

Таблица 3.

Данные расчетов конечного рабочего давления

Интервал тампони- рования, м	Допустимое давление на забое скважи- ны, $\Delta P$ , МПа	Потери напора в трубо- проводе, $\Delta P_{mp}$ , МПа	Напор подземных вод, $P_k$ , МПа	Гидростатиче- ское давление тампонаж-ного раствора, $P_z$ , МПа	Конечное ра- бочее да- вление нагнетания $P_m$ , МПа
2,0-8,0	3,38	0.26	0.0	0.14	2,5 -3,5
8,0-16,0	4,42	0.36	0.0	0.28	3,5 - 4,5
16,0-22,0	5,39	0,46	0,0	0,35	4,5 - 5,5

Выводы. Выполненные работы по цементации грунтов под опорами позволили предотвратить дальнейшие деформации путепровода. Экономические расчеты показали, что стоимость работ по цементации малосвязных и неустойчивых грунтов методом напорной инъекции в два раза меньше по сравнению с сооружением буронабивных свай и в три раза дешевле по сравнению с сооружением железобетонной плиты под фундаментами зданий и сооружений.

#### Список литературы

1. Ю.А. Полозов, А.Ю. Лазебник «Укрепление и стабилизация несвязных грунтов под фундаментами зданий и сооружений находящихся в аварийном состоянии», Академия Строительства Украины «Технология и проектирование подземного строительства: Вестник. – Донецк: Норд Пресс, 2003. – Вып.3. -198с.
2. Ю. А. Полозов, А. Ю. Лазебник, С. В. Пожидаев, С.И.Головки « Опыт закрепления просадочных грунтов методом напорной инъекции» », Академия Строительства Украины, «Технология и проектирование подземного строительства: Вестник. – Донецк: Норд Пресс, – Вып.9. 2009г.- 212с.
3. ДБН В.2.1.-10-2009 «Основания и фундаменты сооружений. Основные положения проектирования», Киев, Минрегионстрой Украины, 2009. - 108 с.

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

*В.Е. Волкова, Государственный ВУЗ «Национальный горный университет», Украина*

Статья посвящена развитию методов мониторинга технического состояния элементов конструкций и сооружений. Автором передано применение экспериментальных записей ускорений и перемещений для оценки динамических характеристик фланцевых соединений. Представлены эталонные фазовые портреты на плоскости «ускорение – перемещение» для динамических моделей узлов металлических конструкций.

### Введение

Развитие современной строительной науки неразрывно связано с появлением новых конструктивных форм, повышением уровня эксплуатационной надежности, рациональным использованием строительных материалов, созданием принципиально новых методик расчета, проектирования зданий и сооружений.

Большинству современных сооружений соответствуют весьма сложные расчетные схемы, и обеспечить их надежность, с достаточной достоверностью, теоретическим путем чрезвы-

чайно трудно. Заметим, что расчетные схемы даже для относительно простых конструкций, как правило, лишь частично отражают их действительную работу.

Ввиду этого в современном строительстве неуклонно возрастает роль экспериментальных методов исследований на основе широкого применения различных методов моделирования работы строительных конструкций.

### **1. Цели и задачи диагностики технического состояния элементов конструкций**

Основная задача диагностики технического состояния элементов конструкций состоит в распознавании текущего состояния объекта, которое может быть описано множеством диагностических признаков. В тех случаях, когда объект диагностирования прост, т.е. количество диагностируемых признаков не велико, задачи формирования эталонов и распознавания текущего состояния могут быть решены аналитически. При диагностике технического состояния сложных объектов эталоны должны быть определены заранее. В этом случае задача распознавания технического состояния объекта сводится к классификации диагностических признаков [1,3]. Сложность получения достоверных оценок о текущем состоянии объекта заключается в том, что анализ должен проводиться в эксплуатационных условиях при наличии ряда ограничений на доступность измерений величин.

Техническое состояние зданий, сооружений, а также их отдельных элементов зависит от конструктивных параметров и возмущений, которые изменяются во времени и могут стать причиной параметрического отказа.

Изменение текущего состояния в ряде случаев можно контролировать путем измерения динамических характеристик отдельных элементов конструкций.

