

# Проблемы безопасности и нормативное обеспечение контроля векторных динамических параметров объектов техносферы

**В.В. Подувальцев**, доцент, канд. тех. наук<sup>1</sup>

**М.С. Хлыстунов**, зав. отраслевой научно-исследовательской лабораторией крупногабаритных конструкций, профессор, канд. тех. наук<sup>2</sup>

**Ж.Г. Мозилюк**, доцент, канд. тех. наук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

<sup>2</sup>Московский государственный строительный университет

e-mail: vvpoduval@mail.ru, mcxmgusu@mail.ru, intdginni@mail.ru

## Ключевые слова:

объекты техносферы, безопасность, нормативные документы, формальное применение, динамическое обследование, достоверность обследований, динамическая устойчивость, формы колебаний, идентификация, критерий необходимости, критерий достаточности.

*В статье рассматриваются метрологические проблемы нормативного и математического обеспечения пространственного контроля векторных динамических параметров безопасности объектов техносферы. На примере анализа ряда нормативных документов, регламентирующих динамические обследования, представлены доказательства отсутствия в этих документах необходимых и достаточных критериев для практической реализации задач безопасности. На основании результатов динамических обследований реальных объектов техносферы показано, что существующий нормативный подход не позволяет идентифицировать контролируемые формы колебания зданий и сооружений.*

## 1. Введение в проблему

Проблема динамического обследования и мониторинга вариаций векторных полей параметров технического состояния опасных объектов техносферы в современной научно-методической трактовке была сформулирована в проектах программ научно-технического сотрудничества Минобрнауки России и Минатома, а также в ряде научно-исследовательских работ, выполненных в 2005–2008 гг. в соответствии с решениями Московского конгресса по безопасности мегаполисов в рамках научно-практической конференции «Безопасность строительного комплекса и жизнеобеспечение граждан» [1–8]. Практическая важность аттестации и мониторинга динамических характеристик строительных объектов нашли отражение и развитие в ряде документов, включая РБ-045-08 «Динамический мониторинг строительных конструкций объектов использования атомной энергии», ГОСТ Р 53778-2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния», РМ-2957 «Рекомендации по эксплуатации многофункциональных высотных зданий и комплексов».

Однако, как часто происходит с развитием наукоемких технологий, их формальное внедрение в нормативную практику сопровождается нарушением условий и критериев технической эффективности способов решения практических задач в части метрологического обеспечения достоверности. К сожалению, эта «недосказанность» присуща и перечисленным выше документам.

## 2. Метрологический анализ нормативного обеспечения

Рассмотрим с этой точки зрения ГОСТ Р 53778-2010. К числу несомненных достоинств этого ГОСТа следует, в первую очередь, отнести достаточно полный и комплексный характер обязательных параметров обследования, в отличие от СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений». Согласно п. 3.19 ГОСТа к числу динамических параметров зданий и сооружений следует относить параметры зданий и сооружений, характеризующие их динамические свойства, проявляющиеся при динамических нагрузках, и включающие периоды и декременты собствен-

ных колебаний основного тона и обертонов; передаточные функции объектов, их частей и элементов и другие параметры. Если при повторном измерении динамических параметров объекта результаты измерений различаются более чем на 10%, то техническое состояние такого здания или сооружения подлежит обязательному внеплановому обследованию.

Согласно обязательным приложениям В, Д, М, Н и П к указанному ГОСТу, в число динамических параметров объекта, подлежащих паспортизации при динамическом обследовании, входят периоды и логарифмические декременты затухания:

- основного тона собственных колебаний (вдоль продольной и поперечной осей);
- основного тона собственных колебаний вдоль большой оси;
- основного тона собственных колебаний вдоль малой оси;
- основного тона собственных колебаний вдоль вертикальной оси.

