

УДК 624.014.2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

Д-р техн. наук В. Е. Волкова

ВДОСКОНАЛЕННЯ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ СТРИЖНЕВИХ СИСТЕМ

Д-р техн. наук В. Є. Волкова

REFINEMENT OF DYNAMIC MODELS OF THE ROD SYSTEMS

D. Sc. (Tech.) V. E. Volkova

Автором рассматривается возможность применения методов понижения размерности динамических моделей к стержневым системам со многими степенями свободы. В статье представлены результаты натурных исследований и численного моделирования динамического поведения решетчатой смотровой башни. Путем разделения на независимые подструктуры выполнено понижение размерности исходной динамической модели. В целях верификации полученных моделей меньшей размерности выполнено сопоставление результатов моделирования методом конечных элементов и данных натурального эксперимента.

Ключевые слова: стержневые системы, динамические модели, понижение размерности модели, верификация модели, натурный эксперимент, решетчатые башни.

Автором розглядається можливість застосування методів зниження розмірності динамічних моделей стосовно стрижневих систем з багатьма ступенями свободи. Об'єктом дослідження є ґратчасті башти. Слід зазначити, що конструкції ґратчастих башт і оглядових майданчиків дуже чутливі до динамічних навантажень. Такі впливи можуть бути викликані не тільки дією вітру, льоду, землетрусами, ударами, вибухами, пішоходами, а й механічними відмовами деяких несучих елементів. Коливання, які збуджуються цими впливами, охоплюють широкий спектр частот. У сучасному аналізі динамічної поведінки механічних систем особлива увага направлена на розвиток складних комп'ютерних моделей. Однак зіставлення результатів чисельного моделювання і даних

натурних експериментів не завжди показує їхній задовільний збіг. Тому застосування дискретних моделей має ряд обмежень. Досліджуване спорудження включає в себе велику кількість різних підсистем і елементів: внутрішнє і зовнішнє ядра жорсткості, оглядові майданчики, сходи і огорожувальні конструкції. Елементи несучих конструкцій гратчастої бапти були виготовлені зі сталі, а елементи ходових площадок та огорож – з деревини. Внаслідок цього динамічна модель об'єкта містила понад тисячу параметрів, частина з яких відома з певною часткою ймовірності. При побудові динамічної моделі була виконана дискретизація вихідної системи і отримана система рівнянь методу скінченних елементів. Основне завдання дослідження полягає в редукації моделі і виявленні невеликої кількості змінних, що визначають динаміку системи., Тобто пошуку енергетичного «ядра» системи. У статті представлені результати натурних досліджень і чисельного моделювання динамічної поведінки гратчастої оглядової вежі. Шляхом поділу на незалежні підструктури виконано зниження розмірності вихідної динамічної моделі. З метою верифікації отриманих моделей меншої розмірності виконано зіставлення результатів моделювання методом кінцевих елементів і даних натурального експерименту.

Ключові слова: стрижневі системи, динамічні моделі, зниження розмірності моделі, верифікація моделі, натурний експеримент, гратчасті бапти.

The author considers the possibility of applying methods for reducing the dimensionality of dynamic models to rod systems with many degrees of freedom. The research object is the latticed tower. It should be noted that the designs of lattice towers and viewing platforms are very sensitive to dynamic loads. Such influences can be caused by the action of wind, ice, earthquakes, impacts, explosions, pedestrians, but also mechanical failures of some load-bearing elements. The vibrations excited by these effects cover a wide range of frequencies. In the modern analysis of the dynamic behavior of mechanical system, special attention is directed to the development of complex computer models. However, the comparison of the results of numerical simulation and the data of full-scale experiments does not always show their satisfactory coincidence. Therefore, the use of discrete models meets a number of limitations. The structure under study includes a large number of different subsystems and elements. Namely, the inner and outer hardness cores, observation platforms, stairs and enclosing structures. Elements of load-bearing structures of the lattice tower were made of steel, and elements of observation platforms and fences were made of wood. As a result, the dynamic model of the object contained more than a thousand parameters, some of which are known with a certain probability. Developing the dynamic models the initial system was sampled and a system of governing equations of the finite element method were obtained. The main objective of the study is to reduce the model and to identify a small number of variables that determine the dynamics of the system search for the energy "core" of the system. The results of field studies and numerical simulation of the dynamic behavior of a latticed observation tower are presented. By dividing into independent substructures the dimension of the original dynamic models are reduced. In order to verify the obtained models of lower dimension, the simulation results are compared by the finite element method and the data of the full-scale experiment.