В тоже время происходят медленные, по сравнению с частотой колебаний конструкций процессы вызванные изменением основных эксплуатационных показателей, изменения, которые обусловлены процессами старения материалов. Таким образом, можно выделить два вида характерных процессов - быстрые, определяющие техническое состояние объекта в текущий момент времени, и медленные, определяющие параметрическую надежность системы. Первые из них характеризуются быстроменяющимися параметрами, вторые - медленноменяющимися [10].

Анализируемые диагностические признаки отличаются информативностью и диагностической ценностью. Построение диагностических моделей и определение веса диагностического признака имеют важное теоретическое значение, но весьма трудны для практической реализации. Ввиду этого более рациональным является поход, в основе которого лежит применение эталонных портретов. Эталонный портрета объекта контроля включает набор диагностических признаков, отражающих динамические характеристики объекта контроля при его нормальном функционировании. С целью обнаружения и идентификации развивающихся отклонений от нормального состояния выполняется сопоставление с текущими портретами, получаемыми с помощью информационно-измерительных устройств в ходе эксплуатации.

### **2. 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 - 10,13]. Данные методы отличаются друг от друга набором фиксируемых при наблюдениях величин, методами их регистрации, передачи и дальнейшей обработки. Однако, при всем своем многообразии, методы мониторинга технического состояния могут быть классифицированы как частотные и временные [6-10,13]. 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. Заметим, что для зданий и сооружений, изменение частот и форм колебаний, может быть вызвано изменениями режима эксплуатации, что затрудняет

использование частотного метода в случаях возникновения значительных повреждений. Основным недостатком существующих методов [6-10,13], является то, что они применяют линейные динамические модели к анализу, как исходного объекта, так и объекта имеющего повреждения, что противоречит физической стороне процесса. Нелинейные эффекты, в данных методах усредняются и распределяются равномерно между параметрами отдельных мод.

### **3. 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. 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 [1,2], И.И. Гордону, А.М. Ляпунову, Дж. Биркгофу [4]. 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  $(y, \dot{y})$ .

Область применения данных методов не ограничивалась задачами автономных колебаний. В монографии Фершинга 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 фазовых 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.

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 [12].

### **4. Фланцевые соединения металлических конструкций**

Фланцевые соединения на высокопрочных болтах получили широкое распространение в монтажных стыках рамных конструкций. Несомненным преимуществами таких соединений являются простота изготовления, отсутствие ограничений на климатические условия района строительства, а также возможность последующего демонтажа конструкций без повреждений несущих конструкций. Как показано в фланцевые соединения характеризуются высокой надежностью при действии динамических нагрузок.. Таким образом, фланцевые соединения являются более эффективными по сравнению с другими типами монтажных соединений.

Ранее в работе [13], авторами была предложена динамическая модель болтового соединения, в которой характеристика упругой силы имела вид

$$m \ddot{y}_k + H(\dot{y}_k, y_k) + R(y_k) = F(t) \quad (1),$$

где  $y$ - обобщенная координата;  $m$ - масса,  $H(\dot{y}_k, y_k)$ - диссипативная характеристика;  $R(y_k)$ - упругая характеристика;  $F(t)$  - внешнее возмущение.

В уравнении (1) авторы предложили [13], что упругая характеристика исследуемой динамической системы представляет собой комбинацию полиномиальной функции перемещения

и характеристики типа «люфт». Полиномиальная характеристика описывает смятие контактных поверхностей элементов, а «люфт» - проскальзывание элементов.

$$R(y) = k_0 + k_1 y + \sum k_n y^n + K_{db},$$

$$\text{где } K_{db} = \begin{cases} k_{db}(y - y_{db}) & \text{для } y_{db} \leq y \\ 0 & \text{для } -y_{db} \leq y \leq y_{db} \\ k_{db}(y + y_{db}) & \text{для } y \leq -y_{db} \end{cases} \quad (2),$$

где  $k_0$  - начальное усилие в соединении,  $kx$  - линейная упругая характеристика;  $\sum k_n y^n$  - нелинейная упругая характеристик  $y_{db}$  - люфт соединения.

