

УДК 621.8:519.6:004

АНАЛИЗ ВИБРАЦИИ РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ФАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ

А.В. ЦУРКО, А.П. АСЛАМОВ, Ю.П. АСЛАМОВ, И.Г. ДАВЫДОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 25 сентября 2017

Аннотация. В работе предлагается способ представления сигналов вибрации роторного оборудования в виде фазовых траекторий. Представление предназначено для дополнения комплекса существующих методов в задачах с повышенной априорной неопределенностью, решаемых экспертными системами виброакустической диагностики. Проведен предварительный анализ применимости предложенного способа путем сравнения результатов визуализации для обширной базы экспериментальных данных.

Ключевые слова: аттрактор, виброакустическая диагностика, система, фазовая траектория, цифровая обработка сигналов.

Abstract. The article introduces method of vibration signals representation based on phase trajectories. The method is proposed as a supplement for current methods in expert systems of vibration analysis to solve tasks of prior uncertainty. Preliminary feasibility analysis of the method was carried out by visual comparison using large data selection.

Keywords: attractor, vibration analysis, system, phase trajectory, digital signal processing.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 116, No. 6, pp. 32-39
Rotary equipment vibration analysis based on phase trajectories
A.V. Tsurko, A.P. Aslamov, Y.P. Aslamov, I.G. Davydov

Введение

Виброакустическая диагностика машин и механизмов, содержащих вращающиеся узлы, уже более полувека решает задачи поиска неисправностей и оценки технического состояния оборудования. Успехи в этой области сокращают затраты на эксплуатацию, ремонт и снижают риски аварий на производстве и транспорте. Современное состояние и дальнейшее развитие технической диагностики основано на автоматизации анализа и принятия решений, а также интеграции в бизнес-процессы, для чего используется вычислительная техника, сети передачи данных, цифровая обработка сигналов и технологии машинного обучения.

Традиционные методы диагностики основаны на максимальном использовании априорных данных – информации об используемом оборудовании, нормальных параметрах шума и признаках неисправностей. Однако при автоматизации возникают задачи иного рода: проверить правильность введенных человеком данных, подобрать недостающие сведения из общей информационной базы, выполнить работу человека-эксперта, зачастую обладающего неформализованным опытом и интуицией. Путь к решению таких задач зачастую лежит через максимальное использование апостериорных данных. В частности, это означает не столько использование некоторого идеального метода оценки известных параметров, сколько обнаружение и оценку неизвестных параметров, а также объединение разных методов.

В данной работе предлагается новый для виброакустической диагностики способ представления входных данных. Это представление предназначено для анализа траектории движения системы в фазовом пространстве на предмет выделения аттракторов и построения фазового портрета. В классической литературе предметной области упоминаний применения такого способа не обнаружено. Причиной, предположительно, послужило то, что он требует не только определенного уровня развития вычислительной техники для применения. Интерпретация результатов может вызвать затруднения для человека-эксперта, но не составит проблем для системы искусственного интеллекта. Способ предлагается не как замена существующим методам, а как дополнительное представление для категории задач с повышенной энтропией системы [1, с. 117], возникающих вследствие априорной неопределенности начальных условий. Проведенное исследование, в некотором смысле, является междисциплинарным.

Теоретический анализ

Определим содержание основных понятий использованного подхода в приложении к предметной области.

Исследуемой системой являются механически сопряженные роторное оборудование, устройство съема и датчик вибрации, надсистемой – окружающая среда с электрическими и вибрационными помехами. Наблюдаемым параметром является электрическая величина на выходе датчика, пропорциональная уровню вибрации (в использованных датчиках – напряжение, соответствующее виброускорению вдоль определенной оси).

Колебания этой величины вокруг положения равновесия в основном возбуждаются рассеянием энергии, привносимой в систему одним или несколькими роторами. При этом в зависимости от оборудования проявляются оборотные и резонансные частоты конструкции, вплоть до резонансов датчика, внешние вибрационные и электрические воздействия и помехи, шумы и амплитудно-частотные характеристики всех элементов системы, через которые проходит сигнал, в том числе погрешности оцифровки и числовой обработки. В результате встречающаяся на практике вибрация обычно является сложным полигармоническим процессом (1), т. е. содержит гармонические составляющие различной частоты [1, с. 17].

$$x(t) = \sum A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (1)$$

где A_i , ω_i , φ_i – амплитуда, частота и начальная фаза i -й гармонической составляющей.