Keywords: rod systems, dynamic models, reduction of the model dimension, model verification, full-scale experiment, lattice towers.

Введение. При анализе динамического поведения инженерных сооружений в ряде случаев возникает ситуация, когда существующая модель большой размерности может быть упрощена без

существенного изменения ее основных модальных характеристик. Это явление имеет место в тех случаях, когда наибольший интерес представляет поведение сооружения в целом, а не

отдельных ее элементов. Результаты, полученные для упрощенных моделей, более доступны для качественного анализа и дальнейших вычислений.

Для исследования колебаний механических систем большой размерности существует ряд методов редукции расчетных моделей, основанные на исключении некоторых физических координат или подсистем [1-3]. Они включают в себя методы разделения на слабосвязанные подсистемы, а также методы агрегирования элементов с различным уровнем энергии. Основным и наиболее ответственным этапом применения данного метода является введение критериев слабых взаимодействий между отдельными подсистемами, формирующими модель. Редуцированные таким способом модели должны качественно отражать динамическое поведение исследуемого объекта и сохранять заданную степень точности расчета в исследуемом диапазоне частот.

Анализ последних исследований и публикаций. В современном анализе динамического поведения механических систем особое внимание направлено на развитие сложных компьютерных моделей. Данные модели, как правило, используются для решения двух основных типов задач. Первая задача состоит в оценке реакции исследуемой механической системы на внешние возмущения, в то время как вторая задача заключается в предсказании влияния изменений или модификаций самой механической системы на ее динамические характеристики.

К сожалению, существующая база данных полномасштабных динамических исследований решетчатых башен очень ограничена [1-4]. В работе Kitipornchai [2] обнаружено, что поведение решетчатых башен нелинейно. Это можно объяснить наличием зазоров и возможностью проскальзывания в узлах и соединениях. Поведение болтовых соединений линейно при нагрузках, не превышающих величину

силы трения в соединении. Однако при больших значениях нагрузок наблюдается проскальзывание. Это приводит к проявлению локальной нелинейности. Нагрузка на проскальзывание болта связана с его предварительным натяжением [3], который является параметром, что не всегда хорошо контролируется на практике. Проскальзывание соединения приводит к потере жесткости и увеличению уровня затухания. Это подчеркивает возможную зависимость поведения решетчатых башен от уровня нагрузки. Glanville [4] были испытаны телекоммуникационные башни и полученные коэффициенты демпфирования от 0,5 % до 1 % были измерены на реакции свободных колебаний после вынужденной вибрации низкого уровня. Ostendorp [5] протестировал решетчатую башню высотой 30 м. Коэффициент демпфирования измерялся по временным процессам свободных колебаний после разгрузки и изменялся от 0 до 40 % со средним значением 17 %. В этом исследовании было установлена зависимость между коэффициентом демпфирования и уровнем нагружения.

Цели и задачи исследования. Цифровые компьютеры генерируют прогнозы динамического поведения механических систем на основе дискретных моделей. Однако сопоставление результатов численного моделирования и данных натурных экспериментов не всегда показывает их удовлетворительное совпадение. Поэтому применение дискретных моделей встречает ряд ограничений.

Основная задача данного исследования состоит в редукции модели и выявлении небольшого числа переменных, определяющих динамику системы, т. е. поиске энергетического «ядра» системы. Путем разделения на независимые подструктуры выполнено понижение размерности исходной динамической модели. В целях верификации полученных моделей меньшей размерности выполнено сопоставление результатов моделирования

методом конечных элементов и данных натурального эксперимента.

Основная часть исследования. При исследовании динамических систем со многими степенями свободы естественны подходы декомпозиции. Основная проблема редукции моделей механических систем состоит в выявлении небольшого числа переменных, определяющих их динамическое поведение. Однако произвольный выбор управляющих переменных малоэффективен [6].

