

Л и т е р а т у р а

1. **Ростовцев А. М.** Экстремальность при выборе и оптимизации средств измерений // Метрология. 2010. № 8. С. 8—16; **Rostovtsev A. M.** Extremality in the selection and optimization of measurement devices // Measurement Techniques. 2010. V. 53. N 9. P. 870—875.

2. **Ростовцев А. М., Хасанов Б. И.** Оптимизация точности двухкомпонентной измерительной системы на основе алгоритмического языка DELPHI // Состояние и перспективы измерений: Сборник материалов XII Всерос. науч.-техн. конф. МГТУ им. Н. Э. Баумана 4—6 февраля 2013. С. 94—97.

Дата принятия 20.05.2013 г.

539.3:624.04

Достоверность результатов динамических обследований зданий и сооружений

В. В. ПОДУВАЛЬЦЕВ*, М. С. ХЛЫСТУНОВ, Ж. Г. МОГИЛЮК****

* Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия, e-mail: vvpoduval@mail.ru

** Московский государственный строительный университет, Москва, Россия e-mail: mcxmgusu@mail.ru

Проанализированы метрологическая и математическая корректность контроля динамической устойчивости и идентификации форм колебаний строительных конструкций. Рассмотрены нормативные документы, регламентирующие динамические обследования, и результаты их практического применения; дан анализ, подтверждающий низкую достоверность данных о формах колебаний зданий и сооружений.

Ключевые слова: динамические обследования, достоверность, строительные конструкции, устойчивость.

The analysis of the metrological and mathematical correctness of the control of dynamic stability and the building structures oscillations forms identification are presented. The normative documents regulating the dynamic surveys and the results of their practical application are considered. The analysis confirming the low reliability of data on buildings and structures oscillations forms is presented.

Key words: dynamic examinations, building structures, reliability, stability.

Проблема динамического обследования и мониторинга технического состояния зданий и сооружений в современной научно-методической трактовке была сформулирована в проектах программ научно-технического сотрудничества некоторых ведомств [1, 2], а также в ряде научно-исследовательских работ, выполненных в МГСУ за 2005—2008 гг. в соответствии с решениями Московского конгресса по безопасности мегаполисов [3—5]. Важность аттестации и мониторинга динамических характеристик строительных объектов [6] нашла отражение и развитие в [7—9].

В соответствии с [7, п. 3.19] к динамическим параметрам зданий и сооружений следует относить периоды и декременты затухания собственных колебаний основного тона и обертонов, передаточные функции объектов, их частей и элементов и др. Согласно обязательным приложениям В, Д, М, Н, П в [7] в число динамических параметров объекта, подлежащих паспортизации при динамическом обследовании, входят периоды (резонансные частоты) и логарифмические декременты затухания основных тонов собственных колебаний вдоль продольной, поперечной, большой, малой и вертикальной осей. При этом в соответствии с общепринятой терминологией под периодами основного тона и обертонов следует понимать периоды основных резонансов и их гар-

моник относительно не очень строго определенных главных осей строительной конструкции, а под передаточными функциями — амплитудные (АЧХ) и фазовые (ФЧХ) частотные характеристики.

В [7] декларируется необходимость паспортизации, например, основного тона собственных колебаний вдоль вертикальной оси здания и сооружения. Однако вдоль этой оси могут быть возбуждены поплавокковые, баллистические, две продольные и две поперечные моды упругих колебаний (геодинамические и конструкционные) [10]. Не ясно, какая из них регламентируется в [7]? Аналогичные замечания можно сделать в отношении основных форм колебаний вдоль продольной и поперечной, большой и малой осей здания или сооружения.

Рассмотрим важный вопрос по практическому применению [7]. Для передаточной функции пространственной конструкции должны быть строго сформулированы требования к расположению источника динамического возбуждения и точки регистрации результирующих колебаний конструкции, так как таких пар точек может быть выбрано достаточно много. В отличие от АЧХ, которая является фурье-образом динамического портрета здания и может быть построена прямым способом, т. е. по наблюдению реакции объекта на

установившиеся гармонические нагрузки, передаточная функция является лапласовским отображением динамического портрета здания, базисным элементом которого является затухающая гармоника. Аналогичные неточности и некорректности по паспортизации динамических характеристик не устранены и в рекомендациях [8].

Руководство [9] свободно от большинства перечисленных неточностей и некорректностей, допущенных в [7, 8]. В основном, это было достигнуто благодаря достаточно общему изложению требований к перечню контролируемых динамических характеристик. Согласно требованиям [9 п. 3.3] контролируются такие динамические характеристики строительных конструкций, как формы собственных колебаний, собственные частоты и параметры затухания, определяемые по спектрам или АЧХ и путем фазового анализа записей колебаний.

