиссии вертолетной техники, а также описаны основные элементы программного обеспечения для обработки и анализа получаемой измерительной информации.

## Ключевые слова:

жизненный цикл, измерительная технология, контроль, измерение, фазохронометрический метод, вертолет, трансмиссия, вибродиагностика

УДК 62-192, 681.2.083 | ВАК 2.2.10

DOI: 10.22184/2499-9407.2024.36.3.74.78

## Введение

Современное развитие цифровых технологий оказывает значительное влияние на множество отраслей промышленности, включая авиационную сферу. С каждым годом авиационная промышленность расширяет свои технологические возможности, и интеграция цифровых технологий играет ключевую роль в этом процессе.

Одними из важнейших требований к узлам и агрегатам воздушной техники являются максимально возможная надежность, ремонтопригодность и оперативная диагностика с последующей возможностью оценки остаточного ресурса на всех этапах жизненного цикла и идентификацией предотказного состояния. Для принятия управляющих решений необходимы системы мониторинга и диагностики, которые позволяют получать информацию о количественных значениях измеряемой величины. При этом получаемая ими измерительная информация должна отражать изменения в состоянии механизма в течение заданного периода времени, правильно восприниматься и однозначно интерпретироваться в сложившихся условиях.

Стремление к постоянному совершенствованию систем безопасности и повышению общей надежности подчеркивает актуальность внедрения цифровых технологий в авиационной отрасли [1, 2]. Совершенствование систем диагностики технического состояния в авиационной промышленности является критически важной задачей для обеспечения безопасности полетов и повышения эффективности эксплуатации авиационного оборудования. Внедрение новых технологий и материалов позволяет создавать более точные и надежные датчики, способные контролировать различные параметры технического состояния сложных объектов: такие как вибрация, температура, давление и т. д. [3]. Системы мониторинга позволяют оперативно получать информацию о состоянии оборудования в режиме реального времени и предсказывать возможные отказы. Специальное программное обеспечение (СПО) является неотъемлемой частью измерительного комплекса, а его алгоритмы строятся на технологиях, реализуемых в системах мониторинга.

## Описание методики использования фазохронометрического подхода применительно к элементам трансмиссии

Вследствие приработки, износа, изменения режимов работы и условий эксплуатации, а также в связи с деградацией технических систем параметры колебательных процессов претерпевают неизбежные изменения, что, в свою очередь, влияет на устойчивость диагностических признаков на всем периоде эксплуатации объекта. На длительных интервалах работы циклических элементов происходит изменение структуры спектров колебательных процессов, а следовательно, теряется основная диагностическая информация, что не позволяет проводить сравнение характеристик для оценки эволюции технического состояния.

В настоящее время задача получения информации об особенностях функционирования циклических машин и механизмов для оценки текущего технического состояния с использованием традиционных подходов остается в полной мере нерешенной. При этом известный фазохронометрический подход [4, 5, 6] позволяет получать устойчивые во времени диагностические признаки на различных этапах ЖЦП циклических элементов конструкции.

Измерительная фазохронометрическая технология сопровождения жизненного цикла элементов трансмиссии состоит из следующих этапов:

- определение перечня диагностируемых параметров и возможных дефектов объекта циклического действия;
- структурное разбиение машины на конструктивные части, критически важные для диагностирования параметров и оценки возможных дефектов;
- анализ рабочего цикла объекта и разбиение его и его элементов на отдельные фазы;
- прецизионные измерения интервалов времени между отрезками фаз рабочего цикла;
- математическое моделирование с целью установления связи результатов измерения с соответствующими фазами цикла путем сравнения полученных данных и смоделированных зависимостей рабочего цикла для частей механизма и их взаимодействия.