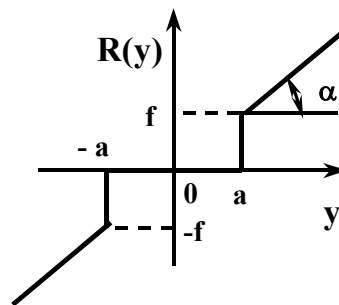
Исследуемая система является существенно нелинейной. Частота свободных колебаний данной системы зависит от амплитуды колебаний. Анализ представленной «скелетной» амплитудно-частотной зависимости (см. Рис. 1. б) позволяет выявить зону многозначности амплитуд. Механизмы диссипации энергии колебаний в болтовых соединениях весьма сложны. Экспериментально установлено, что величина рассеиваемой энергии зависит от материала контактных поверхностей, величины их обжатия, величины зазора, частоты внешнего возмущения. Таким образом, диссипативная характеристика [13] может быть представлена в виде

$$H(y, \dot{y}) = C_1 \dot{y} + \sum C_n \dot{y}^n + C_{db} + F \operatorname{sign}(\dot{y}) + g(y) \operatorname{sign}(\dot{y}),$$

$$\text{где } C_{db} = \begin{cases} C_{db}(\dot{y}) & \text{для } y_{db} \leq y \\ 0 & \text{для } -y_{db} \leq y \leq y_{db} \\ C_{db}(\dot{y}) & \text{для } y \leq -y_{db} \end{cases} \quad (3),$$

где  $C_1$  - коэффициент вязкого трения;  $\sum C_n \dot{y}^n$  - полиномиальная диссипативная характеристика;  $C_{db}$  - кулоново трение;  $F \operatorname{sign}(\dot{y})$  - трение пропорциональное внешнему возмущению;  $g(y) \operatorname{sign}(\dot{y})$  - позиционное трение.

а)



б)

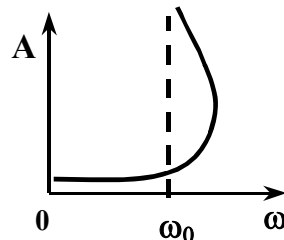


Рисунок 1. Динамический характеристики исследуемой системы: а) упругая характеристика; б) «скелетная» амплитудно-частотная зависимость  $\omega_0^2 = \operatorname{tg} \alpha$

Заметим, что, так как эти характеристики (2) и (3) имеют разрывные нелинейности, то оценка ее параметров на основе применения метода наименьших квадратов к результатам экспериментальных исследований встречает существенные вычислительные трудности.

В тоже время графическая обработка отображений фазовых траекторий позволяет установить тип нелинейности упругих и диссипативных характеристик, установить численные значения параметров.

Очевидно, что практически невозможно, и более того, совершенно нецелесообразно сведение всех задач динамики механических систем к одной универсальной математической модели или расчетной схеме.

### 5. Основные выводы

Сопоставляя полученные результаты, можно сделать следующие выводы. Предлагаемый автором метод непараметрической идентификации открывает новые возможности для обработки данных. Данный метод может быть применен как системам с гладкими, кусочно-линейными, так и разрывными типами характеристик.

Возможности предлагаемого метода ограничены только уровнем шумов, погрешностью измерения и объемом выборки обрабатываемого процесса.

### 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. Биргер И.А. Определение диагностической ценности признаков // Кибернетика. — 1968. — № 3.— С. 80 — 85.
4. Биркгоф Дж. Д. Динамические системы.— М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. (переизд. 1941).
5. 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
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. Суцев С.П. Мониторинг технического состояния несущих конструкций зданий и сооружений / Суцев С.П., Самарин В.В., Адаменко И.А., Сотин В.А. - Мониторинг. Наука и безопасность. - 2011.-№1 – С. 24-32.
10. Харкевич А.А. О ценности информации // Проблемы кибернетики. — 1960. — Вып. 4.
11. Kerschen G. Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics/Kerschen G., Worden K., Vakakis A.F., Golinval J.-C. // Mechanical Systems. Signal Process-2006.-vol. 20 (3)-P 505–592.
12. Volkova V. E. Qualitative theory and identification of dynamic system with one degree of freedom / Volkova V. E., Schneider K.// Прикладная механика. – 2005. – Т. 41, № 6. – С. 134–139.
13. Worden K. Nonlinearity in Structural Dynamics: Detection, Identification and Modelling./Worden K., Tomlinson G.R. (2001) -New-York: Institute of Physics Publications, 2001 -678p.