Однако достаточно общий характер [9] не позволил избежать метрологических и методологических некорректностей. Так, сравнительный анализ АЧХ и ФЧХ реальных записей колебаний не позволит решить задачу идентификации форм собственных колебаний строительных конструкций без аттестации запаздываний, зависящих от частоты, и искажений (по фазе и амплитуде) в процессе измерений, оцифровки и вычисления указанных характеристик.

Наряду с этим анализ доступных отчетных материалов рабочих групп МАГАТЭ на зарубежных атомных электростанциях (АЭС) и технических отчетов по динамическим обследованиям отечественных АЭС подтвердил метрологическую некорректность при идентификации собственных форм колебаний строительных конструкций. Сложность и нерешенность метрологических проблем динамического обследования объектов атомной энергетики подтверждается отсутствием их постановки в докладах 5-й Отраслевой конференции «Метрологическое обеспечение измерений в Госкорпорации «Росатом», проведенной 1—5 октября 2012 г. в Сочи.

Изложенное выше позволяет утверждать, что известные современные методы, зарубежная и отечественная аппаратура контроля колебаний строительных конструкций не позволяют с помощью прямого фазового анализа корректно решить задачу векторного анализа колебаний с целью идентификации их форм.

Отчетные материалы составляются по результатам динамических обследований, которые проводятся при помощи трехкомпонентных датчиков продольных вибраций. Если предположить, что метод измерения не вносит амплитудных и фазовых искажений в процесс регистрации колебаний, то тогда информационно-измерительный процесс можно представить в виде системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} k_{11}x_1 + k_{12}x_2 + k_{13}x_3 + k_{14}x_4 + k_{15}x_5 + k_{16}x_6 &= n_1; \\ k_{21}x_1 + k_{22}x_2 + k_{23}x_3 + k_{24}x_4 + k_{25}x_5 + k_{26}x_6 &= n_2; \\ k_{31}x_1 + k_{32}x_2 + k_{33}x_3 + k_{34}x_4 + k_{35}x_5 + k_{36}x_6 &= n_3, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где k_{jj} , x_j , n_i — соответственно коэффициенты преобразования i -го датчика по продольной составляющей j -й составляющей колебаний, истинное значение j -й составляющей колебаний, показания (выходной сигнал) i -го датчика.

Из (1) следует, что чувствительность к продольным центробежным ускорениям крутильных мод колебаний вдоль

осей, перпендикулярных к направлению чувствительности датчика, сохранится, так как центробежная составляющая неотличима от параллельной ей продольной. В связи с этим (1) не имеет решения, так как число неизвестных равно шести, что в два раза превышает число уравнений. Следовательно, трехкомпонентная система не имеет однозначного решения даже при отсутствии амплитудных и фазовых искажений.

В случае реальных шестикомпонентных систем мониторинга уравнения информационно-измерительного процесса существенно меняются, так как коэффициенты преобразования датчиков в широкой полосе частот вносят амплитудные и фазовые искажения в процесс измерений. Эти искажения зависят от частоты и могут меняться в пределах $\pm 100\%$, а в окрестности резонансов и антирезонансов они могут на один — два порядка превышать исходные значения интенсивности измеряемых ускорений.

Поэтому система (1) должна быть заменена более строгими лапласовскими отображениями комплексных амплитуд и передаточных функций:

[illegible]

где $k_{ij}(s)$, $x_j(s)$, $n_j(s)$ — соответственно лапласовские отображения передаточной функции i -го датчика по j -й составляющей колебаний, истинного значения j -й составляющей ускорения в точке наблюдения, показаний датчика j -й составляющей колебаний.

К сожалению, до настоящего времени при динамическом обследовании ответственных строительных объектов продолжается применение трехкомпонентных измерительных систем. Первые шаги в решении этой проблемы были сделаны в 2007—2008 г. Разработаны и прошли опытную эксплуатацию экспериментальные образцы шестикомпонентных вибродозиметрических станций СВД-60В [11, 12]. Специалистами МГСУ был разработан программно-алгоритмический комплекс «Композит-7» [13] для метрологически корректного расчета динамических нагрузок и параметров конструкций при обследовании зданий и сооружений.

Широко распространенные в настоящее время конечно-элементные программные комплексы не обладают метрологически корректными возможностями виртуального моделирования динамических процессов и нагрузок в пространственной строительной конструкции.