Особенностью колебаний механических систем со многими степенями свободы есть проявление слабых взаимодействий между подсистемами. Декомпозиция с помощью разделения на независимые подструктуры возможна в тех случаях, когда колебания в слабосвязанных подсистемах происходят практически независимо [6]. А именно, собственные частоты связанной системы близки с точностью до некоторого малого параметра ε к собственным частотам несвязанных парциальных подсистем. Декомпозиция модели может быть также выполнена и с помощью агрегирования элементов. При таком подходе число степеней свободы механической модели уменьшается вследствие объединения низкочастотных и высокочастотных элементов. В последние годы получили распространение также численные методы понижения размерности динамических моделей. Привлекательной чертой таких методов, несомненно, является возможность их реализации в программных продуктах. Однако, как отмечается в работах [7, 8], такие методы являются в значительной мере эвристическими, и результаты их применения не всегда удовлетворительны.

Объектом исследования является смотровая башня высотой 36,48 м, которая расположена в Дзинтари (город Юрмала, Латвия). Конструктивная схема башни представлена на рис. 1. Сооружение состоит из усиленного внутреннего ядра жесткости с размерами 1500x1500 мм из

труб с поперечным сечением 200x200x8 и наружным кольца размером 4240x4240 мм (рис. 1), выполненного из труб с поперечным сечением 140x140x5 мм. Все несущие элементы башни, а именно внутреннее и внешнее ядро жесткости, платформы и лестницы, выполнены из стали. Элементы облицовки фасада и облицовки ядра жесткости выполнены из древесины. Вертикальные связевые элементы отсутствуют.

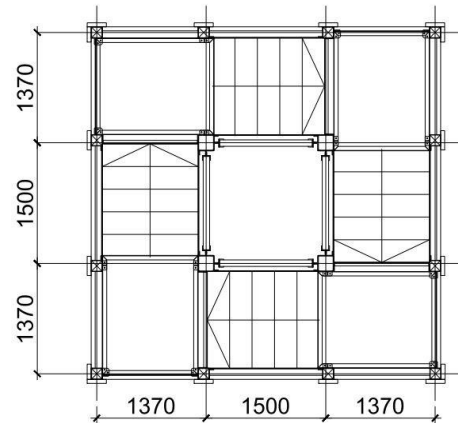


Рис. 1. Схема поперечного сечения смотровой башни

Для оценки динамических свойств башни была создана трехмерная модель метода конечных элементов. Модальный анализ данного сооружения был выполнен в программном пакете STRAP 12.5 [9]. Основные частоты и формы колебаний структурной системы были определены путем решения уравнения незатухающих свободных колебаний [10]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0, \quad (1)$$

где M – матрица массы;
 K – матрица жесткости;
 \ddot{u} – вектор ускорения;
 u – вектор перемещений.

Численное решение уравнения было получено методом итерации подпространств.

Чтобы оценить влияние отдельных подсистем на динамическое поведение сооружения в целом, было рассмотрено три динамические модели [10]. Первая упрощенная модель сооружения включала в себя только элементы внутреннего ядра жесткости. Вторая модель включала в себя

элементы как внутреннего, так и внешнего ядер жесткости. При формировании третьей модели к элементам второй модели были присоединены элементы лестничных маршей и ходовых площадок. Результаты модального анализа для всех трех моделей представлены в таблице.

Таблица

Результаты численного моделирования

Модель	Описание модели	Частоты форм колебаний, Гц		
		1-я форма	2-я форма	3-я форма
1	Только внутреннее ядро жесткости	1.521	1.521	6.051
2	Внутреннее и внешнее ядра жесткости	0.874	0.874	2.031
3	Внутреннее и внешнее ядра жесткости и лестницы	1.506	1.511	2.010

Особенностью конструктивной схемы исследуемого сооружения является симметрия элементов внешнего и внутреннего ядер жесткости относительно центральных осей (рис. 1), вследствие чего частоты первой и второй форм изгибных колебаний решетчатой башни для первой и второй модели близки. Это также иллюстрируется в таблице. Однако данная закономерность не наблюдается для третьей модели, т. к. введение дополнительных элементов, а именно лестниц и ходовых площадок, нарушило симметрию модели относительно центральных осей.

Анализируя третью модель, заметим, что лестницы увеличивают жесткость башни в горизонтальном направлении. Вследствие этого частоты колебаний по 1 и 2 модам возрастают. Как и ожидалось, фундаментальные частоты формы первой и второй мод главным образом зависят от жесткости внутреннего ядра. Внешнее ядро не имеет вертикальных связей и жесткость его незначительна. Таким образом, оно выступает в качестве присоединенной массы, снижая частоту колебаний всей башни.

