

АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФАЗОВОГО ПОРТРЕТА В МОНИТОРИНГЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

THE ANALYSIS OF PATTERNS OF PHASE PORTRAIT IS IN STRUCTURAL HEALTH MONITORING

*д.т.н., доц. Волкова В.Е., ГВУЗ Национальный горный университет,
Днепропетровск, Украина*

Dr. Professor Volkova V.E. (National Mining University, Dnepropetrovsk)

Аннотация

Статья рассматривает качественные методы анализа нелинейного динамического поведения систем.

Summary

The qualitative methods of analysis of the non-linear dynamic systems behaviour are come into a question. Application of phase trajectories in the extended space is suggested for structural health monitoring. The methods of phase portrait treatment are proposed with the purpose of decline of numerical operations. Standard phase portraits are given for some classes of the non- linear mechanical systems.

Введение

Одним из направлений повышения надежности элементов строительных конструкций, зданий и сооружений является мониторинг их технического состояния. Основная цель мониторинга состоит в прогнозировании возможности развития повреждений, возникновения аварийных состояний, или установления аварийных режимов работы объекта исследований. Для этого, фиксируют реакцию объекта на эксплуатационные и, или, тестовые воздействия. В дальнейшем, используя регрессионные методы, путем численного моделирования выполняется оценка характеристик объекта.

Целью настоящей статьи есть применение методов обработки данных при теоретическом исследовании поведения динамических систем для изучения их поведения. Задачи работы состоят в анализе уравнений, описывающих поведение динамических систем,

применении распознавания образов для классификации фазовых портретов.

1. Методы мониторинга технического состояния

Известные методы мониторинга технического состояния основаны на обнаружении повреждений в конструкциях зданий или сооружений в течение всего периода их эксплуатации. Несмотря на существенный интерес к данной проблеме и значительное число публикаций, единый подход отсутствует [6 – 8, 11]. Данные методы отличаются друг от друга набором фиксируемых при наблюдениях величин, методами их регистрации, передачи и дальнейшей обработки.

Измерения параметров и характеристик натуральных объектов может выполняться как в статическом, так и динамическом режимах. Соответственно прогнозирующие модели, построенные по результатам измерений могут быть статическими или динамическими.

Методы поиска дефектов с использованием статических аналитических моделей приводят к неполноте диагноза, так как реальные объекты по своей природе являются динамическими. В тоже время, существует ряд дефектов и повреждений конструкций зданий и сооружений, которые проявляются только исключительно при динамических нагружениях. Поэтому для выявления дефектов и повреждений статические режимы нагружения не эффективны.

Высокая информативность динамических режимов в сравнении со статическими, обуславливает необходимость использования прогнозирующих аналитических динамических моделей.

При всем своем многообразии, методы мониторинга технического состояния могут быть классифицированы как частотные и временные [6-8, 12]. Наибольшее распространение получили частотные методы обнаружения повреждений, которые связывают возникающие дефекты с изменением жесткости конструкций. Эти методы используют конечноэлементные модели и для оценки значений линейных модальных параметров, таких, как собственные частоты и формы колебаний для идентификации повреждений, а в некоторых случаях, даже для определения локализации повреждения. Предполагается, что изменения в модальных параметров конструкций на эксплуатации связаны с возникновением повреждений. Эти методы успешно применяются для идентификации больших уровней повреждений в конструкциях, но они не способны установить момент возникновения повреждения.

Временные алгоритмы основаны на вычислении определенных параметров через заранее установленный период времени. К этим

параметрам относятся деформации (напряжения), прогиб конструкций, крен зданий, амплитуда колебаний, которые вычисляются и сравниваются с нормируемыми значениями. Нормируемые значения регламентированы в соответствующих строительных нормах.