Особое внимание необходимо уделить инструментальной верификации параметров геодинамической безопасности АЭС и других экологически опасных объектов в реальных условиях эксплуатации [14—16]. Игнорирование данных проблем [6, 10, 11—17] может обернуться в любой момент большой бедой не только для конкретного предприятия или государства, но и катастрофой для многих регионов планеты.

Л и т е р а т у р а

1. **Хлыстунов М. С.** Теория геодинамической безопасности АС // Научно-инновационное сотрудничество Минатома и Минобраз. России: Труды I науч.-техн. конф. М.: МИФИ, 2002. С. 17—19.
2. **Хлыстунов М. С., Могилюк Ж. Г.** Исследования и компьютерное моделирование локальных геотехнических рисков при неравномерном вибросейсмическом возбуждении оснований промзон и районов массовой застройки мегаполисов // Научно-инновационное сотрудничество Минобразования и ФССС РФ: Труды. II науч.-техн. конф. М.: МГСУ, 2003. С. 32—36.
3. **Теличенко В. И., Завалишин С. И., Хлыстунов М. С.** Глобальные риски и новые угрозы безопасности ответственных строительных объектов мегаполиса // Городской строительный комплекс и безопасность жизнеобеспечения граждан: Сб. докл. темат. науч.-практ. конф. М.: МГСУ, 2005. С. 256—260.
4. **Хлыстунов М. С.** Прикладная динамическая теория упругости и математическое моделирование динамических нагрузок в системах типа «объект-основание» // Там же. С. 261—267.
5. **Хлыстунов М. С., Могилюк Ж. Г.** Вибродозиметрический метод проектной оценки динамических и геоэкологических рисков // Там же. С. 268—275.
6. **Король Е. А., Завалишин С. И., Хлыстунов М. С.** Состояние нормативного обеспечения безопасности ответственных строительных объектов в условиях экстремальных динамических нагрузок // Вестник МГСУ. 2009. Спецвып. № 2. С. 23—27.
7. **ГОСТ Р 53778—2010.** Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
8. **РБ—045—08.** Руководство по безопасности объектов атомной энергетики. Динамический мониторинг строительных конструкций объектов использования атомной энергии.
9. **РМ-2957.** Рекомендации по эксплуатации многофункциональных высотных зданий и комплексов.
10. **Завалишин С. И., Хлыстунов М. С.** Грависейсмические резонансы строительных объектов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2000. № 3. С. 19—21.
11. **Теличенко В. И., Хлыстунов М. С.** Теория модального анализа микросейсмических процессов и моделирование геодеформационных процессов в основаниях // Вестник отд. строит. наук РААСН. 2010. Т. 1. С. 178—182.
12. **Хлыстунов М. С., Могилюк Ж. Г.** Вибродозиметрический метод мониторинга и прогноза эволюции остаточного ресурса на базе вибродозиметрической станции СВД-60У // Труды межд. конф. «ПАЗИС». М.: WELD, 2009. С. 29—35.
13. **Хлыстунов М. С., Могилюк Ж. Г.** Проектная оценка, мониторинг и прогноз эволюции геодеформационных рисков с использованием программно-алгоритмического комплекса «Композит-7» // Там же. С. 36—40.
14. **Подувальцев В. В.** Об экономике и менеджменте качества, сертификации, стандартизации и метрологического обеспечения // Состояние и проблемы измерений: Сб. матер. XI Всерос. науч.-техн. конф. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2011. С. 125—129.
15. **Подувальцев В. В., Хлыстунов М. С., Могилюк Ж. Г.** Анализ геодеформационных проявлений вибросейсмических процессов объектов техносферы // Наука и образование. 2011. Вып. 11 [Электрон. ресурс]. <http://technomag.edu.ru/doc/251611.html> (дата обращения 13.03.2013 г.)
16. **Киселёв М. И., Подувальцев В. В., Хлыстунов М. С.** Проблемы метрологического обеспечения объектов техносферы, строительной науки и практики // Наука и образование. 2011. Вып. 11 [Электрон. ресурс]. <http://technomag.edu.ru/doc/252086.html> (дата обращения 13.03.2013 г.)
17. **Подувальцев В. В.** О метрологической экспертизе и наиболее насущных проблемах метрологического обеспечения // Наука и образование. 2012. Вып. 2 [Электрон. ресурс]. <http://technomag.edu.ru/doc/327076.html> (дата обращения 13.03.2013 г.)

Дата принятия: 29.05.2013 г.