

шины со ступенчатой механической трансмиссией эффективным методом минимизации силовой функции является диссипация внутренней энергии с помощью разрыва потока мощности, передаваемой к ведущим колесам. При отсутствии проскальзывания колес и резонансных частот колебаний силовых факторов, реализуемых ведущими колесами, средствами диссипации энергии являются фрикционные механизмы привода: главное сцепление, муфты привода дополнительных мостов. Поэтому, алгоритм управления режимами движения полноприводных колесных машин должен предусматривать формирование сигналов управления этими исполнительными механизмами при обнаружении установленного уровня силовой функции.

Таким образом, методология проектирования эффективных систем автоматического управления приводами и силовыми агрегатами полноприводных колесных машин предусматривает два уровня формирования сигналов управления. Первый уровень включает многофакторный анализ, состоящий из частотного анализа силовых факторов и их производных, анализа силовой функции внутреннего энергетического состояния привода ходовой системы и оценки распределения весовых нагрузок и касательных сил по колесам, мостам и бортам машины. Второй уровень заключается в поиске наиболее эффективного исполнительного механизма привода, воспринимающего сигналы управления.

УДК 621.376

А.В. Сергеев

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ВИБРОСИГНАЛЫ, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ ПОДШИПНИКАМИ КАЧЕНИЯ

*НИИ прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко
Минск, Беларусь*

Техническое состояние подшипниковых узлов в значительной мере определяет безаварийную эксплуатацию машин и механизмов. Виброакустическая диагностика позволяет осуществлять безразборный контроль подшипников на всех стадиях их жизненного цикла: проектирования, изготовления, эксплуатации и ремонта. Это достигается за счет того, что виброакустический сигнал (ВС), создаваемый при работе подшипника содержит информацию о всех отклонениях от нормальных режимов работы, обусловленных различными дефектами. При разработке диагностических экспертных систем (ДЭС) необходимо иметь ВС, соответствующие определенным диагностическим состояниям (ДС), обусловленным различными дефектами подшипниковых узлов. ВС, возбуждаемые различными дефектами можно использовать для обу-

чения ДЭС. Очевидно, что в реальных условиях для того, чтобы установить какие типы дефектов возбуждают измеряемый ВС необходимо разобрать подшипник. Данную процедуру можно реализовать лишь при плановом ремонте оборудования. Поэтому представляет интерес моделировать ВС от различных дефектов для исследуемого типа подшипников с помощью ПЭВМ. Однако сведения о математических моделях ВС, порождаемых дефектами подшипников качения содержатся в различных источниках и иногда оказываются противоречивыми. В связи с этим возникает необходимость обобщить имеющиеся результаты и представить их в виде удобном для моделирования на ПЭВМ, что и является целью данной работы.

Математические модели, описывающие ВС, возбуждаемые дефектами изготовления, сборки и износа даны в работах [1-6]. В дальнейшем будем рассматривать шариковые подшипники (ШП), характеризуемые следующими параметрами: d – диаметр шарика, D – диаметр окружности, проходящей через центры тел качения, N – число шариков, θ – угол контакта шариков и дорожек качения, f_p – частота вращения ротора, $f_c = [1 - (d \cos \theta) / D] f_p / 2$ – частота вращения сепаратора, $f_H = f_c N$ – частота вращения сепаратора относительно наружного кольца подшипника, $f_B = (f_p - f_c) N$ – частота вращения сепаратора относительно внутреннего кольца подшипника, $f_w = [1 - (d \cos \theta / D)^2] D f_p / 2d$ – частота вращения шарика вокруг собственной оси, $f_K = f_c (\cos \theta + D/d)$ – частота контакта точки шарика с одной из дорожек качения. Дальнейшее рассмотрение будем проводить, предполагая действие на ШП осевой и радиальной нагрузок, что имеет место, например, при горизонтальном положении электрической машины [5]. Наружное кольцо ШП неподвижно, а внутреннее вращается. Обычно считают, что ВС возбуждаются тремя основными типами дефектов ШП: изготовления, сборки и износа. Расспариваемые ВС представляют собой виброускорения. Дефекты изготовления, обусловленные наличием волнистости колец и шариков, приводят к возникновению :

- эксцентриситета наружного и внутреннего колец;
- овальности и гранности дорожек качения;
- отклонению формы шариков от сферической.

