

УДК 621.12

**ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИНЕРЦИАЛЬНОЙ ОСИ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА*****И. А. ОСАДЧИЙ, В. А. ЛИПНИЦКИЙ***Военная академия Республики Беларусь  
Минск, Беларусь

UDC 621.12

**FORMATION OF DIAGNOSTIC PARAMETERS ON BASIS  
OF ANALYSIS OF INERTIAL AXIS OF SHAFT'S ROTATION*****I. A. OSADCHIY, V. A. LIPNITSKY***

**Аннотация.** В работе дано обоснование использования приведенного мгновенного центра вращения для диагностирования машин с вращающимися элементами. Предложен новый способ получения диагностических параметров объекта на основе анализа динамики инерциальной оси вращения вала в его поперечной плоскости. Перечислены преимущества оценки вибрационного состояния объекта на основе анализа динамики его приведенного мгновенного центра вращения.

**Ключевые слова:** диагностический параметр, инерциальная ось, мгновенный центр вращения.

**Abstract.** In work justification of use of the given instant center of rotation for diagnosing of cars with the rotating elements is given. The new way of obtaining diagnostic parameters of an object on basis of dynamics's analysis of an inertial axis of shaft's rotation in its orthogonal plane is offered. Advantages of assessment of an object's vibration condition on basis of its dynamics's analysis given instant center of rotation are listed.

**Key words:** diagnostic parameter, inertial axis, instant center of rotation.

***Введение***

Методы вибродиагностики нашли наиболее широкое применение для машин с вращающимся ротором. Различные дефекты элементов этих изделий проявляются по-разному, поэтому диагностические технологии должны быть «избыточными» в отношении применения комплекса различных по физической сути методов и приемов неразрушающего контроля, которые бы дополняли друг друга для обеспечения максимальной гарантии качества изделия [1].

Информацию о техническом состоянии объектов получают по параметрам выходных сигналов датчиков вибраций. Достоинства и недостатки наиболее распространенных методов исследования вибраций достаточно полно рассмотрены в [2, 3].

В [2, 4, 5] показано, что многие задачи вибродиагностики решаются с помощью графических представлений параметров вибраций. Одним из таких графических представлений является орбита вращения вала, которая

достаточно хорошо характеризует изменение положения оси вращения вала [6]. Один из недостатков графика орбиты вала связан с тем, что при его построении не учитывается разница моментов инерции в разных контрольных точках и вдоль параллельных осей чувствительности датчиков. Это приводит к искажению реальной орбиты вала и, как следствие, к ошибкам диагностирования. Кроме того, вектор виброперемещений, как линейная характеристика движения, не в полной мере характеризует кинетическую энергию вращательного движения вала. Поэтому с целью устранения указанных недостатков в данной работе предлагается новый способ получения диагностических параметров объекта на основе анализа динамики инерциальной оси вращения вала в его поперечной плоскости.

### ***Обоснование предлагаемого представления вибраций***

Из теоремы Эйлера о конечном перемещении следует, что произвольное движение закрепленного в некоторой точке твердого тела в каждый момент времени движения может быть представлено как вращение этого тела вокруг мгновенной оси, проходящей через данную точку [7]. При сложном движении твердого тела его полная кинетическая энергия может быть представлена как сумма кинетической энергии поступательного и вращательного движений [8]. С учетом теоремы Эйлера полную кинетическую энергию представим как сумму кинетической энергии вращательного движения и кинетической энергии вращательного движения, вызванного поступательным:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} = \frac{m(\omega_l r)^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} = \frac{J_l \omega_l^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}, \quad (1)$$

где  $v_c$  – скорость поступательного движения тела (центра масс);  $m$  – масса тела;  $r$  – радиус вращательного движения тела;  $J$  – момент инерции тела относительно мгновенной оси вращения, проходящей через центр масс;  $\omega$  – угловая скорость вращения тела;  $J_l$  – момент  $J$  инерции тела, обусловленный описанием линейного перемещения вращательным;  $\omega_l$  – угловая скорость  $\omega$  вращения тела, обусловленная описанием линейного перемещения вращательным.

Из формулы (1) видно, что линейная характеристика движения не в полной мере характеризует кинетическую энергию вращательного движения вала. Поэтому сложное движение тела предпочтительней описывать множеством его вращательных перемещений.

