

**АНДРИЕНКО**

Людмила Анатольевна
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ANDRIENKO

Lyudmila Anatol'evna
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

**ВЯЗНИКОВ**

Вадим Аркадьевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

VYAZNIKOV

Vadim Arkad'evich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

Вибродиагностика технического состояния червячных передач по неравномерности вращения ведомого вала

Л.А. Андриенко, В.А. Вязников

Впервые рассматривается использование датчиков угловых перемещений для вибродиагностики медленно развивающихся дефектов на примере червячных передач, подверженных изнашиванию в процессе работы.

Актуальным является вопрос широкого внедрения вибродиагностики любых механизмов роторного типа, не только червячных передач, особенно в «полевых» условиях, где ограничен доступ к диагностическим центрам с высококвалифицированными экспертами по диагностике конкретного вида оборудования. Для решения этой проблемы желательно минимизировать затраты на диагностирование, упростить его алгоритм, что позволит работать с системой вибродиагностики пользователю без специальной подготовки в этой области, но в то же время необходимо обеспечить требуемую глубину диагноза.

Одним из перспективных направлений решения указанной проблемы является использование в качестве исходной информации, полученную в результате анализа вибросигнала углового движения выходного вала (крутильной составляющей вибросигнала). Поскольку даже значительные внешние возмущения не оказывают заметного влияния на вращательное движение исследуемой системы, вибросигнал с датчика угловых перемещений практически не содержит шумовую компоненту, что в значительной степени упрощает его идентификацию. Однако в научной литературе отсутствуют сведения об использовании таких датчиков для диагностики медленно развивающихся дефектов, которые не приводят к резкому изменению вида вибросигнала и его спектра.

В результате изнашивания изменяются параметры технического состояния червячных передач, прежде всего динамическая составляющая вращающего момента, что может привести к заеданию и прогрессивному изнашиванию.

В статье приведены результаты анализа экспериментальных вибросигналов, методика поиска в них диагностических признаков изнашивания червячных передач методами спектрального анализа и математической статистики. Исследование показало, что датчик угловых перемещений пригоден для вибродиагностики технического состояния червячных передач. Найдены диагностические признаки изнашивания и заедания в вибросигнале крутильных колебаний тихоходного вала червячной передачи.

Предлагаемый метод значительно упрощает анализ вибросигнала, минимизирует затраты на диагностирование и может быть широко внедрен, прежде всего, для экспресс-диагностики (в «полевых» условиях) и прогнозирования остаточного ресурса многих механизмов роторного типа.

Ключевые слова: вибродиагностика, червячная передача, изнашивание, датчик угловых перемещений.

Vibrodiagnostics of technical conditions of worm gears from the driven shaft nonuniform rotation

L.A. Andrienko, V.A. Vyaznikov

The paper describes the use of angle encoders for vibrodiagnostics of slowly developing defects on the example of worm gears wearing during operation. Vibrodiagnostics of any rotary mechanisms, not only worm gears, is especially urgent in the field conditions, where access to diagnostic centers with highly qualified experts in the diagnosis of specific equipment is limited. To solve this problem, it is desirable to minimize the cost of diagnosis and to simplify its algorithm, which will allow users without special training in this area to apply vibrodiagnostics. At the same time, it is necessary to provide the desired quality of diagnosis. One promising approach to solve the problem is to use the information obtained from the analysis of the vibration signal of the angular movement of the output shaft (torsion vibration signal). Since even large external perturbations do not exert a noticeable effect on the rotational motion of the system under consideration, the vibration signal provided by the angle encoder contains practically no noise, which significantly simplifies its identification. However, there are no scientific data on the application of such sensors to the diagnosis of slow-growing defects that do not drastically change the form and spectrum of the vibration signal. The wear changes technical parameters of worm gears, particularly the dynamic component of the torque, which can lead to galling and adhesive wear. The paper presents the results of analysis of experimental vibration signals, a technique to determine diagnostic signs of worm gear wear by the methods of spectral analysis and mathematical statistics. The study has shown that the angle encoder is suitable for the vibration diagnostics of worm gears. Diagnostic signs of wear and galling in the vibration signal of torsion oscillations of the worm gear slow-speed shaft are found. The proposed method significantly simplifies the analysis of the vibration signal, minimizes the cost of diagnosis, and can be

widely implemented, especially for rapid diagnosis (in the field conditions) and predicting the residual life of many rotary type mechanisms.