В таком случае фазовым пространством будет являться множество всех возможных состояний системы (датчика, установленного на оборудование), фазовой траекторией – последовательность состояний в одной из реализаций сигнала вибрации, аттрактором – точки или области в фазовом пространстве, вокруг которых часто проходит или вращается траектория, фазовым портретом – совокупность траекторий или обобщение закономерностей над ними. В таком представлении можно провести аналогию между фазовым портретом (после его статистической обработки и обобщения закономерностей) и спектром Фурье, только базис разложения будет не гармоническим, а заранее неизвестным (формируемым адаптивно).

Размерность фазового пространства может быть разной для разных систем. Так как исследуемая система в точке регистрации воздействия датчиком может быть представлена суперпозицией гармонических осцилляторов, то для анализа достаточно пространства размерностью два (состояние линейного осциллятора задается мгновенной координатой и скоростью) [2, с. 8]. На практике используются три величины: виброускорение, виброскорость и виброперемещение (все полигармонические (1)), но к регистрации рекомендуется первая, как наиболее информативная в ВЧ-области вибрации. Остальные получают путем интегрирования или дифференцирования [2, с. 22]. Для получения

виброскорости (2) и виброперемещения (3) исходное виброускорение нужно проинтегрировать по времени один и два раза соответственно:

$$v(t) = \int a(t) dt = \sum A_i \int \sin(\omega_i t + \varphi_i) dt = \sum C_{1i} - \frac{A_i}{\omega_i} \cos(\omega_i t + \varphi_i), \quad (2)$$

$$x(t) = \int v(t) dt = \sum C_{1i} - \frac{A_i}{\omega_i} \int \cos(\omega_i t + \varphi_i) dt = \sum C_{2i} + C_{1i} t - \frac{A_i}{\omega_i^2} \sin(\omega_i t + \varphi_i). \quad (3)$$

Таким образом, фазовая траектория системы, полученная из реализации сигнала виброускорения в конкретной точке, отображается на плоскость, где по однокоординатной оси откладывается виброперемещение, а по второй – виброскорость. По сути, фазовый портрет системы отражает все вышеперечисленные факторы, сформировавшие сигнал, и даже при отсутствии априорных данных дает возможность выделить наиболее характерные особенности. Выделенные особенности служат источником расширения и дополнения пространства информативных признаков, используемого системой диагностики, работающей на основе баз данных (в том числе искусственных нейронных сетей).

Методика эксперимента

Для проведения эксперимента использована вычислительная среда MATLAB. Источником записей являются 17 образцов оборудования и 3 разных вида датчиков (обычно использовался один, иногда два). Исходные данные о вибрации получены в форме WAV-записей, одно- и двухканальных (в случае двух перпендикулярных осей вибрации в одной точке). В общей сумме обработано и проанализировано около 1250 реализаций. В силу ограничений статьи ниже представлена небольшая часть этой выборки.

Программная реализация обладает следующими особенностями. Численное интегрирование выполнено методом трапеций. Применение функции удаления линейных трендов устраняет постоянные на протяжении реализации сигнала погрешности и нивелирует практический смысл констант в выражениях (2) и (3). Единицы измерения виброускорения, виброскорости и виброперемещения приводятся соответственно к м/с^2 , мм/с , мкм .

Экспериментально установлено, что построение фазовых траекторий на двухмерной плоскости зачастую характеризуются слабой визуальной репрезентативностью, так как некоторые параметры системы и/или записей за время реализации значительно смещаются, поэтому смещаются и аттракторы. Для преодоления указанной проблемы используется построение траекторий в трехмерном пространстве, где по третьей перпендикулярной оси откладывается время от нуля до конца реализации сигнала. Ниже представлены изображения в обоих форматах. К двум другим осям для удобства визуального анализа применено автомасштабирование, поэтому сравнение любой пары изображений следует проводить с учетом реальных единиц измерения.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим несколько примеров фазовых траекторий различных исследуемых систем.