Вал в подшипниковых опорах имеет три оси: геометрическую, инерциальную и ось вращения. В идеальном случае все три оси должны

совпадать, иначе возникают вибрации, которые характеризуют различные негативные явления (например, расцентровку вала). Положение геометрической оси определяется геометрическими соотношениями конструктивных элементов объекта. Положение оси вращения определяют при построении орбиты вращения вала. Положение инерциальной оси определяют расчетным путем на этапе разработки конструкции изделия. В процессе эксплуатации положение данной оси по объективным причинам изменяется и уже не соответствует расчетным. Поэтому предлагается положение инерциальной оси определять по параметрам выходных сигналов датчиков вибраций. Суть данного предложения сводится к определению параметра, аналогичного мгновенному центру вращения (далее – МЦВ), – приведенного МЦВ (далее – ПМЦВ). Под ПМЦВ будем понимать точку закрепления тела, относительно которой оно поворачивается на некоторый пространственный угол с вершиной в данной точке, неподвижной в рассматриваемом промежутке времени. Наиболее значимым отличием ПМЦВ от МЦВ является то, что положение ПМЦВ может не принадлежать диагностируемому объекту.

### ***Алгоритм определения диагностических параметров***

Алгоритм определения диагностических параметров объекта на основе анализа динамики ПМЦВ заключается в следующем.

- 1 Установка на исследуемом объекте двух вибродатчиков, имеющих две (три) чувствительные оси.
- 2 Предварительная обработка измеренных вибрационных сигналов: усиление, фильтрация, выделение информативных компонентов.
- 3 Анализ спектра вибросигналов и определение информативных частот (частоты собственных резонансов конструкции, рабочие частоты деталей изделия, а также кратные им частоты).
- 4 Вычисление ПМЦВ объекта на каждой из информативных частот относительно положения одного из датчиков.
- 5 Построение траекторий динамики ПМЦВ, которая в общем случае имеет форму эллипса (рис. 1). Отклонение траектории динамики ПМЦВ от эталонной (для исправного изделия) свидетельствует о нарушении работы диагностируемого объекта. Различия между данными траекториями определяют совокупность информативных параметров, которые характеризуют техническое состояние объекта.
6. Расчет диагностических параметров, характеристика которых приведена в табл. 1.

Расчет основных параметров траекторий ПМЦВ, характеризующих техническое состояние объекта, приведен в [9]. В настоящее время ведется работа по экспериментальному исследованию граничных условий

применения данных параметров в процессе диагностирования машин с вращающимися элементами.

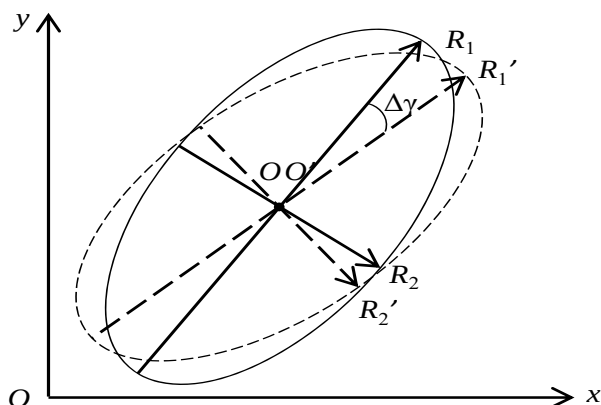


Рис. 1. Траектории динамики координаты ПМЦВ эталонного (сплошная) и диагностируемого (пунктир) объектов

Табл. 1. Параметры траекторий ПМЦВ и их характеристика

| Диагностический параметр                                                          | Описание                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Существенное изменение размеров главных осей эллипса $R_1, R_2$                   | На одной опоре характеризует неисправность опорной системы. На обеих опорах примерно в равных долях характеризует радиальную расцентровку вала. Разность углов эллипсов в $180^\circ$ характеризует наличие угловой расцентровки                                                                                                                                                                                                                                     |
| Соотношение между главными осями эллипса $R_1, R_2$                               | Характеризует неравномерность колебаний вала в опорах подшипника. Увеличение отношения $R_1/R_2$ характеризует наличие радиальной расцентровки вала. Отношение $R_1/R_2$ , близкое к единице, характеризует статический дисбаланс. Существенное уменьшение отношения $R_1/R_2$ характеризует проявление динамического дисбаланса вала                                                                                                                                |
| Изменение угла наклона $\Delta\gamma$ большой оси эллипса                         | Существенное изменение угла $\Delta\gamma$ характеризует наличие прецессии вала за счет его разбалансировки, искривления, угловой либо радиальной несоосности, а также неисправностей опорной системы объекта и подшипникового узла                                                                                                                                                                                                                                  |
| Разность углов наклона $\gamma$ эллипсов ПМЦВ в параллельных плоскостях измерений | При существенном изменении размеров эллипса совпадение углов характеризует статический дисбаланс вала. Разность углов в $180^\circ$ характеризует наличие чисто динамического дисбаланса, а угловая разность в $90^\circ$ определяет наличие статического и динамического дисбаланса примерно в равных долях. Незначительная угловая разность и существенные изменения параметров эллипса ПМЦВ в одной из плоскостей характеризует неисправность подшипникового узла |
| Неравномерность угловой скорости перемещения ПМЦВ                                 | Неравномерность угловой скорости ПМЦВ на оборотной частоте вала в одних и тех же точках характеризует скольжение кинетической оси вала в результате неравномерного воздушного зазора, а также качества смазки подшипникового узла                                                                                                                                                                                                                                    |

