

ЛИ ЦИ

С. Н. САВИН, *д-р техн. наук, профессор*

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. Методы обнаружения повреждений конструкций, основанные на динамических характеристиках, получили стремительное развитие в последние десятилетия. Основная идея данной технологии заключается в том, что вибрационные характеристики конструкций являются функциями их физических параметров (массы, демпфирования и жесткости). Повреждение конструкции вызывает изменение ее физических параметров, что неизбежно приводит к трансформации вибрационных характеристик.

Представлены сущность, текущее состояние применения и методы классификации мониторинга состояния конструкций (SHM) и методов динамического обнаружения повреждений. Особое внимание уделено методам обнаружения повреждений и алгоритмам идентификации на основе динамических характеристик, проанализированы достоинства и недостатки различных подходов. В заключении намечены направления для дальнейших исследований и тенденции развития методов обнаружения повреждений строительных конструкций.

Ключевые слова: мониторинг состояния; обнаружение повреждений; динамические характеристики; строительные конструкции.

Состояние ответственных объектов гражданского строительства, таких как мосты больших пролетов, плотины, сверхвысотные здания и морские платформы, напрямую связано с безопасностью жизни и имущества людей. В процессе длительной эксплуатации совместное воздействие таких неблагоприятных факторов, как агрессивная окружающая среда, старение материалов и эксплуатационные нагрузки, неизбежно приводит к накоплению повреждений и снижению несущей способности конструкций. Если накопление повреждений в критических элементах конструкции достигает определенного уровня и не обнаруживается своевременно, разрушение может распространяться лавинообразно, приводя к катастрофическим авариям (например, обрушение Серебряного моста в Западной Вирджинии [1] или моста Сонсу в Сеуле).

Своевременный мониторинг состояния конструкций и проведение ремонтных работ на ранних стадиях позволяют гарантировать эксплуатационные свойства сооружений, продлить срок их службы и кардинально снизить затраты на последующее содержание. В последние годы развитие компьютерных технологий, средств связи и различных типов датчиков

позволило перейти от визуального осмотра к комплексному использованию современных научно-технических достижений, что сделало возможным всесторонний автоматизированный мониторинг и компьютерную оценку безопасности сооружений. В данном контексте особую актуальность приобретает интеграция сейсмоакустических методов и анализа свободных колебаний (включая исследование частот, декрементов и эпюр собственных колебаний), которые позволяют эффективно верифицировать расчетные модели и оценивать общую сейсмостойкость эксплуатируемых объектов [2, 3].

Housner и др. определили систему мониторинга состояния конструкций (Structural Health Monitoring, SHM) как эффективный метод, использующий натурные измерения для получения внутренней информации из эксплуатируемой конструкции и обработки данных с целью выявления и оценки изменений ключевых эксплуатационных показателей [4]. Современную систему мониторинга состояния конструкций можно разделить на пять основных взаимосвязанных компонентов: онлайн-тестирование, анализ в реальном времени, диагностика повреждений, оценка состояния и принятие решений по техническому обслуживанию.

За последние 20 лет, благодаря совершенствованию сенсорных технологий, беспроводной связи и методов сбора и обработки сигналов, технология динамического обнаружения структурных повреждений получила стремительное развитие. Использование собранной вибрационной информации для идентификации, локализации и количественной оценки повреждений превратилось в комплексную междисциплинарную науку, адаптированную к практическим инженерным нуждам гражданского строительства.

В зависимости от характера воздействия повреждения на конструкцию, его можно разделить на линейное (когда конструкция сохраняет линейно-упругие свойства) и нелинейное (например, появление усталостной трещины, которая открывается и закрывается под воздействием вибраций). Идентификация повреждений традиционно делится на четыре последовательных уровня согласно классификации Риттера [5]: определение наличия повреждения (Уровень I), локализация дефекта (Уровень II), количественная оценка степени тяжести (Уровень III) и прогнозирование остаточного срока службы (Уровень IV).

Существующие линейные методы дефектоскопии по наличию или отсутствию математической модели объекта подразделяются на два основных класса, представленных в Таблице 1.

