

**А.Г. ПРИЙМАКОВ**, к.т.н., профессор ХГТУСА, Харьков;  
**А.В. УСТИНЕНКО**, к.т.н., доц., старший научный сотрудник  
 каф. ТММ и САПР НТУ "ХПИ", Харьков;  
**Ю.А. ГРАДЫСКИЙ**, к.т.н., доцент ХНТУСХ им. П. Василенко, Харьков

### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ ПРИ ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИИ ВОЛНОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ (ВЗП)

Рассмотрены факторы, влияющие на вероятности ошибок вибродиагностирования ВЗП. Получены зависимости вероятностей ошибок и достоверности диагностирования от погрешности измерения уровня вибрации.

Розглянуто фактори, що впливають на ймовірності похибок вибродіагностування ВЗП. Отримані залежності ймовірностей похибок та достовірності діагностування від погрешності вимірювання рівню вібрації.

The factors influencing probabilities of vibrodiagnosing errors for WTG are observed. Dependences of probabilities of errors and reliability of diagnosing from a lapse of measurement of level of vibration are gained.

Рассмотрим факторы, влияющие на вероятности ошибок вибродиагностирования ВЗП, при этом будем полагать, что допустимый уровень вибрации диагностируемого механизма известен. Ошибки диагностирования состоят в том, ВЗП, уровень вибрации которой превышает (не превышает) норму, диагностируется как исправная (дефектная) соответственно [1-3]. Эти ошибки могут быть вызваны как погрешностью измерения уровня вибрации, присущей прибору, так и внешними факторами [4, 8].

Определим вероятности ошибок вибродиагностирования, основываясь на законах распределения диагностического параметра и погрешности его измерения [4, 9]:

$$P_{01} = \int_{-\infty}^{L_p} \rho(L) \int_{L_p-L}^{\infty} \rho_e(e) de dL; \quad P_{10} = \int_{L_p}^{\infty} \rho(L) \int_{-\infty}^{L_p-L} \rho_e(e) de dL, \quad (1)$$

где  $P_{01}$  – вероятность ошибки I рода (браковки исправного изделия);  $L_p$  – допустимый уровень вибрации, дБ;  $\rho$  – плотность вероятности уровня вибрации, дБ<sup>-1</sup>;  $L$  – уровень вибрации, дБ;  $\rho_e$  – плотность вероятности погрешности измерения уровня вибрации, дБ<sup>-1</sup>;  $e$  – погрешность измерения уровня вибрации, дБ;  $P_{10}$  – вероятность ошибки II рода (пропуска дефектного изделия), [5, 6].

При определении закона распределения уровня вибрации МБ применим известные аппроксимации изменения зазоров в опорах качения с наработкой и взаимосвязи зазоров с интенсивностью вибрации. Износ деталей машиностроительной техники, в том числе и ВЗП, наработкой аппроксимируется степенной функцией [1, 3-5]

$$\delta(t) = \delta_0 + V_c t^\alpha, \quad (2)$$

где  $\delta$  – зазор в сопряжении деталей, м;  $t$  – наработка, с;  $\delta_0$  – начальное значение

зазора (после приработки), м;  $V_c$  – скорость износа, м/с;  $\alpha$  – показатель степени в степенной аппроксимации зависимости износа от наработки.

При ударных процессах в сопряжении деталей зависимость среднеквадратического значения (СКЗ) вибрации от зазора аппроксимируют степенной функцией [7-9]:

$$a(\delta) = k_\beta \delta^\beta, \quad (3)$$

где  $a$  – виброускорение, м/с;  $k_\beta$  – коэффициент пропорциональности в степенной аппроксимации зависимости виброускорения от зазора в сопряжении деталей;  $\beta$  – показатель степени в степенной аппроксимации зависимости виброускорения от зазора в сопряжении деталей.

Однако, уровень вибрации подшипниковых узлов зубчатых и клиноременных передач определяется не только зазором, но и их переменной жесткостью. Поэтому зависимости виброускорения от зазора аппроксимируют суммой некоторой постоянной составляющей и составляющей, пропорциональной зазору [6, 7].