Рассматривая требования данного ГОСТа, необходимо внести определенную ясность в используемые в нем термины:

- под периодами основного тона и обертонами, под передаточными функциями объектов, их частей и элементов строительных конструкций ГОСТом, вероятно, подразумеваются периоды основного резонанса и его гармоники, а под передаточными функциями — амплитудно-частотные характеристики;
- под основными тонами собственных колебаний (вдоль продольной и поперечной осей), вдоль большой оси, собственных колебаний вдоль малой оси, вдоль вертикальной оси ГОСТом, вероятно, подразумеваются основные формы или моды колебаний строительной конструкции относительно «не очень» строго определенных главных осей строительной конструкции.

Эти уточнения связаны с недостаточной корректностью составления соответствующих разделов ГОСТа. Во-первых, используемая в нем терминология должна соответствовать общетехническим требованиям корректности, так как основные формы или моды колебаний — давно устоявшийся классический термин динамики конструкций и виброметрии и не имеет существенной отраслевой особенности применения, например, в строительной механике.

Во-вторых, в ГОСТе декларируется необходимость паспортизации, например, основного тона собственных колебаний вдоль вертикальной оси здания и сооружения. Однако вдоль вертикальной оси здания и сооружения может быть возбуждена не одна, а три основные формы колебаний [1-8]. Наряду с этим «вдоль» вертикальной оси могут быть также возбуж-

дены две поперечные моды колебаний: конструкционная и геодинамическая.

Если отойти от некоторой «формальности» терминологических и смысловых неопределенностей, то необходимо рассмотреть более важную проблему практической реализации требований нормативного документа. Для передаточной функции пространственной конструкции должны быть строго сформулированы требования по положению источника динамического возбуждения и точки регистрации результирующих колебаний конструкции. В реальной конструкции таких пар точек может быть выбрано большое количество. Если даже снять такую неопределенность, то остается метрологическая проблема получения вида передаточной функции, которая является лапласовским отображением динамического «портрета» здания. Наряду с этим существует проблема восстановления путем вычислений по данным раздельных натурных измерений компонент истинных направлений и модулей векторов регистрируемых вибраций. Эта проблема обусловлена сложностью восстановления в широкой полосе частот фазовых сдвигов каждой спектральной составляющей, а, следовательно, обеспечения расчетной синфазности измеряемых компонент вектора. Аналогичные неточности и некорректности по паспортизации динамических характеристик не устранены и в документе РМ-2957 «Рекомендации по эксплуатации многофункциональных высотных зданий и комплексов».

В руководстве по безопасности объектов атомной энергетики РБ-045-08 «Динамический мониторинг строительных конструкций объектов использования атомной энергии» отсутствует большинство перечисленных в ГОСТе и рекомендациях неточностей и некорректностей. Однако следует признать, что в основном это достигнуто за счет достаточно общего изложения требований к перечню контролируемых динамических характеристик, а важная и не имеющая сертифицированного практического решения проблема обеспечения синфазности используемых в дальнейших расчетах измеренных компонент векторов динамических нагрузок фактически умалчивается. Предлагаемый в руководстве сравнительный анализа фазовых характеристик реальных записей колебаний не позволит решить задачу идентификации форм собственных колебаний строительных конструкций, так как имеют место зависящие от частоты запаздывания и искажения по фазе и амплитуде не только в пространстве строительной конструкции, но и в цепях канала измерения, передачи, фильтрации, «оцифрования», предварительной обработки и регистрации компонент вектора колебаний.

Актуальность проблемы идентификации собственных форм колебаний строительных кон-

струкций и технологического оборудования также подтверждается анализом доступных отчетных материалов рабочих групп МАГАТЭ по обследованиям зарубежных АЭС. 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 в г. Сочи.

Вышеперечисленные обстоятельства позволяют утверждать, что метрологическое обеспечение достоверной идентификации собственных форм колебаний строительных конструкций не нашло отражения в научно-технической литературе и в действующих нормативных и нормативно-методических документах. Известные современные методы, зарубежная и отечественная аппаратура контроля колебаний строительных конструкций и других объектов техносферы не позволяют с помощью прямого фазового анализа корректно решить задачу векторного анализа колебаний с целью идентификации их форм.