Keywords: vibrodiagnostics, worm gear, wear, angle encoder.

Для оценки и прогнозирования технического состояния машин в процессе эксплуатации без их разборки наибольшее распространение получили методы вибродиагностики, как наиболее чувствительные к различным отклонениям технического состояния машин от нормы [1–4].

Вибродиагностика нашла широкое применение в автомобилестроении, авиастроении и в судостроении. Тем не менее, общеизвестным фактом является то, что подавляющее большинство предприятий никак не используют методы вибродиагностики или используют их очень мало. Это объясняется, прежде всего, тем, что показания вибродатчика зависят от места его установки. Вибродатчик воспринимает суммарный сильно зашумленный сигнал от всех источников вибраций, в том числе и не относящихся к диагностируемому узлу, что затрудняет выделение полезного или информативного сигнала, проведение его анализа и принятие диагностических решений. Для этих целей нужен высококвалифицированный эксперт по диагностике конкретного вида оборудования, а такого специалиста на большинстве предприятий, как правило, нет.

Для широкого внедрения вибродиагностики желательно минимизировать затраты на диагностирование, упростить его алгоритм и в то же время обеспечить требуемую глубину диагноза.

Одним из перспективных направлений исследования в области вибродиагностики механизмов роторного типа представляется использование в качестве исходной информации, полученную в результате анализа вибросигнала углового движения выходного вала (крутильной составляющей вибросигнала). Поскольку даже значительные внешние возмущения не влияют на вращательное движение исследуемой системы (в отличие от вибрации корпуса), такой вибросигнал практически не содержит шумовую компоненту, что в определенной сте-

пени упрощает его идентификацию и позволяет работать с системой вибродиагностики пользователю без специальной подготовки в этой области.

Впервые о возможности применения датчиков угловых перемещений (ДУП) в диагностических целях упоминается в работах [1, 5], однако о методах получения диагностической информации и способах ее обработки, как в этих работах, так и в других работах этих авторов, опубликованных в открытой печати, ничего не говорится.

В технологическом институте во Флориде (США) проводились исследования возможностей ДУП для диагностики повреждений в зубчатой коробке передач [6]. Сравнивались результаты, полученные с использованием ДУП и традиционных вибродатчиков поперечных вибраций. Анализ полученных результатов показал эффективность использования ДУП. Однако рассматривались очень грубые дефекты, такие как поломка части или целого зуба, поэтому сделанный вывод кажется не совсем убедительным.

В предлагаемой работе сделана попытка исследования медленно развивающихся дефектов, которые не приводят к резким изменениям вида вибросигнала и его спектра, например, дефекты, связанные с постепенным изнашиванием зубьев колеса червячной передачи (ЧП). В результате изнашивания изменяются параметры технического состояния, поэтому необходимо найти диагностические признаки этого изменения в вибросигнале с ДУП, по которым можно судить о работоспособности ЧП.

Фрагмент записи временных вибросигналов с ДУП в зависимости от степени изнашивания ЧП показан на рис. 1, а амплитудно-частотные спектры этих сигналов для редуктора МЧ40-30 приведены на рис. 2.