На рис. 1 представлены траектории для записей со стенда тягового электродвигателя, сделанных в железнодорожном депо г. Жлобин (2017 г). Пары рис. 1, а–в и рис. 1, б–г соответствуют записям, снятым при помощи двух разных датчиков в одних и тех же точках, графики построены в сопоставимом масштабе.

Каждый горизонтальный пик на рисунках соответствует основному рассеянию энергии в системе и является петлей, возникающей при чередовании положительной и отрицательной скорости и однозначном перемещении. Траектории у датчиков SKF более четкие, что, вероятно, соответствует меньшему уровню шума или большему ослаблению в ВЧ-области. Здесь, как и в других примерах с несколькими датчиками, видно, что при численном соответствии размаха сигналов по амплитуде общий характер траекторий заметно различается для разных датчиков, во многих случаях больше отражает их, чем роторное оборудование.

Впрочем, аналогичное утверждение должно быть справедливо для тех же данных при общем анализе одномерных реализаций сигналов и их спектров традиционными методами.

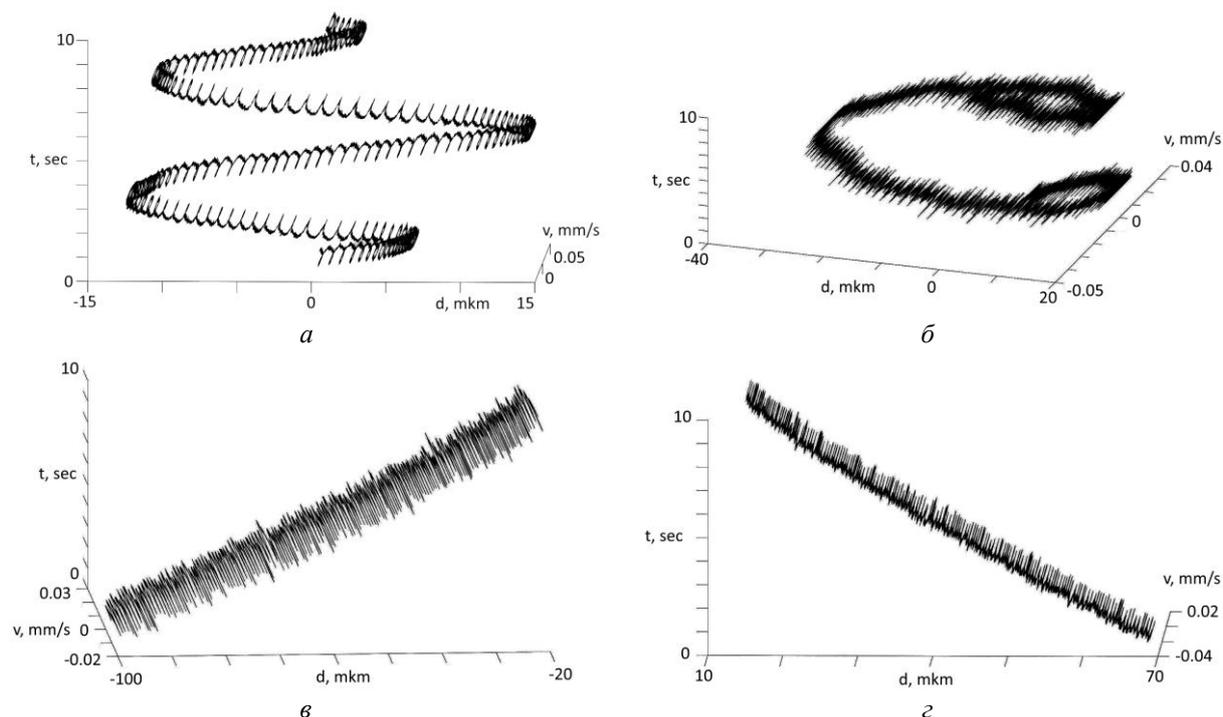


Рис. 1. Фазовые траектории системы с электродвигателем: *а* – датчик SKF, точка 3; *б* – датчик SKF, точка 13; *в* – датчик VBХ, точка 3; *г* – датчик VBХ, точка 13

На рис. 2 представлены траектории для записей с генератора на ТЭЦ (*а*, *б*) и дизельного генератора с автономного объекта (*в*, *г*).