Амплитуды гармоник волнистости наружного и внутреннего колец определяют наличие эксцентриситетов. Для наружного кольца эксцентриситет представляет собой радиальное смещение δ , центра наружного кольца относительно центра внутреннего кольца под действием радиальной нагрузки. Для внутреннего кольца эксцентриситет определяется как смещение центра желоба дорожки качения относительно главной центральной оси инерции ротора [3]. В табл. 1 приведены выражения для расчетов ВС порождаемых дефектами изготовления ШП.

Таблица 1

Вибросигналы, возбуждаемые дефектами изготовления подшипников

Тип дефекта	Тип нагрузки	Вибросигнал
1. Эксцентриситет наружного кольца	Осевая	$S_1(t) = N \sum_i a_i \cos(2\pi f_i t)$, где $f_i = f_H - if_B$, $i = kN - 1, k = 1, 2, \dots$
2. „ „	Радиальная	$S_2(t) = N [\sum_i a_i^{(1)} \cos(2\pi f_i^{(1)} t) + \sum_i a_i^{(2)} \cos(2\pi f_i^{(2)} t)]$ где $f_i^{(1)} = 2f_H - if_B , i = kN - 2;$ $f_i^{(2)} = if_B, i = kN, k = 1, 2, \dots$
3. Эксцентриситет внутреннего кольца	Осевая	$S_3(t) = N [\sum_n a_n^{(1)} \cos(2\pi f_n t) + \sum_n a_n^{(2)} \cos(2\pi f_n t)]$, где $f_1 = nf_H - f_B , n = kN - 1,$ $f_2 = nf_H + f_B, k = 1, 2, \dots$
4. „ „	Радиальная	$S_4(t) = N \sum_k a_k \cos(2\pi f_k t)$, где $f_k = (kN - 1)f_H - f_B , k = 1, 2, \dots$
5. Отклонение формы шариков от сферической	Осевая	$S_5(t) = (1/N^{1/2}) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(4\pi n f_w t)$
6. „ „	Радиальная	$S_6(t) = (1/N^{1/2}) \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} [A_n^{(1)} \sin(2\pi f_1 t) + A_n^{(2)} \sin(2\pi f_2 t)] \right\}$ где $f_1 = 2nf_w - f_H, f_2 = 2nf_w + f_H$
7. Эллипсность наружного кольца	Осевая	$S_7(t) = (N/4) \sum_i A_i \cos(2\pi f_i t)$, где $f_i = 2f_H - if_B, i = kN - 2, k = 1, 2, \dots$
8. „ „	Радиальная	$S_8(t) = (N/4) \left\{ \sum_i A_i^{(1)} \cos(2\pi f_i^{(1)} t) + \sum_i A_i^{(2)} \cos(2\pi f_i^{(2)} t) \right\}$ где $f_i^{(1)} = 3f_H - if_B, i = kN - 3;$ $f_i^{(2)} = f_H - if_B, i = kN - 1, k = 1, 2, \dots$