Интересно отметить, что амплитуда зубцовой гармонической составляющей (в конкретном примере 30-я гармоника) с ростом износа сначала повышается (10%-ный износ), а по мере увеличения износа падает (90%-ный износ), а амплитуды на частотах кратных зубцовой по мере увеличения износа все время растут. Кроме того, появляются дополнительные частоты с меньшими амплитудами, например,

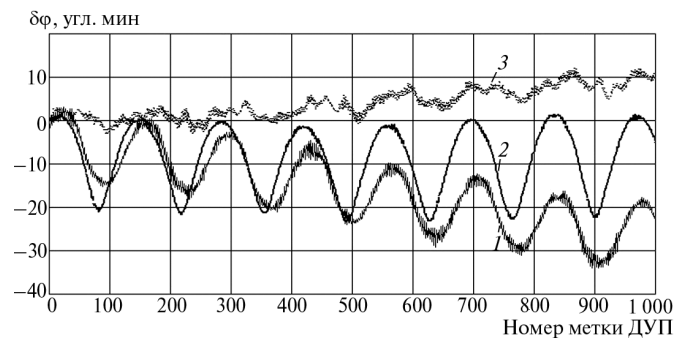


Рис. 1. Фрагмент записи временных вибросигналов с ДУП в зависимости от степени изнашивания ЧП:
1 — новая приработанная ЧП; 2 — 10%-ный износ (отношение величины износа к модулю $h_w/m = 0,1$);
3 — 90%-ный износ ($h_w/m = 0,9$)

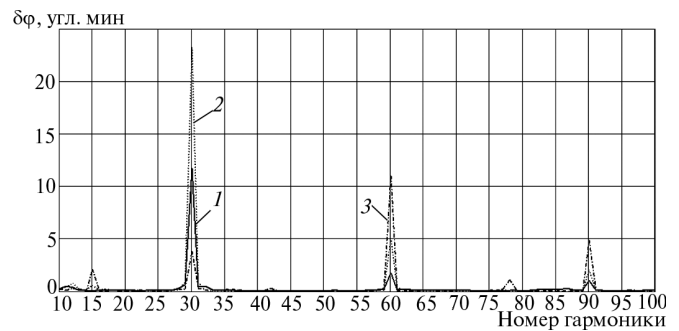


Рис. 2. Амплитудно-частотные спектры вибросигналов для редуктора МЧ40—30 с разной степенью изнашивания:
1 — новая приработанная ЧП; 2 — 10%-ный износ (отношение величины износа к модулю $h_w/m = 0,1$);
3 — 90%-ный износ ($h_w/m = 0,9$)

$0,5f_z$, которая может свидетельствовать о нарушении режима смазки.

Амплитудно-частотный спектр в высоком диапазоне частот от 1 000 до 1 800 гармоники оборотной частоты тихоходного вала показан на рис. 3. Видно, что мощность высокочастотного спектра (свыше 1 000 Гц) у изношенного редуктора (кривая 3) смещается в область более высоких частот.

Установление предельных значений уровней вибрации затруднено вследствие большого разброса абсолютных значений размерных параметров для ЧП разных типоразмеров. Для исключения привязки к абсолютным значениям размерных параметров польским ученым Ч. Цемпелем предлагается использовать раз-

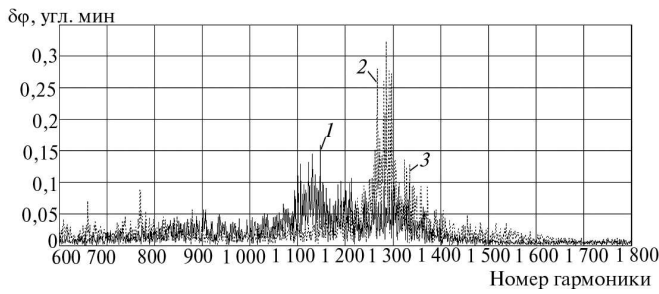


Рис. 3. Амплитудно-частотный спектр вибросигнала с ДУП для МЧ40—30 в высоком диапазоне частот:

1 — новая приработанная ЧП; 2 — 10%-ный износ (отношение величины износа к модулю $h_w/m = 0,1$); 3 — 90%-ный износ ($h_w/m = 0,9$)

личные безразмерные параметры, называемые амплитудными дискриминантами [7]. Безразмерные характеристики вибросигналов удобны, поскольку их значения не зависят даже от типа механизма, а определяются только видом неисправности.

