

РЕКОНСТРУКЦИЯ ФАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ШУМОМ

Виктория Волкова

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В.Лазаряна

Последние два десятилетия проблемы построения математических моделей и прогнозирования динамического поведения механических систем по экспериментальным данным вызывают повышенный интерес. Наиболее ответственными и актуальными являются задачи качественной идентификации – выявления динамической модели колебаний элементов конструкций [2,6,7,9].

1. Идентификация нелинейных динамических систем

Идентификация нелинейных динамических систем представляет собой скорее субъективные навыки, чем прямое применение некоторого частного метода теории систем. Несмотря на то, что существует множество аналитических методов, единый подход к выявлению, классификации или моделированию соотношений между внешним возмущением и откликом системы отсутствует.

Область применения большинства классических методов идентификации ограничена одночастотными динамическими процессами. Данные методы идентификации основаны на использовании внешнего возмущения особой формы – прямоугольного импульсного или ступенчатого знакопеременного [2]. Подобные виды внешнего возмущения весьма сложны в реализации. Поскольку вместо внешнего возмущения, соответствующего нормальному режиму эксплуатации, для реализации данных методов требуется возмущение особого типа, то становится очевидным, что эти методы предполагают идентификацию модели механической системы вне условий нормальной эксплуатации. Таким образом, данные методы применимы только к линейным стационарным системам, в которых соотношение между внешним возмущением и откликом системы сохраняется для всех других типов возмущения.

Большинство современных методов качественной идентификации работают во временной области. Так, объектом их исследования являются временные процессы, а именно, записи изменения перемещений точек исследуемых систем во времени. Данные методы ориентированы на применение вейвлет преобразования, рядов Винера и Гаммерштейна. Данные подходы громоздки в реализации и предполагают применение вычислительной техники [2,6,7,9], а также необходимость хранения значительного объема исходной информации. Базисные функции, лежащие в основе этих методов, оперируют производными высших порядков (четвертого, пятого и

шестого). Необходимость многократно численно дифференцировать исходный сигнал, содержащий шум, необратимо приводит к увеличению ошибок накопления и усечения, что оказывает существенное влияние на точность построения модели.

2. Применение фазовых диаграмм к исследованию колебательных процессов

Качественное исследование поведения динамической системы сводится к изучению поведения траекторий в фазовом пространстве. Основы качественной теории исследования динамических процессов были созданы Пуанкаре. Исключительная роль в развитии качественных методов исследования динамических систем принадлежит А.А. Андронову [1], Е.А. Леонтовичу, И.И. Гордону, А.М. Ляпунову. Основной задачей классической теории качественного исследования является определение динамических свойств систем без получения замкнутого аналитического решения. С этой целью широко использовались фазовые траектории на плоскости $(y, \dot{y})$.

Наибольший интерес представляет фазовая траектория на плоскости $(y, \ddot{y})$. Это связано с тем, что энергетические критерии на ней интерпретируются наиболее наглядно. Кроме того, зависимость $\ddot{y}(y)$ обратно симметрична относительно оси y графику изменения упругих свойств. Именно фазовые траектории $\ddot{y}(y)$ позволяют установить вид и уровень нелинейности системы. Известно, что ускорений точек более чувствительны к отклонениям колебаний от гармонических. Сопоставим линейную систему с нелинейной симметричной системой с двумя потенциальными ямами. Заметим, что при некоторых режимах колебаний на частоте возмущения осциллограммы этих систем подобны, а акселерограммы различны. Так, акселерограммы линейной системы имеют вид гармонического процесса, а несимметричной системы с двумя потенциальными ямами – пилообразный вид [4,5].

3. Экспериментальное исследование вынужденных колебаний гибкого стержня

Для исследования вынужденных колебаний гибкого стержня был использован комплект измерительно-регистрирующей аппаратуры, в состав которого входили средства регистрации, преобразования, хранения сигналов, а также персональный компьютер. Применение компьютера позволило автоматизировать процедуру численной обработки, дало возможность применять стандартные графические пакеты для представления сигналов.

Амплитуды колебаний точек стержня регистрировались проволочными тензодатчиками. Они весьма широко применяются в технике механических измерений. Их используют не только для измерения напряжений, но и в качестве промежуточных элементов. Тензодатчики, использованные в эксперименте имели следующие характеристики: базу 10мм и сопротивление 201.6 Ом. Одним из недостатков проволочных тензодатчиков заключается во влиянии поперечных деформаций на точность измерений. Для компенсации данного явления тензодатчики используются в группах – розетках. Наклейка датчиков осуществлялась по схеме полумост.

Для исследования форм колебаний гибкого стержня датчики были наклеены в точках, расположенных на расстояниях $1/8; 3/8; 1/2; 3/4 l$ от неподвижной опоры.

