УДК 533.6.013.42; 696.2

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ
IDENTIFICATION OF DYNAMIC MODEL OF STRUCTURAL ELEMENTS BOLTED JOINT

д.т.н., доц. ***Волкова В. Е*** *(Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В .Лазаряна)*

Dr., Prof. ***Volkova V. E.*** *(Dnepropetrvsk National University of the Railway Transport Named after Academician V. Lazaryan)*

Аннотации

Статья посвящена вопросам прогнозирования динамических свойств соединений металлических конструкций. Выполнен анализ методов идентификации динамических характеристик болтовых соединений. Автором предложено использование фазовых траекторий свободных колебаний и их отображений для оценки диссипативных и упругих свойств болтовых соединений.

Ключевые слова: болтовые соединения, идентификация, диссипативные и упругие характеристики, отображения фазовых траекторий.

The article is devoted the problems of ptediction of dynamic characteristics of steel structure joint.. The analysizis of identification methodsof dynamic behaviorus of the bolted joit is worked out. An author suggested the application of phase trajectories of natiural vibrations and its mapping for the evaluation of dissipative and elastic characteristics of the bolted joints.

Keywords: bolted joints, identification, dissipative and elastic characteristics, phase trajectory mappings .

Введение

Конструкции, здания и сооружения представляют собой системы связанных между собой отдельных конструктивных элементов. Узлы и сопряжения отдельных конструктивных элементов осуществляют передачу нагрузки от одного конструктивного элемента к другому. Сложное поведение соединений конструктивных элементов оказывает существенное влияния на динамические характеристики всей конструкции, здания или сооружений, например, такие как собственные частоты, формы колебаний и нелинейный характер реакции на внешнее возмущение. В настоящее время возникла необходимость в разработке методологии построения прогнозирующих моделей соединений конструкций.

1. Особенности динамического поведения болтовых соединений

Динамическое поведение металлических конструкций имеет сложный характер, так как каждый узел соединения отдельных конструктивных элементов включает в себя различные источники неопределенности с негладким нелинейными характеристиками.

Основными источниками нелинейностей моделей конструкций на болтовых соединениях являются: силы, возникающие в зонах контакта поверхностей, несовершенства самих контактных поверхностей из-за допусков изготовления. Заметим, что при наличии боковых сил в соединениях начальные усилия распределяются неравномерно. При воздействии эксплуатационных динамических нагрузок, наблюдается релаксация усилий в болтах, что приводит к временным изменением динамических свойств конструкции.

Большинство известных работ направлено на исследование механизмов диссипации энергии в болтовых соединениях, линейной идентификации динамических свойств болтовых соединений.

2. Анализ существующих методов идентификации динамических характеристик болтовых соединений

Существующие методы совместного определения динамических характеристик соединений металлических конструкции, как правило они основаны на обработке амплитудно-частотных характеристик, полученных экспериментальным путем[6] .

Так, Yoshimura провел ряд экспериментальных исследований для оценки динамических характеристик и количественные значения жесткости и демпфирования для болтовых и сварных соединений применительно к конструкциям, использующимся в машиностроении. Полученные в этой работе модальные параметры в дальнейшем были применены в ряде исследований для идентификации узлов строительных конструкций. В частности, в [4] был предложен метод идентификации параметров узлов металлических конструкций, на основе анализа собственных частот и форм колебаний конструкций. Yuan и Wu [7] и Kim [5] использовали упрощенную конечноэлементную модель для определения модальных характеристик и оценки жесткостых и диссипативных свойств узлов.

Однако, эти методы требуют точной оценки модальных параметров, которые трудно получить, особенно в случаях связанных и быстро затухающих мод.