Выбор того или иного дискриминанта зависит от свойств вибросигнала, а правильность выбора подтверждается экспериментом.

В данной работе использовались безразмерные средние квадратические амплитуды Цемпеля, которые являются аналогами мощности спектра [8].

Зависимость математического ожидания безразмерных средних квадратических амплитуд ($МО X_{СКЗ}$) от величины относительного износа для низких и высоких диапазонов частот, полученные по экспериментальным данным, приведены на рис. 4. Очевидно, что с ростом величины износа червячного зацепления мощность спектра увеличивается и значения дискриминанта тоже увеличиваются. Поэтому эти параметры могут использоваться в качестве диагностических признаков изнашивания ЧП.

В процессе эксплуатации в результате изнашивания ЧП меняется динамическая составляющая вращающего момента. При повышенных нагрузках в ЧП может происходить заедание, чаще «холодное» в виде «намазывания» бронзы на витки червяка, после чего наблюдается интенсивное изнашивание зубьев червячного колеса [9]. Заедание проявляется в виде единичных выбросов во временном сигнале виброускорений вращающегося тихоходного вала ЧП

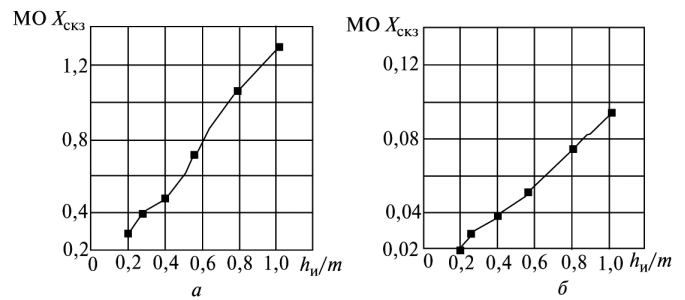


Рис. 4. Амплитудные дискриминанты Цемпеля для ЧП в разных диапазонах частот:

а — до 280 Гц; б — свыше 280 Гц

(рис. 5), поэтому в амплитудно-частотном спектре, который строится по среднеквадратичным амплитудам, эти выбросы не видны.

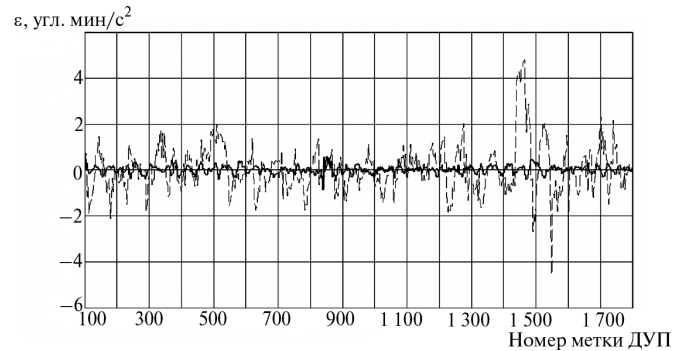


Рис. 5. Фрагмент временного сигнала виброускорений с ДУП

Исследования показали, что при статистическом анализе спектра виброускорений на заедание реагируют эксцесс плотности вероятности распределения мгновенных значений виброускорений (рис. 6).

Для нормального закона распределения значения эксцесса близки к нулю, а по мере при-

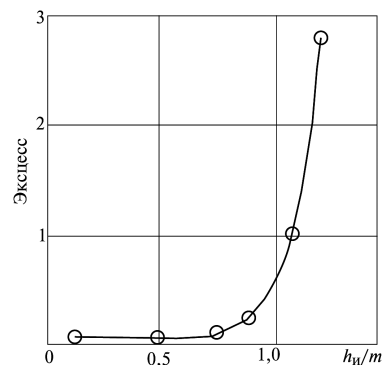


Рис. 6. Эксцесс плотности вероятности распределения мгновенных значений

ближения к предельному износу резко увеличиваются, что говорит об отклонении от нормального закона. Поэтому эксцесс может быть использован в качестве диагностического признака заедания в ЧП.