При возникновении повреждения жесткость конструкции снижается, что влечет за собой падение собственных частот. Данный индикатор отличается высокой точностью и простотой измерения [6]. Однако частота является глобальным параметром и обладает слабой чувствительностью к локальным микротрещинам на ранних стадиях, а симметрия конструкций может приводить к идентичным изменениям частот при повреждениях в симметричных точках.

Табл. 1. Классификация методов идентификации линейных повреждений конструкций

Категория	Основные подходы и алгоритмы
Методы на основе моделей (Model-based)	Метод сопоставления модальных шаблонов (Pattern Matching) Метод модальных индикаторов повреждений (Damage Index Method) Метод корректировки и инверсии конечно-элементных моделей (Model Updating)
Методы без моделей (Non-model based)	Временная область: Модели ARMA, расширенный фильтр Калмана (EKF) Частотная область: Спектральный анализ Фурье, вейвлет-анализ сигналов Временно-частотный анализ: Вейвлет-преобразование (Wavelet), преобразование Гильберта-Хуанга (ННТ)

Модальные векторы форм колебаний несут в себе пространственную информацию и более чувствительны к локальным дефектам. Для оценки изменений широко применяются критерий модальной уверенности МАС (Modal Assurance Criterion) [7] и его координатный аналог СОМАС. МАС эффективен для фиксации самого факта возникновения повреждения, а критерий СОМАС позволяет приблизительно локализовать дефекты в зонах пучностей колебаний. Развитие данного направления показывает, что анализ экспериментальных эпюр собственных колебаний эксплуатируемых объектов является надежным базисом для интегральной оценки их пространственной жесткости и сейсмостойкости, что подтверждается многолетней практикой обследования уникальных сооружений и памятников архитектуры [2, 3]. Для балочных и плитных строительных элементов, работающих на изгиб, изменение кривизны форм колебаний является прямым индикатором дефекта, так как кривизна математически связана с локальной изгибной жесткостью сечения (EI) [8]. Точка, где разность кривизны до и после повреждения достигает максимума, четко указывает на положение дефекта.

Метод основывается на уравнении динамического равновесия. Ненулевые элементы вектора остаточных динамических сил, получаемые при подстановке параметров поврежденного состояния в исходную матрицу жесткости, позволяют локализовать дефектные узлы расчетной схемы без точного знания измененной матрицы жесткости всего сооружения [9]. Изменение глобальной матрицы податливости служит надежным базисом для дефектоскопии [10]. Поскольку элементы матрицы податливости обратно пропорциональны квадратам частот (ω_i^2), низшие измеряемые формы колебаний вносят в нее определяющий вклад, сглаживая погрешности неотслеживаемых и зашумленных высоких частот. На основе допущения Стаббса о постоянстве отношения локальной энергии деформации элемента к полной энергии системы

выводится индекс повреждения, позволяющий проводить локализацию без точных исходных базовых модальных параметров [11]. Модификации метода, оценивающие скорость изменения модальной энергии деформации, доказали свою эффективность для ферменных и рамных несущих систем высотных зданий [12].

Для распознавания образов дефектов применяются сети обратного распространения (BP) и радиально-базисные сети (RBF), эффективно аппроксимирующие сложные многомерные отображения между сдвигами модальных параметров и деградацией жесткости [13].

Основанные на принципах естественного отбора ГА представляют собой мощный инструмент глобальной стохастической оптимизации [14]. Они незаменимы при поиске минимума сложных многоэкстремальных целевых функций идентификации повреждений в условиях зашумленности экспериментальных данных. Данная группа алгоритмов решает обратные математические задачи механики. Введение жестких физико-механических и регуляризирующих ограничений позволяет гарантировать единственность получаемого решения и его соответствие реальному состоянию объекта [15].

Использование серого реляционного анализа статических перемещений, деформаций или их кривизны позволяет с высокой точностью локализовать поврежденные зоны реальных конструкций по степени падения корреляции параметров соседних точек в условиях частично известной информации [16, 17].

Несмотря на значительный прогресс, сложность реальных строительных объектов и зашумленность среды сдерживают широкое промышленное внедрение динамического контроля. Для развития данной отрасли критически важно сосредоточить усилия на следующих направлениях.

Исследование микрповреждений: Разработка высокочувствительных локальных диагностических факторов для фиксации скрытых дефектов на этапе их зарождения.