### 3. Теоретическое исследование и математический анализ проблемы

Рассмотрим эту проблему с позиции реальных и сертифицированных информационно-измерительных систем и существующих способов измерения различных мод колебаний строительных конструкций. Согласно ряду доступных отчетных материалов динамические обследования, как правило, реализуются трехкомпонентными датчиками продольных вибраций. Если предположить, что такая система измерения идеальна и не вносит амплитудных и фазовых искажений в процесс регистрации колебаний, то идеальный информационно-измерительный процесс можно представить в виде системы уравнений, например, в матричном виде:

$$K\bar{x} = \bar{n}, \quad (1)$$

где  $K$ ,  $\bar{x}$ ,  $\bar{n}$  — соответственно, матрица коэффициентов преобразования  $i$ -го датчика по продольной составляющей  $j$ -й компоненты колебаний, матрица-столбец значений шести  $j$ -х компонент колебаний, матрица-столбец показаний трех датчиков.

Однако система уравнений (1) не имеет корректного решения, так как число неизвестных (шесть искомых компонент колебаний) в два раза превышает число уравнений системы (три уравнения).

Таким образом, для снятия неопределенности необходимо использовать шестикомпонентный измерительный модуль, имеющий «идеальные» три дат-

чика продольных и три датчика угловых колебаний. Тогда система уравнений (1) будет иметь однозначное решение, т. е. обеспечит однозначное выделение при анализе записи колебаний всех шести компонент вибраций.

В случае реальных систем мониторинга уравнение процесса измерения существенно меняется, так как коэффициенты преобразования «реальных» датчиков в широкой полосе частот вносят амплитудные и фазовые искажения в процесс измерения. Величины этих «искажений» зависят от частоты и в реальной, широкой полосе частот могут колебаться в пределах от  $-100\%$  до  $+100\%$ . В общем виде в амплитудно-частотной области процесс динамических измерений одночастотного гармонического векторного параметра можно записать в виде системы уравнений

$$K(j\omega)\bar{X}(j\omega) = \bar{N}(j\omega), \quad (2)$$

где  $K(j\omega)$ ,  $\bar{X}(j\omega)$ ,  $\bar{N}(j\omega)$  — матрица амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) преобразования  $i$ -го датчика по продольной составляющей  $j$ -й компоненты колебаний, матрица-столбец Фурье-спектров шести  $j$ -ых компонент колебаний, матрица-столбец Фурье-спектров показаний шести датчиков.

Система динамических уравнений (2) в общем (реальном) и линейном случае должна быть заменена более строгими лапласовскими отображениями комплексных амплитуд на базисе комплексных частот  $s = j\omega + c$ , т. е. с использованием амплитудно-фазочастотных характеристик или передаточных функций:

$$K(s)\bar{X}(s) = \bar{N}(s), \quad (3)$$

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

### 4. Заключение

Идентификации форм колебаний строительных конструкций и оборудования объектов техносферы является сложной математической и метрологической задачей контроля их динамической устойчивости. Однако она не может быть корректно решена, пока остается нерешенной проблема отсутствия реальной практической методики и соответствующего программного обеспечения для экспериментальной аттестации не только АЧХ, но и передаточных функций датчиков по всем видам компонент измеряемых широкополосных нагрузок и погрешностей в показаниях датчиков.

К сожалению, в технических паспортах и в соответствующих им методиках метрологической аттестации датчиков отсутствует необходимая информация, позволяющая обеспечить условия для однозначного решения системы уравнений (3). Первые шаги в решении этой проблемы уже были сделаны благодаря проектам, финансируемым правительством Москвы.

В 2007–2008 гг. разработаны и прошли опытную эксплуатацию экспериментальные образцы шестикомпонентных вибродозиметрических станций СВД-60В, которые в натурных условиях обследования подтвердили важность и потенциальную возможность метрологически корректной постановки задачи измерения всех компонент векторных параметров колебаний конструкций [9, 10]. Эти исследования и разработки только заложили теоретические основы следующего, достаточно наукоемкого этапа прикладного развития и внедрения метрологически

обоснованных методов, аппаратуры и нормативных документов в практику динамических обследований зданий и сооружений.