2. Фазовые траектории в идентификации динамических моделей

Основы качественной теории исследования динамических процессов были созданы Пуанкаре. Предложенные им графики, на которых движение точки представляется некоторой траекторией на фазовой плоскости (y, \dot{y}) , широко используются для изучения автономных систем с одной степенью свободы. Структура фазовых траекторий (y, \dot{y}) позволяет судить о периодичности динамических процессов и существовании особых точек, соответствующих устойчивым или неустойчивым положениям равновесия.

Область применения данных методов не ограничивалась задачами автономных колебаний. Фершингом в монографии [9] фазовые траектории на плоскости (y, \dot{y}) были использованы для нахождения периода аэроупругих колебаний пластины. Известны также попытки применить данные траектории в решении обратной задачи механики – идентификации. Так, в работе [6] автор, используя метод Шеффера, получил численные оценки диссипативных характеристик в отдельных точках фазового пространства. В отличие от указанных выше работ, целью данного исследования является получение не численных оценок параметров диссипативных характеристик, а их обобщенного графического образа, который более удобен для последующей обработки.

В работе [5] авторами впервые предложен метод автоматического отнесения изображения фазового портрета к одному из эталонных классов, применительно к динамическим системам с малым параметром. Особое внимание было уделено изучению поведения интегральных кривых в окрестностях особых точек.

Наибольший интерес представляет фазовая траектория на плоскости (y, \ddot{y}) . Кроме того, зависимость $\ddot{y}(y)$ обратно симметрична относительно оси \ddot{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 [11].

Фазовые траектории дают возможность увидеть всю совокупность движений, возникающих в динамической системе [1]. Нахождение стационарных решений – особых точек и предельных циклов, исследование их устойчивости, выделение областей притяжения устойчивых стационарных режимов в фазовом пространстве является задачей качественной теории динамических систем.

3. Динамические модели механических систем

Нелинейность упругих характеристик встречается во многих механических системах, таких как стержни, балки, мембраны, оболочки, элементы пружинных контактных или сигнальных устройств, вибраторы, некоторые виброзащитные системы и пр. Она является причиной неизохронности, возникновения суб- и ультрагармонических колебаний, существования нескольких устойчивых режимов колебаний на фиксированной частоте внешнего возмущения, перескоков. В отличие от линейных систем, в динамических системах с нелинейной характеристикой упругой силы возможно большее число резонансных диапазонов частот, в которых развиваются колебания на частоте внешнего возмущения, а также колебания с другими более высокими или низкими частотами.

В 1918 г. была опубликована монография Дуффинга, посвященная исследованию одного из основных уравнений нелинейной механики (1), которое по установившейся традиции называется уравнением Дуффинга. Оно является одним из тестовых уравнений нелинейной механики. Результаты, полученные при исследовании уравнения Дуффинга, как правило, могут быть перенесены на системы с более сложными полиномиальными нелинейностями. Именно это предопределило выбор типа уравнения.

Предположим, что динамическое поведение изучаемых систем при моногармоническом возмущении и вязком трении описывается уравнением вида

$$\ddot{y} + \varepsilon \dot{y} + \alpha y + \gamma y^2 + \beta y^3 + F_0 = F_1 \cos(\omega t), \quad (1)$$

где ε – коэффициент демпфирования; α, γ, β – коэффициенты, определяющие упругую характеристику $R(y)$; y – обобщенная координата; F_0, F_1, ω – параметры внешнего возмущения.

В данной статье представлены результаты качественного исследования резонансных колебаний шести систем:

– линейной ($\alpha > 0$; $\gamma = 0$; $\beta = 0$; $F_0 = 0$) (рис.1. а);

– нелинейных симметричных систем: – «мягкой» ($\alpha > 0$; $\gamma = 0$; $\beta < 0$; $F_0 = 0$) (рис.1. б); – «жесткой» ($\alpha > 0$; $\gamma = 0$; $\beta > 0$; $F_0 = 0$) (рис.1. в);

– нелинейной несимметричной «жесткой» системы ($\alpha > 0$; $\gamma \neq 0$; $\beta > 0$; $F_0 \neq 0$) (рис.1. г);