3. Применение отображений фазовых траекторий в расширенном пространстве для выявления нелинейности

Традиционно, исследование динамических систем происходит во временной области. Развитие геометрических методов позволило получить решения для ряда важных прикладных задач [1], и указало на необходимость исследования для нелинейных систем качественного поведения. В основе нелинейной динамики лежат работы А. Пуанкаре, А. М. Ляпунова, Ж. Адамара. Существуют примеры успешного использования методов нелинейной динамики для анализа и обработки сигналов и построения моделей. Однако особенность данных подходов состоит в том [2], что их применение к экспериментальным данным алгоритма реконструкции не имеет своей целью получение модели, способной воспроизводить исходный режим.

Известно, что ускорения точек более чувствительны к отклонениям колебаний от гармонических. Возможен и иной выбор параметров фазовых плоскостей [8]. Наибольший интерес представляет фазовая плоскость $\left(y, \ddot{y}\right)$. Это связано с тем, что энергетические критерии на ней интерпретируются наиболее наглядно.

Предположим, что нам неизвестны функции, описывающие диссипативную и восстанавливающую силы. Первый вопрос при исследовании динамических свойств состоит в том, чтобы установить линейна система или нет.

Обозначим $\Pi_k = \{ y_k, \dot{y}_k, \ddot{y}_k \}$, $k = 1, \ldots, n$, множество точек, описывающих измеренные значения перемещений, скоростей и ускорений исследуемой системы в моменты времени $t_k = t_0 + kT$, где T – период внешнего возмущения. Если мы представим эти точки в расширенном фазовом пространстве $\left(y, \dot{y}, \ddot{y}\right)$, то получим набор точек, параметрически связанных по времени t_k.

Предположим, что ошибка измерений отсутствует, тогда

$$m\,\ddot{y}_k + H(\dot{y}_k, y_k) + R\left(y_k\right) = c \qquad (1)$$

где $c = F\left(t_0\right) = F\left(t_k\right)$ – постоянная величина для всех значений k.

Это означает, что все точки находятся на поверхности, которая может быть описана уравнением $mw + h\left(u, v\right) + r\left(u\right) = 0$ в $\left(u, v, w\right)$ -пространстве. Если функции, описывающие диссипативную и упругую характеристики механической системы $H(y,\dot{y})$ и $R(y)$, линейны, то поверхность в расширенном фазовом пространстве вырождается в плоскость, т. е. все точки множества Π_k должны лежать на плоскости E. Тогда, существуют два действительных числа – a_1 и a_2, такие, что все точки множества Π_k должны удовлетворять условию,

$$m\ddot{y}_k + a_1\dot{y} + a_3 y = c \text{, для } k = 1,\ldots,n, \qquad (2)$$

которое является признаком линейности системы. Изменим амплитуду вынуждающей силы $F(t)$ на $a_3\,F(t)$, где действительное положительное число $a_3 > 0$, то соответствующее множество результатов измерений $\Pi_k^{(a_3)}$ удовлетворяет условию $\Pi_k^{(a_3)} = a_3\,\Pi_k$, что является вторым признаком линейности системы. Конечно, на практике измерения имеют некоторую погрешность. Если существуют константы a_1 и a_2,такие что все измеренные точки лежат на плоскости или в окрестности плоскости определяемой a_1 и a_2 и c, то мы можем сделать заключение о том, что система (1) линейная или слабо нелинейная.

Ранее в работе [3],авторами была предложена динамическая модель болтового соединения, в которой характеристика упругой силы имела вид

$$R(y) = k_0 + k_1 y + \Sigma k_n y^n + K_{db}\text{, где } K_{db} = \begin{cases} k_{db}(y - y_{db}) & \text{для } y \quad y_{db} \\ 0 & \text{для } -y_{db} \quad y \quad y_{db} \\ k_{db}(y + y_{db}) & \text{для } y \quad -y_{db} \end{cases} \qquad (3),$$

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

Очевидно, что, так как эта характеристика (3) имеет 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.