Нелинейная идентификация: Переход к нелинейным моделям, учитывающим динамическое раскрытие и закрытие трещин при эксплуатационных вибрациях.

Междисциплинарный синтез: Объединение строительной механики, нейросетевых технологий, искусственного интеллекта и современных методов цифровой обработки сигналов.

Оптимизация сенсорных сетей: Математическое обоснование пространственного размещения ограниченного числа датчиков для извлечения максимума информации.

Системы непрерывного онлайн-мониторинга: Создание интеллектуальных систем экспресс-контроля состояния сооружений в режиме реального времени.

Список литературы

1. Lichtenstein, A. G. Silver bridge collapse recounted / A. G. Lichtenstein // Journal of

Performance of Constructed Facilities. — 1993. — Vol. 7, No. 4. — P. 249–261.

2. Савин, С. Н. Использование изгибных волн и свободных колебаний для формирования исходных данных при разработке расчетных моделей эксплуатируемых конструкций зданий и сооружений / С. Н. Савин // XV Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию, 9–13 октября 2023, Сочи. — Сочи, 2023. — С. 135–138.

3. Сейсмоакустические методы интегральной оценки физико-механических характеристик строительных конструкций зданий и сооружений / С. Н. Савин, В. М. Попов, Ю. В. Пухаренко [и др.] // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15, № 6.

4. Structural control: past, present, and future / G. W. Housner, L. A. Bergman, T. K. Caughey [et al.] // Journal of Engineering Mechanics. — 1997. — Vol. 123, No. 2. — P. 897–971.

5. Rytter, A. Vibration based inspection of civil engineering structures : dissertation / A. Rytter. — Denmark : Aalborg University, 1993.

6. Salawu, O. S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review / O. S. Salawu // Engineering Structures. — 1997. — Vol. 19, No. 9. — P. 718–723.

7. Allemang, R. J. A correlation coefficient for modal vector analysis / R. J. Allemang, D. L. Brown // Proceedings of the First International Modal Analysis Conference. — 1982. — P. 110–116.

8. Pandey, A. K. Damage detection from changes in curvature mode shapes / A. K. Pandey, M. Biswas, M. M. Samman // Journal of Sound and Vibration. — 1991. — Vol. 145, No. 2. — P. 321–332.

9. Zimmerman, D. C. Structural damage detection using a minimum rank update theory / D. C. Zimmerman, M. Kaouk // Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of ASME. — 1994. — Vol. 116, No. 2. — P. 222–231.

10. Pandey, A. K. Damage detection in structures using changes in flexibility / A. K. Pandey, M. Biswas // Journal of Sound and Vibration. — 1994. — Vol. 169, No. 1. — P. 3–17.

11. Stubbs, N. Damage localization in structures without baseline modal parameters / N. Stubbs, J. T. Kim // AIAA Journal. — 1993. — Vol. 34, No. 8. — P. 1644–1649.

12. Shi, Z. Y. Structural damage localization from modal strain energy change / Z. Y. Shi, S. S. Law, L. M. Zhang // Journal of Sound and Vibration. — 1998. — Vol. 218, No. 5. — P. 825–844.

13. Funahashi, K. On the approximate realization of continuous mappings by neural networks / K. Funahashi // Neural Networks. — 1989. — Vol. 2. — P. 183–192.

14. Holland, J. H. Outline for a logical theory of adaptive systems / J. H. Holland // Journal of the Association for Computing Machinery. — 1962. — Vol. 9, No. 3. — P. 297–314.

15. Dong Cong. Theory and method for structural intelligent health diagnosis / Dong Cong, Fan Lichu, Chen Zhaoyuan // China Railway Science. — 2002. — Vol. 23, No. 1. — P. 11–24. — (In Chinese).

16. Deng Julong. Control problems of grey systems / Deng Julong // Systems and Control Letters. — 1982. — Vol. 5, No. 1. — P. 288–294.

17. Chen Xiaozhen. The application of grey correlation analysis for the structural static damage detection / Chen Xiaozhen, Zhu Hongping, Chen Chuanyao // Mechanics and Engineering. — 2005. — Vol. 27, No. 3. — P. 60–64. — (In Chinese).

Контакты:

richey1997@qq.com (Ли Ци).

savinsn@gmail.com (Савин Сергей Николаевич).