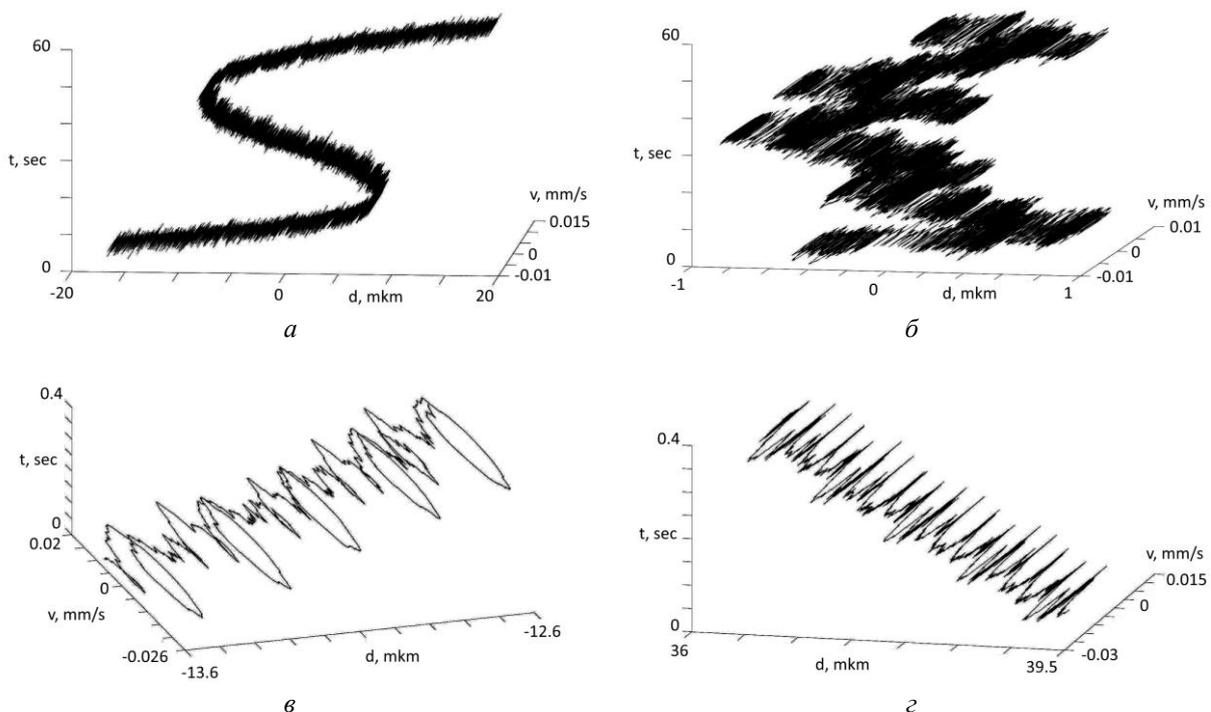


Рис. 2. Фазовые траектории систем с генераторами: *а* – подшипник 1 генератора; *б* – подшипник 8 возбудителя; *в* – фланец масляного насоса; *г* – подшипник дизеля

Из рис. 2, *а* видно, что записи с мощного генератора при наличии «дрейфа» по перемещению представляют собой почти гладкую поверхность из пиков разной амплитуды, которая рассыпается на отдельные петли (*б*) с опознаваемыми параметрами при отсутствии или устранении дрейфа. Подобные по характеру пики наблюдаются на подшипнике дизельного генератора (*г*), однако четкая выраженность второго цикла по 4 пика/петли становится заметной при съеме данных с другой точки у масляного насоса (*в*).

На рис. 3 представлены траектории для записей с дугьевого вентилятора, установленного на БМЗ, и смесителя на предприятии «Сармат» (2016 г). Рис. 3, *а* показывает, что фазовая траектория, снятая с подшипника вентилятора, включает в себя повторяющиеся элементы как большего размаха, в виде петель, так и меньшего, распределенного по основным петлям. Рис. 3, *б* показывает аналогичный сигнал в фазовой плоскости, который после устранения дрейфа и грамотного усреднения (наложения повторяющихся фрагментов) можно считать фазовым портретом системы, так как периоды большего и меньшего фрагментов почти кратны, что дает устойчивую картину отклонений траектории. Аналогичная ситуация с траекториями сигналов наблюдается на рис. 3, *в* и *г*, за исключением отсутствия выраженных по форме или периоду малых фрагментов траектории, что делает контуры больших фрагментов случайно размытыми.