Исследуем динамическую систему, описываемую дифференциальным уравнением (1). Предположим, что одна из характеристик $H(y,\dot{y})$ или

$R(y)$, задана. Для того чтобы определить неизвестную функцию предположим, что система предварительно находилась в состоянии равновесия. В начальный момент времени приложим периодическую внешнюю силу $F(t)$. Выполним измерения ускорений $\ddot{y}$, скоростей $\dot{y}$ и перемещений y в моменты времени $t_k = t_0 + kT$. Полученные результаты обозначим $\{\Pi_k\} = \{\bar{y}, \dot{\bar{y}}, \ddot{\bar{y}}\}$. Заметим, что все точки множества $\{\Pi_k\}$ удовлетворяют условию

$$r(\bar{y}_k) + h(\dot{\bar{y}}_k) = c - m\ddot{\bar{y}}_k, \qquad (4)$$

в предположении, что ошибка измерений отсутствует или мала. В случае когда $H(y, \dot{y})$ задано, возможно графически отобразить результаты на $(y, R(y))$-плоскости и получим параметрическую $R(y)$. Напомним, что отображения фазовых траекторий для стационарных процессов представляют собой неподвижную точку. Таким образом, количество анализируемых точек зависит от длины переходного процесса. Уровень диссипации в исследуемой механической системе, а также параметры внешнего возмущения существенно влияют на длину переходного процесса. Заметим, что для заданного уровня внешнего возмущения наибольшим значениям ускорений и перемещений будут соответствовать значения амплитуды стационарных колебаний.
Для разделения функций, описывающих характеристики упругой и диссипативной сил, предположим, что $h(y, \dot{y}) = h(\dot{y})$, т.е. характеристика диссипативной силы не зависит от перемещений, тогда в некоторые моменты времени выполняются условия
$h(\dot{\bar{y}}_k) = c - m\ddot{\bar{y}}_k$ для $\bar{y}_k = 0$, $r(\bar{y}_k) = c - m\ddot{\bar{y}}_k$ для $\dot{\bar{y}}_k = 0$.
Если полученное количество точек недостаточно для удовлетворительного представления зависимости упругой силы
$m\ddot{y}_k + H(\dot{y}_k, y_k) + R(y_k) = a_3\, F(t) + a_4$; $y(0) = 0$; $\dot{y}(0) = 0$,
где a_3, a_4 могут принимать произвольные значения.

Заключение

Таким образом, предложенный метод структурной идентификации, состоит в построении фазовых траекторий и их отображений в расширенном фазовом пространстве. На основе исследования экспериментальных данных, предложено выявление нелинейности структуры уравнений, решение которых имеет адекватное динамическое поведение, моделируя при этом качественную динамическую сложность изучаемого динамического процесса.

Список литературы:

1. Андронов А. А., Леонтович Е. А., Гордон И. И., Майер А. Г. Качественная теория динамических систем второго порядка.— М.: Наука, 1966.
2. Фершинг Г. Основы аэроупругости. – М.: Машиностроение, 1984. – 600 с.
3. E.F. Crawley, K.J. O'Donnell, Force-state mapping identification of nonlinear joints, American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal 25 (1987) 1003–1010.
4. Ibrahim R.A. , Pettit C.L. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners//Journal of Sound and Vibration 279 (2005) 857–936
5. [163] T.R. Kim, X.M. Wu, K.F. Eman, Identification of the joint parameters for a taper joint, American Society of Mechanical Engineers, Journal of Engineering for Industry 111 (1989) 282–287.
6. [171] M. Yoshimure, Measurement of dynamic rigidity and damping property of simplified joint models and simulation by computer, Annals CIRP 25 (1977) 193–198.
7. [176Yuan J.X., Wu X.M. , Identification of the joint structural parameters of machine tool by DDS and FEM, American Society of Mechanical Engineers, Journal of Engineering for Industry 107 (1985)64–69.
8. Volkova V. E., Schneider K. Qualitative theory and identification of dynamic system with one degree of freedom // Прикладная механика. т – 2005. – Т. 41, № 6. – С. 134–139.