Так, модель трансмиссии может быть описана системой дифференциальных уравнений [7, 8]:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + k_1\dot{x} + qx + k(\dot{x} + \dot{\phi}_2y) = qe \cos \varphi_2; \\ m\ddot{y} + k_1\dot{y} + qy + k(\dot{y} - \dot{\phi}_2x) = qe \sin \varphi_2 - mg; \\ J_1\ddot{\phi}_1 + k_{12}(\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) + q_{12}(\phi_1 - \phi_2) = m_1(\dot{\phi}_1); \\ J_2\ddot{\phi}_2 + k_{12}(\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_1) + q_{12}(\phi_2 - \phi_1) = -m_2 + qe(y \cos \varphi_2 - x \sin \varphi_2) - mge \cos \varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где:  $x, y$  – координаты центра тяжести диска в неподвижной системе координат;

$k_1, k$  – коэффициенты внешнего и внутреннего затухания при изгибных колебаниях;

$k_{12}$  – коэффициент затухания при крутильных колебаниях;

$q$  – жесткость вала в точке крепления диска;

$e, J_2, m$  – эксцентриситет, момент инерции и масса диска;

$m_1$  и  $m_2$  – движущий момент и момент сопротивления;

$J_1$  – момент инерции двигателя;

$\varphi_1, \varphi_2$  – углы поворота маховой массы двигателя и диска.

В условиях численного моделирования производные  $\dot{x}, \ddot{x}, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}$  в рассматриваемой модели определяются методом конечных разностей.

Математическая модель является неотъемлемой частью измерительной фазохронометрической технологии. Например, дефекты подшипника сказываются на балансе мощности и вызывают различные изменения угловой скорости вращения.

Частоту вращения тела (шарика)  $f_m$  вокруг своей оси, если вращение вызвано движением внутреннего кольца, можно определить из выражения:

$$f_m = f_{\text{в.к.}} = \left( \frac{d_{\text{ср}}}{d_m} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $f_{\text{в.к.}}$  – частота вращения внутреннего кольца;  $d_m, d_{\text{ср}}$  – диаметр тел качения и средний диаметр подшипника соответственно.

При моделировании работы подшипника с дефектом тела качения ( $d_{\text{ср}} = 85$  мм,  $d_m = 15$  мм,  $f_{\text{в.к.}} = 2800$  мин<sup>-1</sup>) и разбиении одного оборота на  $N=48$  долей в соответствии с формулой (2), можно определить, что тело качения совершил пять оборотов вокруг своей оси за один оборот внутреннего кольца. С учетом двух дорожек качения, вследствие ударов в течение одного оборота, в хронограмме вращения вала будут выделяться 10 пиков. Проведение спектрального анализа позволит найти доминирующую частоту, которая отвечает за возмущения в хронограмме вращения.

Для обеспечения возможности качественного получения результата измерений с помощью ФХМ системы, погрешность применяемых первичных преобразователей должна составлять  $\sim 10^{-7}$  с [9, 10], тогда относительная погрешность датчиков не должна превышать  $2 \cdot 10^{-4}\%$ .

Информация с прецизионных датчиков поступает в блок обработки сигналов измерения интервалов времени. Расположение датчиков обуславливается конструктивными особенностями трансмиссии. Места установки определяются с точки зрения получения наиболее полной информации [11, 12].

Структурная схема измерительной системы на базе ФХМ представлена на рис. 1.

При обработке результатов измерения для оценки текущего технического состояния трансмиссии проводят уточнение величин параметров, входящих в математические модели. За счет имитационного моделирования появляется



Рис. 1. Структурная схема измерительной системы на базе ФХМ

возможность сравнить полученные величины с течением времени и сделать заключение о возможных дефектах.

## Разработка программного обеспечения для обработки и анализа получаемой измерительной информации

В ходе отработки методики фазохронометрического подхода применительно к элементам трансмиссии было разработано программное обеспечение, реализующее специальные алгоритмы обработки данных, получаемых с датчиков. Эти алгоритмы позволяют выявлять неисправности и определять их причины.

Для получения достоверной информации о работе трансмиссии необходимо, чтобы проявляемые диагностические признаки были узнаваемы на различных временных отрезках.

На рис. 2 представлены круговые хронограммы вращения с границами допускаемых значений на холостом ходу

трансмиссии, полученные в различные промежутки времени, отражающие повторяемость результатов измерения на протяжении жизненного цикла.

Данные хронограммы получены с использованием разработанного СПО для обработки данных, написанного на языке программирования python. Оно обеспечивает не только содержательное, но и зрительное восприятие полученной измерительной информации.

При анализе измерительной фазохронометрической информации происходит обработка экспериментальных данных. Разработанное СПО позволяет при анализе хронограмм вращения производить следующие действия:

- фильтрацию;
- сглаживание;
- синхронные накопления;
- автокорреляционную функцию (АКФ);
- спектр АКФ.