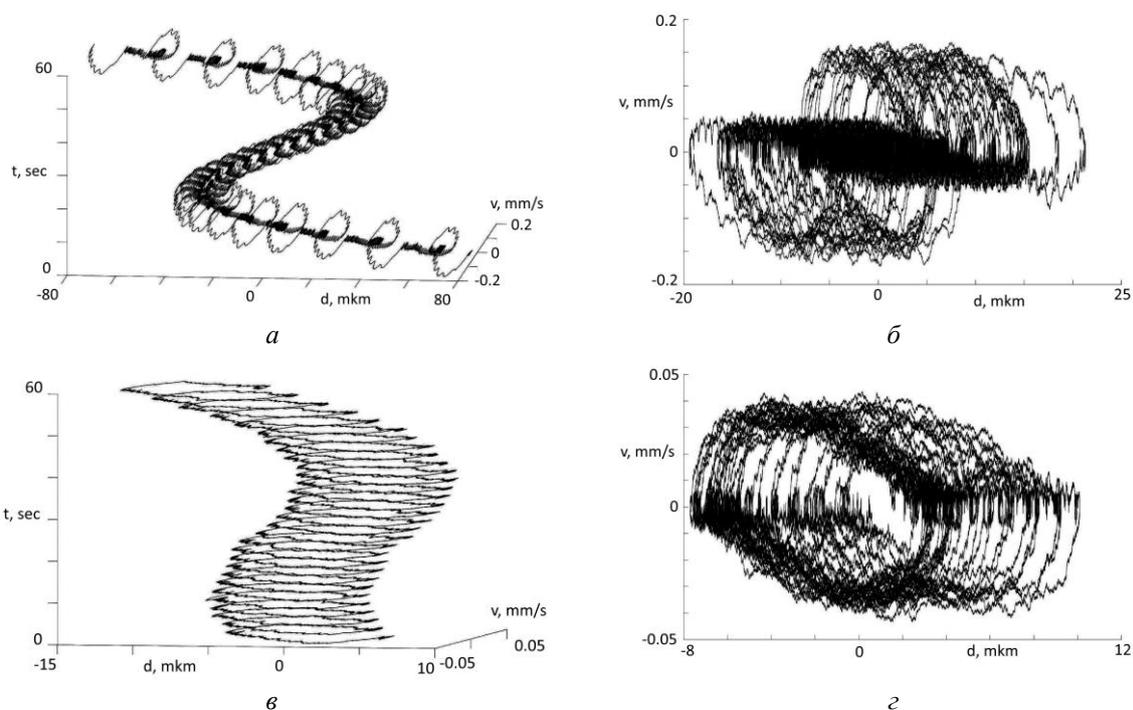


Рис. 3. Фазовые траектории систем вентилятора и смесителя: *а* – запись 34, вид 3/4; *б* – запись 73, вид в фазовой плоскости; *в* – запись 1857, вид 3/4; *г* – запись 70, вид в фазовой плоскости

На рис. 4 представлены записи с четырех различных редукторов (2007 и 2016 гг.). По рис. 4, *а* видно отсутствие выраженных закономерностей траектории в сигнале с редуктора антенны, при этом общий характер траектории имеет сходства с записью с дизельного генератора, установленного на этом же объекте. Данное обстоятельство, вероятно, означает что некоторые вибрации проходят между этими двумя точками съема данных, а некоторые гасятся, а также указывает на ожидаемое сходство спектров и законов распределения для этих сигналов. Траектория с редуктора на рис. 4, *б* также не содержит выраженных закономерностей, что, однако, оставляет возможность измерения ее статистических и спектральных характеристик. На рис. 4, *в* редукторный шум выражен слабо, вероятно, вследствие удаленности точки съема от источника или сильной выраженности связанных колебаний виброскорости и виброперемещения, обуславливающих круговые участки траектории. Рис. 4, *г* представляет траекторию, в середине которой имеет участок без характерного для редукторов шума, возникший, предположительно, вследствие того, что редукторный механизм останавливался или работал без нагрузки.