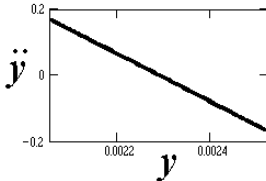
– нелинейных систем с двумя потенциальными ямами:

– симметричной ($\alpha > 0$; $\gamma = 0$; $\beta = 0$; $F_0 = 0$);

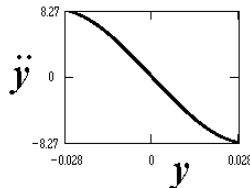
– несимметричной ($\alpha > 0$; $\gamma < 0$; $F_0 \neq 0$ либо $\alpha < 0$; $\gamma \neq 0$; $F_0 \neq 0$).

Выполним анализ, представленных на рис. 1 фазовых траекторий резонансных колебаний нелинейных динамических систем. Резонансным колебаниям систем с «мягкой» и «жесткой» упругими характеристиками соответствуют траектории на плоскости (y, \ddot{y}) , имеющие вид кубических отрицательной и положительной парабол соответственно. Траектории как резонансных, так и нерезонансных траекторий линейных систем – прямые.

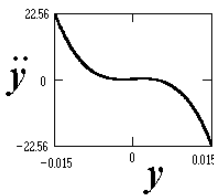
а)



б)



в)



г)

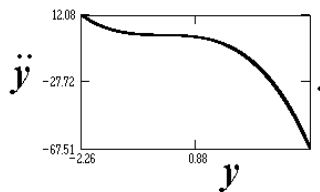


Рис.1. Фазовые траектории на плоскости (y, \ddot{y}) резонансных колебаний

Траектории нерезонансных колебаний систем с нелинейной характеристикой упругой силы ввиду малости перемещений подобны траекториям линейных систем. Траектории колебаний систем с

несимметричной характеристикой упругой силы несимметричны относительно начала координат. Траектории «больших» резонансных колебаний на частоте внешнего возмущения для систем с двумя потенциальными ямами подобны траекториям резонансных колебаний систем с «жесткой» упругой характеристикой. Для резонансных колебаний основного тона фазовые траектории на плоскостях (y, \dot{y}) и (y, \ddot{y}) для систем с «жесткой» характеристикой упругой силы имеют вид эллипсов, временные процессы $\ddot{y}(t)$ – пилообразный вид. Семейство фазовых траекторий на плоскости (y, \dot{y}) вырождается в отрицательную кубическую параболу.

Список литературы

1. Андронов А. А., Качественная теория динамических систем второго порядка./Андронов А. А., Леонтович Е. А., Гордон И. И., Майер А. Г. — М.: Наука, 1966.
2. Баутин Н. Н. Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости./Баутин Н. Н., Леонтович Е. А.— М.: Наука, 1976.
3. Биркгоф Дж. Д. Динамические системы.— М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. (переизд. 1941).
4. Волкова В. Е. Реконструкция фазовых траекторий динамических систем с шумом / Волкова В. Е. // Сб. науч. тр. – «Теоретические основы строитель-тва». – Днепропетровск: ПГАСА, 2011. – с. 323-328. ISBN 978-83-7207-958-9
5. Класифікація зображень фазового портрета при аналізі поведінки динамічних систем / А.В Карпукін, А.В. Гороховатський // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. – 2011. – № 1 (75). – С. 52–55.
6. Кононенко В. О., Плахтиенко Н.П. Методы идентификации механических нелинейных колебательных систем– К.: Наук, думка, 1976. – 114 с.
7. Меньшиков Ю.Л. Идентификация внешних воздействий./ Меньшиков Ю.Л., Поляков Н.В– Днепропетровск.: Наука и образование, 2009. – 188с.
8. Никульчев Е. В. Геометрический подход к моделированию нелинейных систем по экспериментальным данным./ Никульчев Е. В. — М.: МГУП, 2007.— 162 с. ISBN 978–5–8122–0926–1
9. Фершинг Г. Основы аэроупругости. – М.: Машиностроение, 1984. – 600 с.