Тип дефекта	Тип нагрузки	Вибросигнал
9. Эллипсность внутреннего кольца	Осевая	$S_9(t) = (N/4) \left[\sum_n A_n^{(1)} \cos(2\pi f_1 t) + \sum_n A_n^{(2)} \cos(2\pi f_2 t) \right],$ <p>где $f_1 = \pi f_H - 2f_B$, $n = kN - 2$; $f_2 = \pi f_H + 2f_B$, $k = 1, 2, \dots$</p>
10. _____	Радиальная	$S_{10}(t) = (N/4) \sum_k A_k \cos(2\pi f_k t),$ <p>где $f_k = (kN - 2)f_H - 2f_B$, $k = 1, 2, \dots$</p>
11. Трехгранность наружного кольца	Осевая	$S_{11}(t) = (N/9) \sum_n A_n \cos(2\pi f t),$ <p>где $f = 3f_H - \pi f_B$, $n = kN - 3$, $k = 1, 2, \dots$</p>
12. _____	Радиальная	$S_{12}(t) = (N/9) \left[\sum_i A_i^{(1)} \cos(2\pi f_i t) + \sum_i A_i^{(2)} \cos(2\pi f_2 t) \right],$ <p>где $f_1 = 4f_H - f_B$, $i = kN - 4$; $f_2 = 2f_H - f_B$, $i = kN - 2$, $k = 1, 2, \dots$</p>
13. Трехгранность внутреннего кольца	Осевая	$S_{13}(t) = (N/9) \left[\sum_n A_n^{(1)} \cos(2\pi f_1 t) + \sum_n A_n^{(2)} \cos(2\pi f_2 t) \right],$ <p>где $f_1 = \pi f_H - 3f_B$, $n = kN - 3$, $f_2 = \pi f_H + 3f_B$, $n = kN + 3$, $k = 1, 2, \dots$</p>
14. _____	Радиальная	$S_{14}(t) = (N/9) \sum_k A_k \cos(2\pi f t),$ <p>где $f = (kN - 3)f_H - 3f_B$, $k = 1, 2, \dots$</p>

Символы \sum_n , \sum_n означают, что суммирование производится по значениям n , через которые определяют частоты f_1 , f_2 . Выражения для амплитуд в разложениях ВС $S_m(t)$, $m = \overline{1,4}$ определяются с помощью следующего выражения $a_n = \delta_r (2\pi f_n / n)^2$, где $\delta_r = 0,1$ мкм. Для амплитуд ВС $S_m(t)$, $m = \overline{5,6}$ создаваемых из-за отклонения фор-

мы шариков от идеальной имеем $A_n = \delta_m (2\pi f_n / n)^2$, где $\delta_m = 0,1$ мкм. Амплитуды, входящие в разложения ВС $S_m(t)$, $m = \overline{7,14}$ вычисляются следующим образом: для наружных колец $A_n = \delta_H (2\pi f_n / n)^2$, где $\delta_H = (0,3 + 2,5)$ мкм, а для внутренних колец $A_n = \delta_B (2\pi f_n / n)^2$, где $\delta_B = (0,3 + 5,0)$ мкм. Значения δ_H , δ_B зависят от типа ШП. Задавая различные значения коэффициентов δ , δ_H , δ_B , δ_m можно изменять степень влияния дефектов.

Следующий важный источник вибраций – дефекты сборки, поскольку нередко даже высокоточные ШП с хорошим техническим состоянием после сборки в машине вызывают значительные вибрации. Основная причина этих явлений – перекопность колец подшипников, обусловленная погрешностями их монтажа и изготовления сопряженных с ними деталей. Дефекты сборки приводят к повышенному износу деталей ШП, в результате чего возникают несколько одновременно действующих дефектов, что приводит к возбуждению ВС описываемых многократно амплитудно-модулированными сигналами разных частот. Мы ограничимся рассмотрением однократной амплитудной модуляции, приводящей к возбуждению ВС следующего вида:

$$V(t) = [1 + Gm(t)]S(t), \quad \text{где} \quad m(t) = \sum_n B_n \sin(2\pi f_m t) \quad \text{-модулирующий сигнал,}$$

$S(t) = \sum_k C_k \sin(2\pi f_s t)$ - модулируемый сигнал, f_m , f_s - частоты модулирующего и модулируемого сигналов, $f_m < f_s$, G - глубина модуляции. В табл. 2 приведены соотношения, описывающие дефекты перекося [6], при радиальной нагрузке на ШП.

Таблица 2

Соотношения, определяющие вибросигналы, возбуждаемые дефектами сборки подшипниковых узлов

Тип дефекта	Модулирующий сигнал	Модулируемый сигнал
1. Перекос наружного кольца	—	$S_1(t) = \sum_k C_k \sin(2\pi k N f_c t)$
2. Перекос внутреннего кольца	$m_2(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(2\pi n f_p t)$	$S_2(t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(2\pi k f_b t)$
3. Одновременный перекося обоих колец	$m_3(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(2\pi n f_p t)$	$S_3(t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(2\pi k N f_c t)$

Амплитуды гармоник в разложениях из табл. 2 описываются следующими выражениями $B_n = (2\pi f_n / n)^2$, $C_k = (2\pi f_s / k)^2$. И наконец, в табл. 3 приведены соотношения,

описывающие ВС, возбуждаемые дефектами износа и сборки ШП при осевой нагрузке.