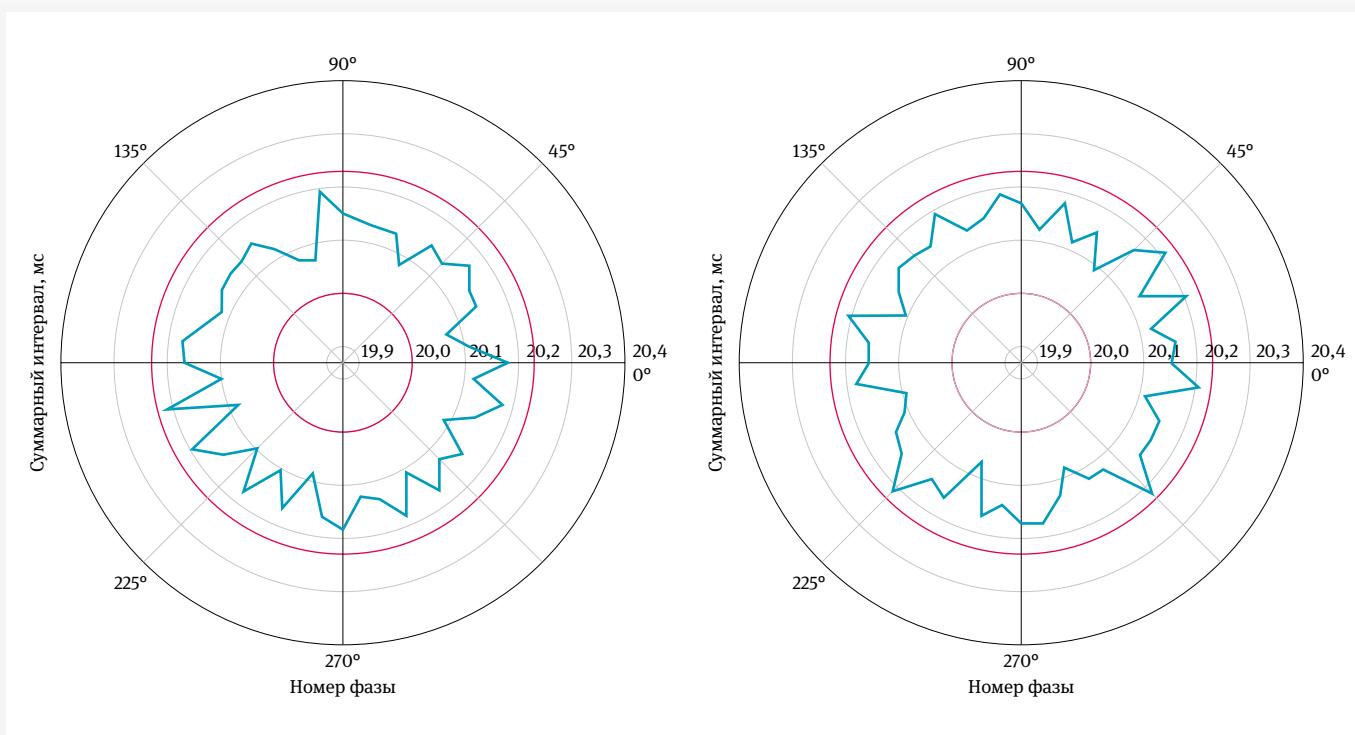


Рис. 2. Круговые хронограммы вращения

**Таблица 1.** Сравнение частот спектров

№	Датчик № 1 <i>M=0 кгс</i>		Датчик № 1 <i>M=80 кгс</i>		Датчик № 2 <i>M=0 кгс</i>		Датчик № 2 <i>M=80 кгс</i>	
	Ψ, Гц	Ампл.	Ψ, Гц	Ампл.	Ψ, Гц	Ампл.	Ψ, Гц	Ампл.
1	18,29401	6,651272	18,54646	5,55005	18,0322	2,787905	18,09695	5,522496
2	38,62069	1,907275	37,09292	1,375929	36,0644	3,457926	36,1939	2,317062
3	48,78403	8,24146	47,3965	0,717007	46,08229	23,65633	46,24776	21,96638
4	-	-	-	-	94,16816	8,980966	92,49551	4,674806
5	140,2541	5,863601	140,1288	2,384894	140,2504	3,949322	140,754	3,362201
6	-	-	-	-	186,3327	1,396152	187,0018	3,015292
7	233,7568	3,860346	232,8611	3,257928	232,415	10,83087	233,2496	14,47209
8...								