На основе использования разработанной методики анализа ПМЦВ [9] в Научно-техническом центре комбайностроения ОАО «Гомсельмаш» были проведены вибрационные испытания опор коленчатых валов соломотряса зерноуборочного комбайна. В ходе эксперимента, в частности, были определены величины углов отклонений осей коленчатых валов от параллельности, что позволило предложить ряд рекомендаций по регулировке наиболее нагруженных элементов соломотряса [10]. Получен положительный эффект, который заключается в сокращении времени на доводку элементов клавишного соломотряса. По предварительным расчетам экономия трудозатрат на доводку одного опытного образца зерноуборочного комбайна составляет от 100 до 200 н. ч. в год (в зависимости от модели комбайна).

На ОАО «2566 завод по ремонту радиоэлектронного вооружения» проведены исследования вибраций электромашинного преобразователя ПСЧ-50. В результате исследования динамики ПМЦВ получены новые диагностические признаки, которые позволили определить вид и степень несоосности валов генератора и асинхронного двигателя. Было установлено снижение трудозатрат при проведении выходного контроля и текущего ремонта ПСЧ-50.

### ***Выводы***

Таким образом, в данной работе дано обоснование использования ПМЦВ для диагностирования машин с вращающимися элементами. Предложен алгоритм получения диагностических параметров на основе анализа динамики ПМЦВ, который может быть получен по выходным сигналам датчиков вибрации.

Анализ динамики ПМЦВ может выполняться одновременно с другими методами диагностирования объекта (например, методами спектрального анализа вибросигнала). Такая возможность реализуется на основе использования единой измерительной системы датчиков, что позволяет объективно сравнивать результаты двух методов и, соответственно, повысить достоверность диагностирования объекта.

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали наличие положительного экономического эффекта: снижение трудозатрат на проведение выходного контроля механизмов с вращающимися элементами. Данный эффект достигается за счет упрощения анализа вибрационного состояния объекта, наглядности и простоты интерпретации траекторий ПМЦВ.

Дальнейшие исследования в этой области будут направлены на разработку частных методик технического диагностирования объектов и методик контроля их технического состояния в процессе эксплуатации и ремонта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В. В. Клюев, [и др.]; под ред. В. В. Клюева. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Машиностроение, 2003. – 656 с.
2. **Барков, А. В.** Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учебное пособие / А. В. Барков, Н. А. Баркова. – Санкт-Петербург: СПбГМТУ, 2004. – 156 с.
3. **Калинов, А. П.** Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей / А. П. Калинов, О. В. Браташ // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2012. – № 5. – С. 44–52.
4. **Денисюк, Ю. Ю.** Вибродиагностирование электрических машин в условиях помех и неопределенностей / Ю. Ю. Денисюк // Вестн. Гомельского гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2011. – № 3 (46). – С. 57–65.
5. Crank Identification of the Rotary Kiln Based on WTD-EEMD Using Vibration Monitoring of the Supporting Rollers / K. Zheng [et al.] // Engineering Letters. – 2016. – Vol. 24, iss. 4. – P. 429–440.
6. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на вращающихся валах. Общие требования: ГОСТ ИСО 7919-1–2002. – перев. Междунар. стандарта ISO 7919-1–1996; введ. РФ 01.11.07. – Москва: Стандартиформ, 2007. – 20 с.
7. **Яблонский, А. А.** Курс теоретической механики: учебник для вузов / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. – Москва: Интеграл-пресс, 2006. – 608 с.
8. **Никитин, Н. Н.** Курс теоретической механики: учебник для машиностроит. и приборостроит. специальностей вузов / Н. Н. Никитин. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 1990. – 607 с.
9. **Осадчий, И. А.** Методика вибрационного контроля вращающихся механизмов по динамике их мгновенного центра вращения / И. А. Осадчий // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2018. – № 35. – С. 116–125.
10. Методика диагностики соломотряса зерноуборочного комбайна в процессе его доводки / И. А. Осадчий [и др.] // Агропанорама, БГАТУ. – 2018. – № 3. – С. 5–9.

E-mail авторов: igor-2105@yandex.ru.