Однако глобальный рост числа стихийных бедствий и природных катастроф выдвигает задачу метрологического обеспечения безопасности опасных объектов техносферы в число наиболее актуальных проблем безопасности жизнедеятельности [2]. Игнорирование данных проблем может обернуться не только большой бедой для конкретного предприятия, но и катастрофой для многих регионов планеты [6], что подтвердили события на АЭС «Фукусима» в Японии. В связи с этим также необходимо разработать порядок организации и проведения метрологической экспертизы договоров, контрактов и различных соглашений [11–14], связанных с разработкой, испытаниями и закупками систем мониторинга динамических нагрузок на объекты техносферы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Завалишин С.И., Хлыстунов М.С. Грависейсмические резонансы строительных объектов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2000. № 3. С. 19–21.
2. Теличенко В.И., Завалишин С.И., Хлыстунов М.С. Глобальные риски и новые угрозы безопасности ответственных строительных объектов мегаполиса // Сборник докладов Тематической научно-практической конференции «Городской строительный комплекс и безопасность жизнеобеспечения граждан». Часть 1. В рамках Научно-технического конгресса по безопасности «Безопасность - основа устойчивого развития регионов и мегаполисов». — М.: МГСУ, 2005. — С. 256–260.
3. Хлыстунов М.С. Прикладная динамическая теория упругости и математическое моделирование динамических нагрузок в системах типа «объект-основание» // Сборник докладов Тематической научно-практической конференции «Городской строительный комплекс и безопасность жизнеобеспечения граждан». Часть 1. В рамках Научно-технического конгресса по безопасности «Безопасность — основа устойчивого развития регионов и мегаполисов». — М.: МГСУ, 2005. — С. 261–267.
4. Подувальцев В.В., Хлыстунов М.С., Могилюк Ж.Г. Достоверность результатов динамических обследований зданий и сооружений // Измерительная техника. 2013. № 8. — С. 9–11.
5. Подувальцев В.В., Хлыстунов М.С. Грависейсмометрический комплекс для мониторинга ответственных строительных конструкций / МГТУ им. Н.Э. Баумана. 9-е Всероссийское совещание-семинар «Инженерно-физические проблемы новой техники». Сборник материалов, 2010. — С. 110–112.
6. Король Е.А., Завалишин С.И., Хлыстунов М.С. Состояние нормативного обеспечения безопасности ответственных строительных объектов в условиях экстремальных динамических нагрузок / АСВ. // Вестник МГСУ. 2009. Спецвыпуск № 2. — С. 23.
7. Теличенко В.И., Хлыстунов М.С. Теория модального анализа микросейсмических процессов и моделирование геодеформационных процессов в основаниях. Москва-Иваново: Вестник отделения строительных наук РААСН. 2010. Т. 1. — С. 178.
8. Подувальцев В.В., Хлыстунов М.С., Могилюк Ж.Г. Метрологические характеристики численного моделирования и расчета резонансных частот методом конечных элементов // Наука и Образование: электронное научно-техническое издание. 2011. Выпуск 11. <http://technomag.edu.ru/doc/252202.html>, 11 ноября 2011.
9. Хлыстунов М.С., Могилюк Ж.Г. Вибродозиметрический метод мониторинга и прогноза эволюции остаточного ресурса циклической усталости материалов строительных конструкций и грунтов оснований на базе вибродозиметрической станции СВД-60У. — М.: Издание WELD // Труды Международной конференции «Повышение безопасности зданий и сооружений в процессе строительства и эксплуатации», 9–10 июня 2009 г.
10. Могилюк Ж.Г., Хлыстунов М.С. Проектная оценка, мониторинг и прогноз эволюции геодеформационных рисков неравномерных осадков зданий и сооружений методами динамической теории упругости с использованием программно-алгоритмического комплекса «Композит-7». — М.: Издание Weld // Труды Международной конференции «Повышение безопасности зданий и сооружений в процессе строительства и эксплуатации», Москва, 9–10 июня 2009 г.
11. Подувальцев В.В. Об экономике и менеджменте качества, сертификации, стандартизации и метрологического обеспечения / МГТУ им. Н.Э. Баумана. XI Всероссийская