Таблица 3

Соотношения, определяющие вибросигналы, возбуждаемые дефектами сборки и износа подшипников при перекосе наружного кольца

Типы дефектов	Модулирующий сигнал	Модулируемый сигнал
1. Неравномерный износ тел качения	$m_1(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(2\pi n f_c t)$ —	$S_1(t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(2\pi k f_H t)$ $S_{11}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(2\pi k f_c t)$
2. Сколы тел качения	$m_2(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(2\pi n f_c t)$ —	$S_2(t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(2\pi k f_K t)$ $S_{21}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(2\pi k f_K t)$
3. Раковина, трещина на наружном кольце	—	$S_3(t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(2\pi k f_H t)$
4. Раковина, трещина на внутреннем кольце	$m_4(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(2\pi n f_p t)$ —	$S_4(t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(2\pi k f_B t)$ $S_{41}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(2\pi k f_B t)$

Результаты, приведенные в табл. 1-3 позволяют моделировать с помощью ПЭВМ ВС, возбуждаемые наиболее часто встречающимися дефектами ШП. Эти ВС можно использовать для предварительного обучения ДЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бальмонт В. Б., Сарычева Е. П. Вибрация подшипников шпинделей станков.- М.: НИИМаш., 1984.-64с. 2. Александров А. А., Барков А. В. и др. Вибрация и вибродиагностика судового электрооборудования.-Л.: Судостроение, 1986.-276с. 3. Журавлев В. Ф., Бальмонт В. Б. Механика шарикоподшипниковых гироскопов.- М.: Машиностроение, 1985.-272с. 4. Авакян В. А. Диагностика источников вибрации машин с учетом амплитудной модуляции//Электротехника.-1978.-№ 2.-С.58-61. 5. Волков Л. К., Ковалев Р. Н. и др. Вибрации и шум электрических машин малой мощности.-Л.:

УДК 621.88.084

А. Т. Скойбеда, Д. Эльмессауди

МОМЕНТ ТРЕНИЯ И УПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ПОДШИПНИКАХ КАЧЕНИЯ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Повышение надежности и долговечности подшипников качения во многом зависит от улучшения качества поверхностного слоя деталей подшипников.

Физико-механические свойства поверхностного слоя связаны с величиной контактных напряжений и рабочей температурой, с величиной остаточных напряжений, микротвердостью, а также со степенью пластической деформаций металла в поверхностном слое, что является следствием технологических процессов изготовления деталей, методов и режимов обработки.

Контакт шариков с дорожками качения колец подшипников происходит на эллиптических площадках, полуоси которых определяют по уравнениям Герца.

Момент трения на эллиптической площадке в прямоугольных координатах [1].

$$M_{тр} = \frac{6P}{\pi a} \frac{v(n)}{v(n)} \frac{f_0}{b} \int_s \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} \rho ds. \quad (1)$$

Можно предположить, что площадь контакта между шариками и дорожками качения неодинакова, т.е. оно зависит от неравномерность распределения микротвердости, напряжения в микрообъемах и т.д. Это объясняется тем, что при тонкой обработке (шлифование, полирование) удаляются лишь наиболее интенсивно наклепанные слои, а значительная часть наклепа все же остается. В работе [2] отмечается, что при шлифовании стали ШХ15 часто образуются две различные зоны структурного состояния: первая зона вторичной закалки, имеющая аустенитно-мартенситную структуру и вторая зона состоящая из феррита, остаточного аустенита и цементита. Кроме того, не удачное проведение термических операций обуславливает наличие повышенного содержания остаточного аустенита. Поскольку пластичность аустенита выше, чем мартенсита, то пластическая деформация начнется в объемах остаточного