Сигналы от тензодатчиков для усиления поступали на входы тензоусилительной установки ТУП-12, а затем передавались на магнитограф типа TEACR -71. Применение магнитографа позволило получать записи сигналов в непрерывно форме, с возможностью их неоднократной последующей их обработки.

Измерение вертикальных ускорений в средней по длине стержня точке выполнялось посредством датчиков вертикальных ускорений АС-2, изготовленных на базе интегрального датчика ускорений ADXL105. Тарировка датчика ускорений выполнялась путем его аретировки. Коэффициент преобразования для датчика вертикальных ускорений $0.0011 \text{ мс}^{-2} (\text{мВ})^{-1}$. Сигналы от датчика вертикальных ускорений передавались на масштабный усилитель ТМА-32, имеющий полосу пропускания 0...20 Гц. Усиленный сигнал поступал на запись на один из каналов магнитографа.

Для преобразования аналогового сигнала, записанного магнитографом, в дискретную форму был использован АЦП. Частота квантования сигнала была принята 200 Гц. Сигналы, преобразованные в цифровой файл, хранились на жестком диске компьютера. Для первичной обработки данных: умножение и деление показаний датчиков на переходные коэффициенты, вычитания поправок на уход нуля использовалось специальное программное обеспечение.

В ходе эксперимента для каждого из эксцентров фиксировались значения перемещений и ускорений системы, как при увеличении частоты вращения, так и при ее уменьшении. Это позволило установить критические значения частот, соответствующие резонансным режимам колебаний, а также границы диапазонов частот существования отдельных режимов колебаний.

Принимая во внимание возможность существования нескольких устойчивых режимов колебаний на фиксированных частотах внешнего возмущения, в экспериментах изменялись начальные условия.

При установлении достаточно малой амплитуды внешнего возмущения наблюдались режимы «малых» колебаний относительно одного из двух устойчивых положений равновесия. Увеличение амплитуды колебаний приводило к установлению больших ультрагармонических колебаний на четных гармониках. Устойчивость данного вида колебаний объясняется существенной несимметрией системы.

Форма колебаний измерялась посредством регистрации сигналов на протяжении всего эксперимента. Формы изгибных колебаний определялись путем одновременной записи сигналов всех пяти тензодатчиков. Изучение осциллограмм, показало, что фазы колебаний для всех точек стержня одинаковы, а амплитуды колебаний возрастают от крайних сечений к среднему. Следовательно, стержень во время колебаний принимает форму одной полуволны синусоиды.

4. Обработка временных процессов. Реконструкция фазовых траекторий.

В арсенале прикладного анализа дискретных временных процессов при решении задач идентификации находится огромное количество методов и алгоритмов. Многие из них, по сути, являются приложением или обобщением ранее разработанных на конкретную предметную область, поэтому целесообразно классифицировать их не по использованию в конкретных предметных областях, а по основным подходам к анализу временного ряда: статистический; спектральный; вейвлет; фрактальный; нелинейно-динамический и другие.

Одной из важнейших проблем является оценка информации, заложенной во временном процессе. Необходимость обработки и распознавания графических представлений временных процессов в технике, производственном контроле, радиолокации, медицинской диагностике, астрономических и биологических исследованиях часто сталкиваются с необходимостью обработки зашумленных изображений. Основными источниками шума являются как процесс обработки временных процессов, так и процесс их получения [8]. Работа датчиков зависит от их

качества и от различных внешних факторов имеющих место в эксперименте. Диапазон шумов, встречающихся при обработке временных процессов, достаточно широк.

Для подавления шумов существуют ряд методов предварительной обработки временных процессов. Однако в каждом отдельном случае, уровень оценивает специалист в области распознавания изображений в неавтоматизированном режиме. Очевидно, что идентификация шума требует от исследователя квалификации эксперта. Так, неточная оценка параметров шума могут привести к некачественной предварительной обработке временных процессов. В большинстве случаев априорная информация о характере шумов отсутствует, поэтому параметры метода предварительной обработки временных процессов подбираются путем настройки. Это влияет на дальнейший процесс обработки временных процессов. Так, как показано в [8], недооценка уровня мультипликативного шума вызывает большие разрывы контуров объектов изображений при решении задачи контурной сегментации. Это, в свою очередь, влияет на ошибку распознавания этих объектов. Завышенная оценка уровня аддитивной гауссовского шума ведет к размыванию контуров объектов, что также отражается на ошибке распознавания.