- научно-техническая конференция «Состояние и проблемы измерений». Сборник материалов, 2011. — С. 125–129.
12. Киселёв М.И., Подувальцев В.В., Хлыстунов М.С. Проблемы метрологического обеспечения объектов техносферы, строительной науки и практики // Наука и Образование: электронное научно-техническое издание. 2011. Выпуск 11. <http://technomag.edu.ru/doc/252086.html>.
13. Подувальцев В.В. О метрологической экспертизе и наиболее насущных проблемах метрологического обеспечения // Наука и Образование: электронное научно-техническое издание. 2012. Выпуск 2. <http://technomag.edu.ru/doc/327076.html>.
14. Подувальцев В.В. Законодательная метрология: учебное пособие. — М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. — 271 с.

## Problems of safety and standard ensuring control of vector dynamic parameters of objects of a technosphere

V.V. Poduvaltsev, Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University

M.S. Khlystunov, Head of Branch Research Laboratory of Large-Size Constructions, Ph.D. of Engineering, Professor, Moscow State University of Civil Engineering

Zh.G. Mogilyuk, Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Moscow State University of Civil Engineering

*Metrological problems related to normative and mathematical support of technosphere objects' safety vector dynamic parameters spatial control are considered in this paper. On the example of analysis of regulatory documents regulating dynamic surveys, the absence evidence in these documents of necessary and sufficient criteria for practical realization of safety problems have been presented. On the basis of results related to dynamic surveys of technosphere's real objects it has been shown that existing regulatory approach doesn't allow to identify controlled forms of vibrations of buildings and constructions.*

**Keywords:** technosphere objects, security, regulatory documents, formal application, dynamic survey, surveys validity, dynamic stability, vibration forms, identification, necessity criterion, adequacy criterion.

### Уважаемые авторы!

Для публикации статьи в журнале должен быть подписан договор между вами и издателем журнала — Научно-издательским центром «Инфра-М» (необходимость заключения договора обусловлена тем, что статье будет присвоен номер DOI; тип договора — отчуждение, договор безвозмездный).

Для оформления договора нужны ваши персональные данные.

Для предоставления этих данных просим вас зарегистрироваться на портале naukaru.ru (<http://naukaru.ru/>) и заполнить Профиль Личного кабинета. На сайте журнала [www.magbvt.ru](http://www.magbvt.ru) в разделе «Авторам» размещена поэтапная инструкция работы с регистрационной формой.

Дополнительно обращаем внимание на некоторые аспекты регистрации:

- не нужно закрывать окно браузера, пока не внесен код подтверждения регистрации;
- код подтверждения действителен в течение 15 минут;
- дату рождения можно набрать на клавиатуре в формате гггг-мм-дд;
- необходимо указать: фамилию, имя и отчество полностью, дату рождения, паспортные данные, адрес с индексом, СНИЛС (номер страхового свидетельства);
- научные сведения на одноименной закладке Профиля нужно заполнить максимально полно;
- банковские реквизиты предоставлять не нужно.

Договор будет выслан вам на электронную почту. Подписанный договор в двух экземплярах нужно будет выслать в НИЦ «Инфра-М» почтой или передать другим способом.

Почтовый адрес «Инфра-М» (совпадает с фактическим): 127282, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1, НИЦ «Инфра-М», Прудникову В.М.

#### Контакты в «Инфра-М»:

Анастасия Чистякова, руководитель проекта периодических изданий, [501@infra-m.ru](mailto:501@infra-m.ru).

Договоры — Анна Иванова, [382@infra-m.ru](mailto:382@infra-m.ru).

Техническая поддержка по регистрации и работе с Личным кабинетом — Илья Дурдыев, [durdyev\\_ia@infra-m.ru](mailto:durdyev_ia@infra-m.ru).