Результаты натурного эксперимента.
Для качественного исследования

диссипативных и упругих характеристик были проведены динамические испытания решетчатой башни в Дзинтари [11]. Внешнее возмущение создавалось движением двух человек во времени с метрономом при каждой собственной частоте башни. Внешнее возмущение прекращалось при достижении резонансных режимов колебаний, затем наблюдались свободные колебания башни до полной остановки. Испытания на вынужденную вибрацию проводились в спокойных атмосферных условиях для устранения любых аэродинамических эффектов. В ходе экспериментов были измерены и записаны вибрационные ускорения точек верхней площадки башни (рис. 2).

Для записи ускорений использовались пять акселерометров трехосных USB акселерометров модели X6-1A. Частота дискретизации сигналов датчиков составляла 160 Гц. Это значение превышало наибольшее значение модальной частоты, полученное при численном моделировании, и обеспечивало корректность обработки сигналов. Вес датчиков был невелик – 55 г – и поэтому не мог вносить помехи в инерционные характеристики объекта.

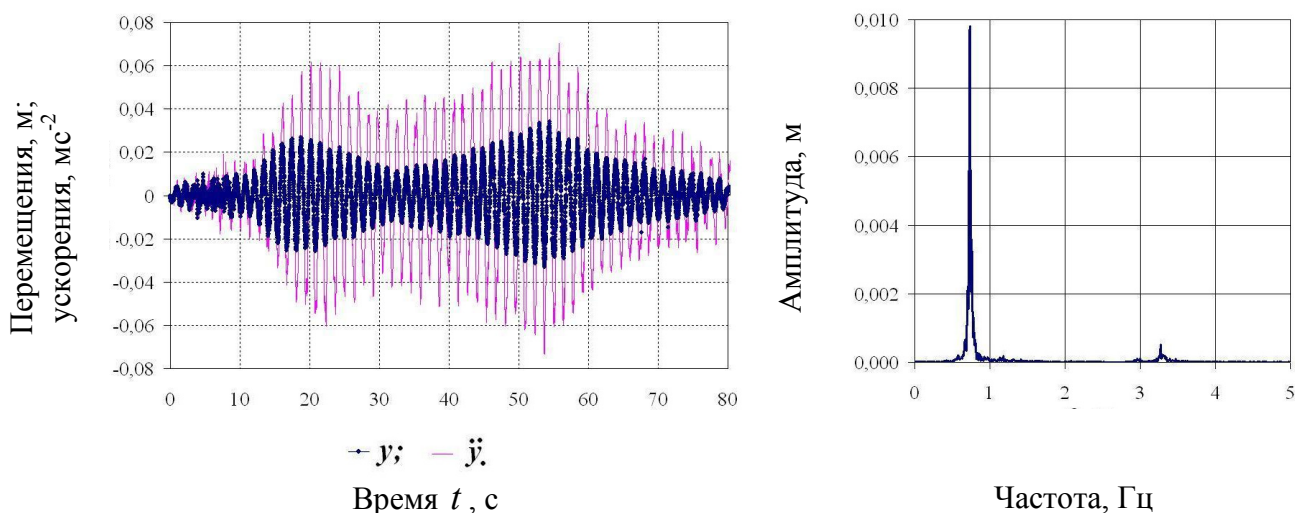


Рис. 2. Экспериментальные записи временных процессов и спектральные характеристики

Учитывая, что точный момент окончания действия внешнего возмущения не регистрировался, то отклик фиксировался на протяжении всего эксперимента, вплоть до перехода конструкции в состояние покоя. В программном комплексе Matlab было выполнено быстрое преобразование Фурье записей ускорений. Типичные записи временных процессов и спектральные характеристики представлены на рис. 2.

Как следует из рис. 2, сигнал состоит из нескольких частот: отклика конструкции на ее первой собственной частоте, которая составляет около 0.736 Гц; отклика конструкции на частоте 3.27 Гц; высокочастотных компонентов с частотой более 9 Гц, которые могут быть отнесены к шуму или вкладу колебаний более высоких мод.