В фильтрации временных процессов выделяют линейные, нелинейные и смешанные методики. Нелинейные методики требуют использования специальных приемов, т.к. обычные спектральные или другие линейные фильтры могут привести к искажению нелинейной структуры временного ряда. Нелинейная фильтрация в отличие от линейной не опирается на информацию в частотной области с целью различения или очищения полезной составляющей временного ряда от шума. Вместо этого нелинейные фильтры используют реконструированное фазовое пространство, в котором ищутся детерминированные малоразмерные геометрические образования с последующим очищением их от шумовой компоненты.

На рис. 1,2 показан эффект удаления из экспериментального временного процесса шума.

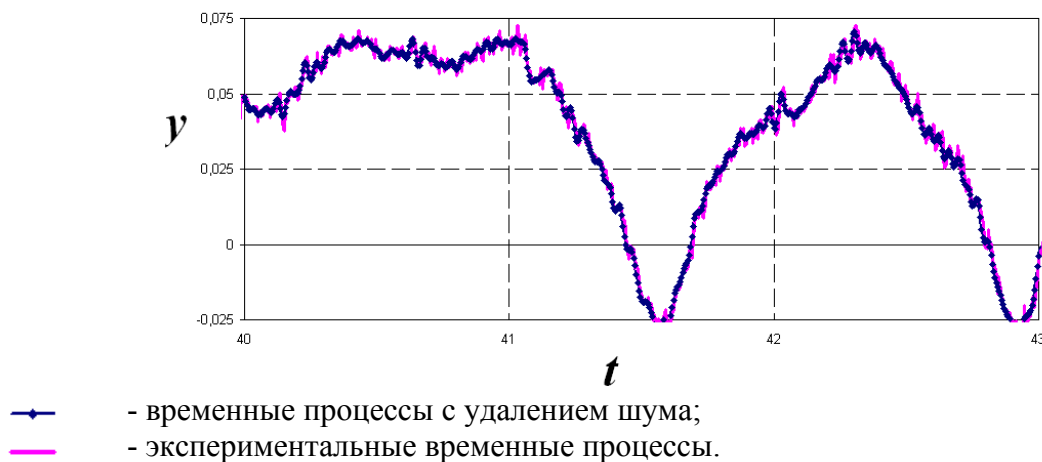


Рисунок 1. Временные процессы комбинационных колебаний

Представленные на рис. 3 фазовые траектории явно указывают на наличие кубической нелинейности в характеристике упругой силы исследуемой системы, а существование двух несмежных устойчивых режимов «малых» колебаний позволяет отнести систему к классу систем с перескоком.

Объем информации, который можно извлечь из конечного множества точек временного ряда, зависит от свойств фазовых траекторий и от свойств динамической

модели, породившей данные траектории. Однако в задачах реконструкции временного ряда свойства фазовых траекторий априорно неизвестны, поэтому каких-либо предварительных оценок их параметров сделать невозможно.

Анализ показывает, что даже при зашумлении временного процесса численная оценка параметров модели (1) становится весьма затруднительной. Данный факт является сигналом к удалению из временного процесса некоторого процента шума. Это позволит исследовать динамику механической системы, а не динамику шума и, в конечном счете, получить достоверные численные результаты.

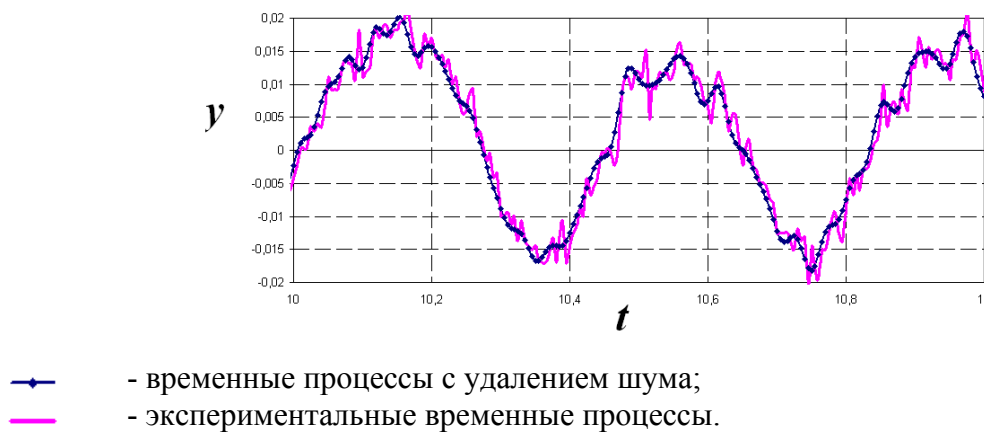


Рисунок 2. Временные процессы «малых» колебаний относительно нижнего положения равновесия