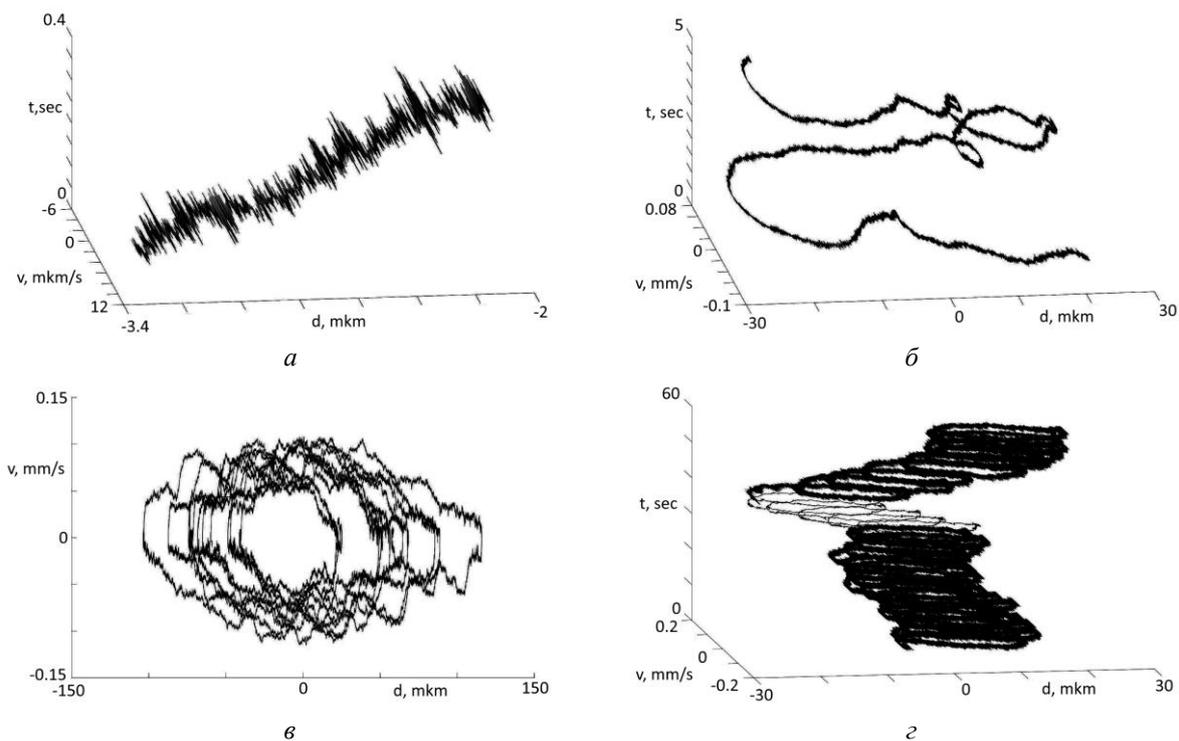


Рис. 4. Фазовые траектории систем с редукторами: *a* – редуктор антенны; *б* – клеть 2 БМЗ; *в* – клеть 3 БМЗ, вид в фазовой плоскости; *г* – клеть 21 БМЗ

На рис. 5 представлены записи последовательного включения испытательного стенда подшипников на МПЗ (2005 г). Фазовая траектория рис. 5, *a* соответствует включенному маслососу, при подключении двигателя с редукторами траектория принимает вид, изображенный на рис. 5, *б*. Рис. 5, *в* и *г* показывают форму траектории после подключения через муфту блока исследуемых подшипников без и с нагрузкой соответственно.