При сглаживании необходимо задать количество точек, по которым будет производиться усреднение. Новое значение хронограммы вычисляется по формуле:

$$\bar{\Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{n}, \quad (3)$$

где *n* – количество точек усреднения.

При вычислении синхронных накоплений суммируются значения одноименных фаз от оборота к обороту. Так, по *j*-ой фазе суммарные накопления определяются по формуле:

$$\Delta t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \Delta t_{i:k+j}, \quad (4)$$

где *k* – число фаз, *m* – число циклов.

Вычисление автокорреляционной функции осуществляется по формуле:

$$\hat{r}_{\tau} = \frac{\sum_{t=\tau+1}^T (\Delta t_t - \bar{\Delta t})(\Delta t_{t-\tau} - \bar{\Delta t})}{\sum_{t=1}^T (\Delta t_t - \bar{\Delta t})^2}, \quad (5)$$

где *T* – интервал, на котором вычисляется АКФ, *τ* – лаг.

После вычисления хронограммы можно вычислить спектр АКФ. Вычисление спектра именно АКФ, а не

**Таблица 2.** Сравнение частот спектра АКФ

№	Ψ, Гц					
	<i>M=0 кгс</i>	<i>M=40 кгс</i>	<i>M=80 кгс</i>	<i>M=120 кгс</i>	<i>M=160 кгс</i>	<i>M=200 кгс</i>
1	45,16957	47,17949	47,17949	45,12821	45,12821	47,17949
2	57,48854	57,4359	57,4359	57,4359	57,4359	57,4359
3	114,9771	114,8718	114,8718	114,8718	114,8718	114,8718
4	229,9542	229,7436	229,7436	229,7436	229,7436	229,7436
5	287,4427	287,1795	287,1795	287,1795	287,1795	287,1795
6...						

хронограммы, позволяет убрать из данных случайный шум. Для нахождения вещественного спектра применяется дискретное преобразование Фурье.

Использование разработанного программного обеспечения для анализа спектров крутильных колебаний, полученных от сигналов со стенда в отсутствие внешних воздействий, позволило выявить основные частоты, связанные с конструкцией трансмиссии и ее функционированием (табл. 1). Сравнение частот спектров, получаемых с датчиков до и после редуктора, дает возможность оценить его техническое состояние за счет проявления в спектре частот, характерных для особенностей его работы (строки 4, 6 табл. 1).

СПО для фазохронометрической системы позволило оценить повторяемость результатов измерения. Проведенный анализ спектров показал хорошее (в пределах 0,15%) совпадение спектральных максимумов. Что свидетельствует о высоком уровне повторяемости результатов измерения даже разнесенных по времени экспериментов (табл. 2).

Метрологический уровень фазохронометрической системы выявил на круговых хронограммах, полученных на стенде в отсутствие внешних воздействий, неравномерность вращения, связанную с конструкцией трансмиссии и ее функционированием.

## Заключение

Совершенствование систем диагностики технического состояния в авиационной промышленности является неотъемлемой частью развития отрасли. Улучшение датчиков и систем мониторинга, разработка алгоритмов обработки данных, применение прогнозирующего обслуживания и использование дистанционного мониторинга – все это способствует повышению безопасности полетов и эффективности эксплуатации авиационного оборудования.

Разработана измерительная фазохронометрическая технология сопровождения жизненного цикла элементов трансмиссии летательных аппаратов.

В работе представлены основные элементы разработанного специального программного обеспечения для определения диагностируемых параметров и возможных дефектов на примере стенда трансмиссии.

Показано, что сочетание анализа рабочего цикла объекта исследования, прецизионные измерения интервалов времени, соответствующих фазам рабочего цикла и математическое моделирование позволяют установить связь результатов измерения с соответствующими фазами цикла для элементов трансмиссии. Метрологический уровень разработанной фазохронометрической системы обеспечивает получение параметров, влияющих на изменение параметров конструкции трансмиссии и ее функционирования.