Известно, что при приближении таких сборочных единиц к предельному состоянию СКЗ их вибрации многократно возрастает [2, 9]. Поскольку ошибки диагностирования, вызванные погрешностью измерения вибрации, возможны лишь при значении зазора, близком к допустимому (превышающему начальное в несколько раз), то указанной постоянной составляющей можно пренебречь и, в дальнейшем, принять СКЗ вибрации в полосе частот вибродиагностического признака дефекта пропорциональным зазору (3). Подставляя (2) в (3) и переходя к логарифмическим единицам измерения виброускорения, получим:

$$a(t) = k_\beta (\delta_0 + V_c t^\alpha)^\beta; \quad (4) \quad L(t) = 20 \lg \frac{a(t)}{a_{REF}} = L_0 + 20 \beta \lg \left( 1 + \frac{V_c}{\delta_0} t^\alpha \right), \quad (5)$$

где  $a_{REF}$  – опорное значение виброускорения, м/с;  $L_0$  – начальный уровень вибрации, дБ.

Являющаяся частным случаем (5) формула (отличающаяся единичным показателем степени в зависимости виброускорения от зазора), применена в [99] при обработке результатов испытаний подшипников качения ВЗП.

Поскольку диагностированию могут подвергаться как новые, так и близкие к предельному состоянию ВЗП, то с учетом неравномерности механизмов [78, 8] и вариации наработки до диагностирования, примем закон распределения наработки до диагностирования равномерным, а плотность вероятности уровня вибрации вычислим, используя теорию функций случайных величин [4, 5]:

$$\rho(L) = \frac{1}{T} \left| \frac{dt(L)}{dL} \right| = \frac{\ln 10}{20\alpha\beta \sqrt{\frac{\delta_L}{\delta_0} - 1}} \left( 10^{\frac{L-L_0}{20\beta}} - 1 \right)^{\frac{1}{\alpha} - 1} 10^{\frac{L-L_0}{20\beta}}, \quad (6)$$

где  $\delta_L$  – предельное значение зазора, м.

Вычислим плотность вероятности допустимого уровня вибрации, определив из (2) наработку до достижения допустимого зазора и подставив в (6):

$$t_p = \sqrt{\frac{\delta_p - \delta_0}{V_c}}; \quad (7) \quad L_p = L(t_p) = L_0 + 20\beta \lg \left( 1 + \frac{\delta_p - \delta_0}{\delta_0} \right); \quad (8) \quad \rho(L_p) = \frac{0,115}{\alpha\beta} \sqrt[2]{\frac{\frac{\delta_p}{\delta_0} - 1}{\frac{\delta_L}{\delta_0} - 1} \frac{1}{1 - \frac{\delta_0}{\delta_p}}}, \quad (9)$$

где  $\alpha=1,5$ ;  $\beta=1$  [6, 8];  $t_p$  – наработка до достижения зазором допустимого значения, с;  $\delta_p$  – допустимое значение зазора, м;  $L_p$  – допустимый уровень вибрации, дБ.

Так как погрешность измерения зависит от многочисленных факторов, то можно полагать [7], что ее распределение близко к усеченному нормальному распределению. Аппроксимируем его равномерным законом на интервале, ограниченном максимальной погрешностью измерения (при наилучшем сочетании параметров компонентов):

$$\rho_e(e) = \begin{cases} 0,5E & \text{при } |e| \leq E; \\ 0 & \text{при } |e| > E, \end{cases} \quad (10)$$

где  $E$  – максимальный модуль погрешности измерения уровня вибрации, дБ.

Следуя [7], примем плотность вероятности диагностического параметра вблизи допустимого значения (т.е., на интервале  $[L_p - E; L_p + E]$ ) постоянной и равной  $\rho(L_p)$ . Подставляя (9), (10) в (1), определим вероятности ошибок и достоверность диагностирования (т.е. вероятность безошибочного вывода о наличии либо отсутствии дефекта [4, 5]):

$$P_{01}(E) = \frac{\rho(L_p)E}{4}; \quad P_{10}(E) = \frac{\rho(L_p)E}{4}, \quad (11) \quad D(E) = 1 - P_{01}(E) - P_{10}(E) = 1 - \frac{\rho(L_p)E}{2}, \quad (12)$$

где  $D$  – достоверность диагностирования контролируемого параметра.