Отметим, что экспериментальное значение частоты первой формы колебаний ниже, чем ее численная оценка (таблица). Это можно объяснить влиянием инерции деревянных элементов фасада, которым

пренебрегли при численном моделировании.

Выводы. Сопоставление результатов численного моделирования и экспериментальных данных позволяет утверждать, что жесткостные и инерционные характеристики внутреннего ядра жесткости определяют динамическое поведение решетчатой башни. В то же время влияние слабосвязанных систем элементов фасада вызывает и приводит к увеличению диссипации энергии и незначительному снижению собственных частот. Таким образом, в реальных механических системах слабые взаимодействия между подсистемами играют двойную роль. С одной стороны, повышается виброизоляция подсистем, что препятствует передаче вибрации. Однако, с другой стороны, усложняется процедура мониторинга технического состояния конструкции, выявления дефектов из-за слабой передачи энергии между подсистемами внутри системы.

Список использованных источников

1. Da Silva, J.G.S. Structural assessment of current steel design models for transmission and telecommunication towers [Text] / J.G.S. Da Silva, P.C.G.D. Da Vellasco, S.A L. De Andrade, M.I.R. De Oliveira // Journal of Constructional Steel Research. – 2005. – Vol. 61. – P. 1108–1134.

2. Kitipornchai, S. Effect of bolt slippage on ultimate behaviour of lattice structures [Text] / S. Kitipornchai, F.G.A. Al-Bermani, A.H. Peyrot // ASCE Journal of Structural Engineering. – 1994. – Vol. 120, Issue 8. – P. 2281- 2287.
3. Ungkurapinan, N. Joint slip in steel electric transmission towers [Text] / N. Ungkurapinan, S. Chandrakeerthy, S.R. De, R.K.N.D. Rajapakse, S.B. Yue // J. Engineering Structures. – 2003. – Vol. 25. – P. 779-788.
4. Glanville, M.J. Full-scale damping measurements of structures in Australia [Text] / M. J. Glanville, K.C.S. Kwok, R.O. Denoon // J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1996. – Vol. 59. – P. 349–364.
5. Ostendorp, M. Damping Characteristics of a Steel Lattice Structure [Text] / M. Ostendorp // Proceedings of the 15th ASCE Structures Congress, April 16, 1997, Portland, Oregon. – P. 358-362.
6. Банах, Л. Я. Методы декомпозиции и редукции динамических моделей при колебаниях механических систем [Текст] / Л. Я. Банах // Вестник научно-технического развития. – 2012. – Т. 58, № 6. – С. 3–8.
7. Kurbatov, V. G. Subspace methods of approximate solving of differential equations from the point of view of functional calculus [Text] / V. G. Kurbatov, I. V. Kurbatova // Eurasian Math. Journ. – 2012. – Vol. 3, № 4. – P. 53–80.
8. Mitsuharu, Kurata1. Dynamic reduction and recovering based on substructuring method [Text] / Mitsuharu Kurata1, Buntara Sthenly Gan1, Eiji Nouchi1 // Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2014 Porto, Portugal, 30 June – 2 July 2014. – P.1905–1909.
9. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – 4-е изд., перераб. – М. : Издательство СКАД СОФТ, 2011 – 736 с.
10. Gaile, L. Analysis of Dynamic Parameters of Observation Towers in Latvia [Text] / L.Gaile // Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference. Volume 11 – P. 57-62
11. Volkova, V. E. Experimental qualitative identification of damping and stiffness characteristics of lattice towers [Electronic source] / V.E. Volkova, L. Gaile, L. Pakrastins // 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 251 012108 DOI: 10.1088/1757-899X/251/1/012108 EID: 2-s2.0-85034448884/

Волкова Вікторія Євгенівна, д-р техн. наук., професор кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». Тел.: (050)561-5562. E-mail:drvev09@gmail.com.

Волкова Виктория Евгеньевна, д-р техн. наук, профессор кафедры строительства, геотехники и геомеханики Национального технического университета «Днепроvская политехника». Тел.: (050)561-5562. E-mail:drvev09@gmail.com.

Volkova Viktorija Eugene, D. Sc. (Tech.), professor, Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, National Technical University “Dnipro Polytechnic”. Tel: (050)561-5562. E-mail:drvev09@gmail.com.

Статтю прийнято 27.11.2018 р.