Выводы

1. Установлено, что датчик угловых перемещений пригоден для исследования изнашивания ЧП.
2. Найдены диагностические признаки изнашивания и заедания в вибросигнале крутильных колебаний тихоходного вала ЧП.
3. Предлагаемый метод может быть широко внедрен для экспресс-диагностики (диагностики в «полевых» условиях) и прогнозирования остаточного ресурса многих механизмов роторного типа.

Литература

- [1] Генкин М.Д., Соколова А.Г. *Виброакустическая диагностика машин и механизмов*. Москва, Машиностроение, 1987. 288 с.
- [2] Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. *Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации*. Санкт-Петербург, Изд. центр СПбГМТУ, 2000. 159 с.
- [3] Павлов Б.В. *Акустическая диагностика механизмов*. Москва, Машиностроение, 1971. 224 с.
- [4] Клоев В.В., ред. *Неразрушающий контроль. Справочник*. В 7 т. Т. 7. Кн. 2. Вибродиагностика, Москва, Машиностроение, 2005. 829 с.
- [5] Кузьмин И.С., Ражиков В.Н. Электромеханические приводы устройств исполнительной автоматики с длительным ресурсом. *Вестник машиностроения*, 1990, № 12, с. 46—47.

[6] Jacob A. *Fault Diagnosis of Gear-trains using a New Technique for Condition Monitoring of Rotating Machinery: M.S. Thesis*, Florida, Institute Of Technology, 1992. 177 p.

[7] Cempel C. *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1982. 342 p.

[8] Бендат Дж., Пирсол А. *Прикладной анализ случайных процессов*. Москва, Мир, 1989. 540 с.

[9] Часовников Л.Д. *Передачи зацеплением*. Москва, Машиностроение, 1969. 486 с.

References

[1] Genkin M.D., Sokolova A.G. *Vibroakusticheskaia diagnostika mashin i mekhanizmov*. [Vibration diagnostics of machines]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1987. 288 p.

[2] Barkov A.V., Barkova N.A., Azovtsev A.Iu. *Monitoring i diagnostika rotornykh mashin po vibratsii* [Monitoring and diagnosis of rotating machinery by vibration]. Saint Petersburg, St.Petersburg State Marine Technical University publ., 2000. 159 p.

[3] Pavlov B.V. *Akusticheskaia diagnostika mekhanizmov* [Acoustic diagnostics mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1971. 224 p.

[4] *Nerazrushaiushchii kontrol'. Spravochnik v 7 t.* [Non-destructive testing. Reference in 7 vol.] Ed. Kliuev V.V., vol. 7, book 2. *Vibrodiagnostika* [Vibrodiagnostics]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2005. 829 p.

[5] Kuz'min I.S., Razhikov V.N. *Elektromekhanicheskie privody ustroystv ispolnitel'noi avtomatiki s dlitel'nym resursom* [Electromechanical Actuators Actuators Automation long life]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 1990, no. 12, pp. 46—47.

[6] Jacob A. *Fault Diagnosis of Gear-trains using a New Technique for Condition Monitoring of Rotating Machinery: M.S. Thesis*, Florida, Institute Of Technology, 1992. 177 p.

[7] Cempel C. *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1982. 342 p.

[8] Bendat Dzh., Pirsol A. *Prikladnoi analiz sluchainykh protsessov* [Applied analysis of stochastic processes]. Moscow, Mir publ., 1989. 540 p.

[9] Chasovnikov L.D. *Peredachi zatsopleniem* [Transmission gearing]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1969. 486 p.

Статья поступила в редакцию 01.10.2013

Информация об авторах

АНДРИЕНКО Людмила Анатольевна (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Основы конструирования машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: dm@bmsu.ru).

ВЯЗНИКОВ Вадим Аркадьевич (Москва) — аспирант кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Information about the authors

ANDRIENKO Lyudmila Anatol'evna (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Fundamentals of Machine Design» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: dm@bmsu.ru).

VYAZNIKOV Vadim Arkad'evich (Moscow) — Post-Graduate of «Fundamentals of Machine Design» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).