Подставляя (9) в (12), получим выражение для вычисления достоверности вибродиагностирования зазора в подшипниковых узлах ВЗП:

$$D(E) = 1 - \frac{0,058}{\alpha\beta} \sqrt[2]{\frac{\frac{\delta_p}{\delta_0} - 1}{\frac{\delta_L}{\delta_0} - 1} \frac{E}{1 - \frac{\delta_0}{\delta_p}}}. \quad (13)$$

Для применения формул (11)-(13) при обосновании параметров прибора для вибродиагностирования ВЗП необходимо определить численное значение плотности вероятности допустимого уровня вибрации в полосах частот признаков дефектов ВЗП. Для этого вычислим значения  $\rho(L_p)$  по формуле (9) на основании данных о начальных (после приработки), допустимых и предельных зазорах в подшипниках и клиноременных передачах на примере существующих моделей отечественных ВЗП [3, 4].

Допустимые значения зазоров определим, на основании этих данных, для послеремонтного среднего ресурса, равного 80% доремонтной наработки, из [1]:

$$\delta_p = \delta_0 + (\delta_L - \delta_0) \left( \frac{t_p}{T} \right)^\alpha. \quad (14)$$

Таблица – Усредненные значения плотности вероятности  $\rho(L_p)$  допустимого уровня вибрации

Наименование	Плотность вероятности допустимого уровня вибрации, дБ <sup>-1</sup>
Подшипники качения	0,063
Клиноременная передача	0,147
Зубчатые передачи (в т.ч. ВЗП)	0,13

Усредненные значения плотности вероятности  $\rho(L_p)$  допустимого уровня вибрации для подшипников качения МБ и для клиноременной передачи представлены в таблице.

Целесообразно использовать усредненное по подшипникам качения МБ и клиноременной передаче значение  $\rho(L_p)$ . Такое усредненное значение принято равным 0,11 дБ<sup>-1</sup>.

Следовательно, формулы (11), (12), связывающие погрешность измерения уровня вибрации с вероятностями ошибок и достоверностью вибродиагностирования ВЗП примут вид:

$$P_{01}(E) \approx 0,025E; \quad P_{10}(E) \approx 0,025E, \quad (15) \quad D(E) \approx 1 - 0,05E. \quad (16)$$

Таким образом, получены зависимости вероятностей ошибок и достоверности диагностирования от погрешности измерения уровня вибрации. Поскольку уменьшение этой погрешности сопровождается увеличением стоимости компонентов прибора, то полученные зависимости могут применяться при его параметрической оптимизации по критерию "стоимость-эффективность".

**Список литературы:** 1. Баркан М.В. и др. Современные методы и средства балансировки машин и приборов / Под общ. ред. В.А. Щепетильникова. – М.: Машиностроение, 1985. – 232с. 2. Генкин М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987. – 288с. 3. Ляшенко С.А. Математические модели роторов в системах диагностики вращающихся узлов сельскохозяйственных машин. Автореф. дисс. . канд.техн.наук: 01.05.02. – Харьков, 2002. – 20с. 4. Шевченко С.А. Совершенствование технических средств и технологии диагностирования агрегатов сельскохозяйственной техники. Автореф. дисс. . канд.техн.наук: 05.05.11. – Харьков, 2004. – 19с. 5. Сергеев А.Г. Точность и достоверность диагностики автомобилей. – М.: Транспорт, 1980. – 188с. 6. Попков В.К. Виброакустическая диагностика в судостроении. – Л.: Судостроение, 1989. – 257с. 7. Приймаков О.Г., Овсянников С.Л., Знайдюк В.Г. Витривальність боковин молотильних барабанів зернозбиральних комбайнів // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків, 2009. – Вип.81. – С.54-60. 8. Приймаков О.Г., Овсянников С.Л., Знайдюк В.Г. Методологія прогнозування працездатності молотильних барабанів зернозбиральних комбайнів // Вісник СевНТУ. Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь, 2010. – С.283-287. 9. Приймаков О.Г. Системне прогнозування працездатності елементів авіаційних конструкцій. Автореф. дисс. . докт.техн.наук: 05.02.09. – Харків: вид. ППМаш ім. А.М. Підгорного, 2007. – 38с.

Поступила в редколлегию 25.03.12