## Литература

1. **Ларькина Ю. В.** Инновационные подходы к обеспечению авиационной безопасности: анализ и перспективы // Актуальные исследования. 2024. № 6 (188). Ч. I. С. 35–38.
2. **Якунина А. А.** Искусственный интеллект и цифровизация в авиации // Colloquium-Journal. 2022. № 29–1(152). С. 57–59.
3. **Адамов А. П., Адамова А. А., Семенцов С. Г.** Современные материалы в конструкции датчиков для аэрокосмических аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 1. С. 67–75.
4. **Киселев М. И., Пронякин В. И.** Фазовый метод исследования циклических машин и механизмов на основе хронометрического подхода // Измерительная техника. 2001. № 9. С. 15–18.
5. **Киселев М. И.** Прогнозирование техногенных катастроф: применение фазохронометрического подхода // Стандарты и качество. 2013 № 10. С. 56–59.
6. **Киселев М. И., Комшин А. С., Матвеев В. А.** Система информационно-метрологического сопровождения объектов энергетики страны на базе спутниковой группировки // Наукоемкие технологии. 2017. Т. 18. № 6. С. 68–72.
7. **Филипов А. П.** Колебания деформируемых систем. М.: Машиностроение, 1970. 736 с.
8. **Киселев М. И., Комшин А. С., Матвеев В. А.** Система информационно-метрологического сопровождения объектов энергетики страны на базе спутниковой группировки // Наукоемкие технологии. 2017. Т. 18. № 6. С. 68–72.
9. **Пронякин В. И.** К вопросу оценки результатов измерений и их обработки в целях получения информации о функционировании машин и механизмов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 5(674). С. 74–83.
10. **Пронякин В. И.** Проблемы диагностики циклических машин и механизмов // Измерительная техника. 2008. № 10. С. 9–13.
11. **Позднякова Е. Д.** Современная концепция реализации измерительной технологии сопровождения эксплуатации летательных аппаратов // Приборы. 2023. № 10. С. 40–46.
12. **Метелкина Е. Д.** Система диагностирования технического состояния углового редуктора // Приборы. 2016. № 11. С. 14–20.

## Авторы

**Позднякова Екатерина Дмитриевна** – старший преподаватель кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н. Э. Баумана

**Потапов Константин Геннадьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н. Э. Баумана



# ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Формат 60x90/8

Пронякин В.И.

## Технологичность и метрологичность простановки размеров на чертежах. Практическое пособие

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 276 с.

ISBN 978-5-94836-646-3

### Рецензент

Кафедра «Теория механизмов и машин»  
факультета «Робототехника и комплексная  
автоматизация» МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Цена 2600 руб.**

В книге представлены основы конструирования в машиностроении и приборостроении в части обеспечения технологичности и метрологичности простановки размеров на чертежах.

Сформулированы основные правила простановки размеров при конструировании цилиндрических и призматических деталей. В практической части особое внимание уделено технологичности и метрологичности простановки размеров, системам простановки размеров линейных и криволинейных поверхностей, а также взаимосвязанных требований к выбору баз, назначению шероховатости и отклонений формы и расположения поверхностей деталей.

Представлен способ проверки наличия всех размеров на чертеже. Представлены исторические справки. В книге даны многочисленные примеры с объяснениями.

Книга предназначена студентам средних и высших учебных заведений по направлениям подготовки 15.00.00 «Машиностроение», 12.00.00 «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии», 16.00.00 «Физико-технические науки и технологии», а также конструкторам, технологам, метрологам, преподавателям, специалистам, работающим с конструкторской документацией.

### Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91  
По факсу: (495) 956-33-46  
E-mail: knigi@technosphera.ru  
sales@technosphera.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ  
[www.technosphera.ru](http://www.technosphera.ru)



**ТЕХНОСФЕРА**  
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

**100% ГАРАНТИЯ  
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ**



Стоимость 2200 р. за номер  
Периодичность: 10 номеров в год  
[www.electronics.ru](http://www.electronics.ru)



Стоимость 1450 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.photonics.su](http://www.photonics.su)



Стоимость 1450 р. за номер  
Периодичность: 6 номеров в год  
[www.j-analytics.ru](http://www.j-analytics.ru)

# ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

[www.technosphera.ru](http://www.technosphera.ru)



Стоимость 1300 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.lastmile.su](http://www.lastmile.su)



Стоимость 1300 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.nanoindustry.su](http://www.nanoindustry.su)



Стоимость 1800 р. за номер  
Периодичность: 4 номера в год  
[www.stankoinstrument.su](http://www.stankoinstrument.su)