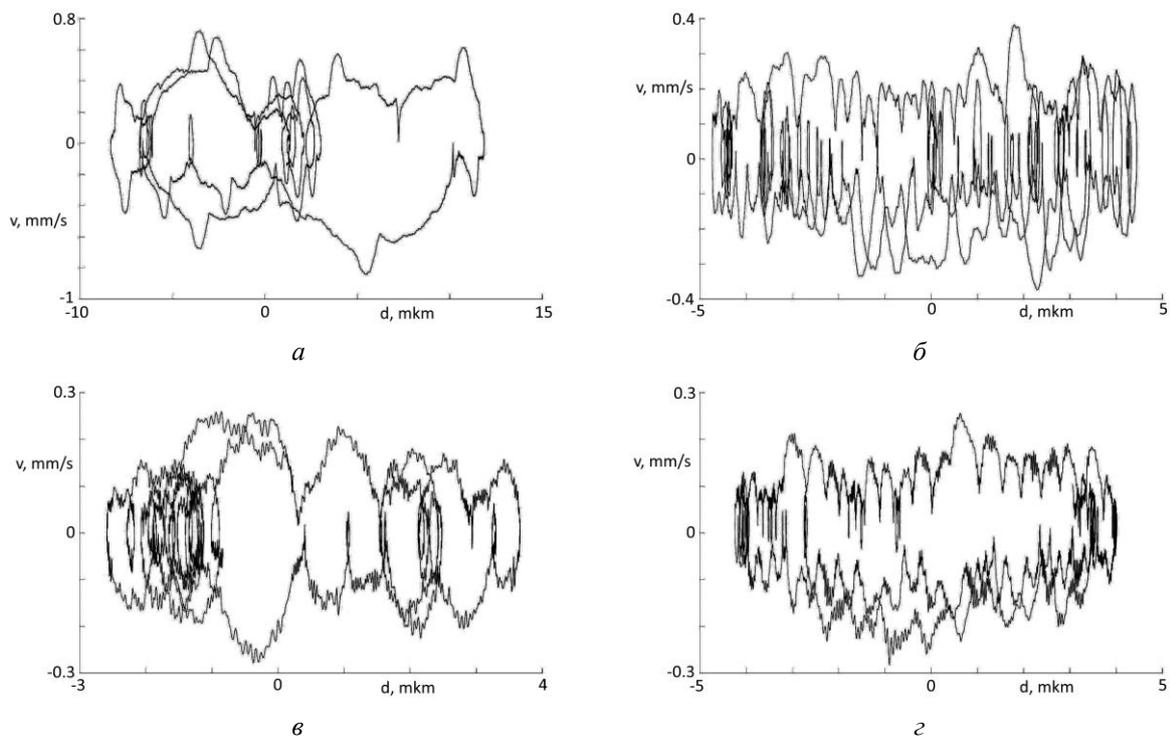


Рис. 5. Фазовые траектории поэтапного включения системы испытания подшипников: *a* – маслосос; *б* – двигатель с редукторами; *в* – муфта с подшипниками; *г* – нагрузка

Установлено, что каждый экземпляр исследуемой системы обладает своими особенностями, которые отличают его от «среднего» представителя данной модели оборудования. Причем некоторые из этих особенностей могут меняться с течением времени в зависимости от режима работы и условий эксплуатации. В том числе это касается датчиков для регистрации вибрации, которые зачастую обладают индивидуальными особенностями АЧХ, что визуально заметно на графиках по «характеру» их фазовых траекторий.

Эксперимент с поэтапным включением оборудования показывает, что на общую форму траектории постепенно накладываются колебания, повторяющиеся фрагменты и шумы, причем уровень шумов постепенно растет. Иногда повторяющиеся фрагменты пропадают или размах траектории уменьшается – возможно, вследствие того, что энергия механических колебаний получает выход в больший контур рассеяния с иными резонансными характеристиками.

Сигналы с одного регистрирующего оборудования и места (цеха, здания) довольно похожи по характеру траектории, что заставляет предполагать значительное влияние датчиков и условий эксплуатации, заметное на фоне технического состояния роторного оборудования.

В плоскости виброперемещения более чем для половины записей присутствует значительное смещение, условно обозначенное «дрейф». Форма дрейфа похожа на линейный сдвиг или один-полтора периода синуса на полный интервал наблюдения. Когда дрейфа нет или он не значителен, проявляются случайные или гармонические колебания по виброперемещению, если нет и их – то траектория по форме описывает цилиндр. Дрейф также замечен при выключенном оборудовании (шум помещения), но не наблюдался у редукторов.