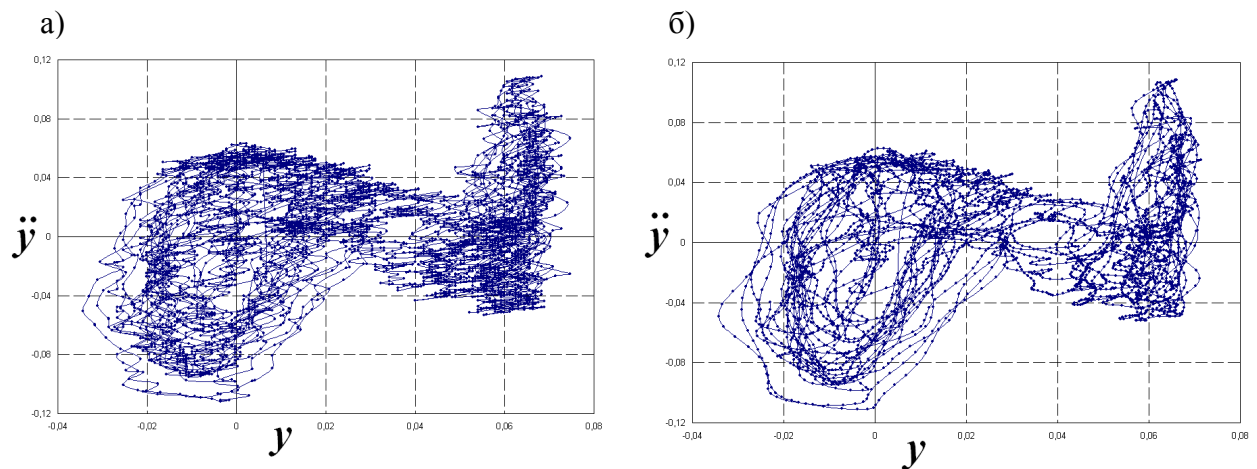


Рисунок 3. Фазовые траектории резонансных колебаний на частоте основного тона гибкого стержня: а) экспериментальные временные процессы; б) временные процессы с удалением шума .

Из рис. 3 видно, что при реконструкция временного ряда, отфильтрованного полосовым фильтром, появляются характерные сгустки траекторий вследствие устранения в процессе фильтрации исходных изломов траектории. Очевидно, что выполненная фильтрация несущественно изменила динамическую картину, присущую исходному временному процессу.

Литература

- [1] Андронов А.А., Е.А. Леонтович, И.И. Гордон, А.Г. Майер Качественная теория динамических систем второго порядка -М.: Главное издательство. Государственное издательство физико-математической литературы, 1966.- 568с.
- [2] Гроп. Идентификация механических систем. – М.: Мир, 1979. – 312 с.
- [3] Волкова В.Е. Анализ методов параметрической идентификации динамических систем//Сб. «Строительство, материаловедение, машиностроение» - вып.56, - Днепропетровск ПГАСиА. – 2010. – с. 104-109
- [4] Казакевич М. И., Волкова В. Е. Фазовые траектории нелинейных динамических систем. Атлас. – Днепропетровск: Наука и образование, 2002. – 94 с.
- [5] Казакевич М. И., Волкова В. Е. Динамика систем с двумя потенциальными ямами. – Днепропетровск: Арт-Пресс, 2000. – 160 с.
- [6] Меньшиков Ю.Л. Поляков Н.В. Идентификация моделей внешних воздействий.- Днепропетровск: Наука и образование, 2009.- 188с.
- [7] Плахтиенко Н.П. Методы идентификации механических колебательных систем// Прикладная механика. - 2000. - 36, № 12- С. 38 - 68.
- [8] Полякова М.В., Крылов В.Н. Мультифрактальный метод автоматизированного распознавания помех на изображении// Информационно-измерительные системы. -2006-№1 (17)- С.27-35.
- [9] Kerschen G., Worden K., Vakakis A.F., Golinval J.-C., Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics// Mechanical Systems. Signal Process.-vol. 20 (3)- 2006.-p 505–592.

PHASE TRAJECTORIES RECONSTRUCTION OF NOISED DYNAMIC SYSTEMS

Viktorija Volkova

Dnepropetrvsk national university of the railway transport named after academician V. Lazarya

The results of the experimental investigation of the buckled rod are given in the paper. The values of displacements and accelerations of a system were fixed, both at increasing and decreasing of an outer excitement for each of eccentrics in experiment. The mode of bending oscillations were determined by a simultaneous record of signals all of strain gauges. It had been shown, that for a given type and parameters of an outer excitement in investigated mechanical system the oscillations only on first mode are possible. The paper is devoted to development of methods of parametric identification of dynamic models with the use of phase trajectories on the “acceleration - displacement”. It is noted that in many cases low accurateness experimental date, require finding of both new methods of presentation of measuring information about of object and adequate methods of its treatment.