На большинстве рисунков присутствуют повторяющиеся участки траектории, подобные по форме, условно обозначенные «паттерны». Они встречаются во всех трех плоскостях и в трехмерном виде. Паттерны искажаются дрейфом по перемещению, скачками (возможно, вследствие ударов) по виброскорости и шумом, что затрудняет их выделение.

Практически все записи, в том числе при выключенном оборудовании, содержат взаимосвязанные колебания виброскорости и виброперемещения, выглядящие как круговые участки фазовой траектории, условно названные «витки». Их периодичность и форма для разных записей варьируются от одинаковых до шумоподобных. Обычно амплитуда дрейфа гораздо больше амплитуды витков, тогда они визуальнo вытягиваются из «колец» в «петли» или «пики» по виброскорости пропорционально силе смещения.

Записям с выраженной близостью подшипников часто соответствует определенная комбинация витков и паттернов, что может означать устоявшийся, взаимосвязанный характер изменения перемещения-скорости, или витки со случайным разбросом параметров.

Довольно часто паттернов и витков как таковых нет, наблюдается шумоподобный процесс с постоянными статистическими характеристиками, рассеянный вдоль фазовой траектории. Это характерно для редукторов, где траектория петляет хаотично, и для мощных генераторов, траектория которых подвержена сильному дрейфу по виброперемещению.

Заключение

Предложенный способ представления сигналов вибрации дает дополнительную информацию для решения задач вибродиагностики. Информация касается типа и режима работы оборудования, узлов оборудования, наблюдаемых по вибрации в данной точке съема, и их состояния, регистрирующего устройства, окружающей среды. Наиболее вероятным ожидается применение способа в задачах с повышенной априорной неопределенностью, например, для распознавания и различения типов и экземпляров диагностируемого и регистрирующего оборудования, а также режимов их работы.

Основным преимуществом такого представления является расширение множества безразмерных характеристик сигнала путем измерения его фрагментов относительно друг друга. Это важно в случаях неопределенности таких начальных условий, как вид и режим работы оборудования, неизвестная или переменная нагрузка и скорость ведущих роторов. Главным недостатком является высокая уникальность каждой реализации сигнала, из-за чего использование предложенного представления видится целесообразным только вместе с обширной базой данных, содержащей размеченные выборки с высокой репрезентативностью, а также с применением средств автоматической кластеризации и классификации.

Дальнейшие исследования предполагается направить на разработку методов выделения характерных особенностей из фазовых траекторий для формирования и расширения пространства информативных признаков, а также средств классификации и кластеризации, пригодных для работы с расширяющимся пространством информативных признаков.

Исходным направлением поиска для выделения характерных особенностей траекторий, предполагается декомпозиция сигнала на четыре типа мод: шумы, случайные выбросы, периодичности (повторяющиеся элементы), медленные тренды, и их статистическая оценка.

Список литературы

1. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
2. Абрамов И.Л. Вибродиагностика энергетического оборудования. Кемерово, 2011. 80 с.
3. Кузнецов А.П., Кузнецов С.П. Нелинейные колебания. М.: Физматлит, 2002. 292 с.

References

1. Birger I.A. Tehnicheskaja diagnostika. M.: «Mashinostroenie», 1978. 240 s. (in Russ.)
2. Abramov I.L. Vibrodiagnostika jenergeticheskogo oborudovanija. Kemerovo, 2011. 80 s. (in Russ.)
3. Kuznicov A.P., Kuznicov S.P. Nelinejnye kolebanija. M.: Fizmatlit, 2002. 292 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Цурко А.В., научный сотрудник НИЛ 1.5 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Асламов А.П., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Асламов Ю.П., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Давыдов И.Г., к.т.н., доцент, доцент кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Tsurko A.V., researcher of SRL 1.5 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Aslamov A.P., PG student of information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Aslamov A.P., PG student of information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Davydov I.G., PhD, associate professor of information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-86-79;
e-mail: tsurko@bsuir.by
Цурко Александр Владимирович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-17-293-86-79;
e-mail: tsurko@bsuir.by
Tsurko Aleksandr Vladimirovich