

Мониторинг уникальных объектов с использованием динамических параметров по ГОСТ Р 53778-2010

Д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник С.Н. Савин;
научный сотрудник С.В. Демишин;
старший научный сотрудник И.В. Ситников,
Филиал ОАО «26 ЦНИИ»*

Ключевые слова: динамические характеристики зданий; жесткость конструкций; мониторинг зданий; диагностика строительных конструкций

25 марта 2010 г. утвержден и введен в действие национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53778-2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния». В новом нормативном документе впервые введены требования о необходимости «...измерения динамических параметров здания и сооружения...» как при мониторинге технического состояния зданий и сооружений, так и для заполнения соответствующих разделов «Паспорта здания». При этом в качестве таких параметров указаны периоды основного тона колебаний «вдоль малой, большой и вертикальной осей», а также соответствующие им значения «логарифмического декремента основного тона собственных колебаний».

Введение новых требований по обязательной оценке динамических характеристик зданий и сооружений для мониторинга их технического состояния, несомненно, является серьезным шагом на пути реализации требований Федерального закона от 30.12.2009 №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

Следует отметить, что ранее такие требования уже вводились для организаций МО РФ и МЧС России [1-3] и широко внедрялись как для мониторинга специальных объектов, так и для зданий и сооружений ведомственной принадлежности. Применялись эти методы и за рубежом [4-5], а в советской классификации используемый метод известен как «метод свободных колебаний». В частности, динамические характеристики использовались для диагностики пролетных конструкций мостов в ЦНИИС в лаборатории Звягинцева А.Н. [6], а применение вибромашин было практически единственным способом динамических испытаний в советский период [7].

В 1990 году в ходе паспортизации зданий и сооружений сотрудниками научно-исследовательского института (НИЦ 26 ЦНИИ) на полуострове Камчатка были обследованы десятки жилых зданий с определением их динамических характеристик для оценки фактической сейсмостойкости [8-9]. В дальнейшем эти работы не прекращались и список обследованных сооружений, для которых определялись динамические характеристики по оригинальным методикам, разработанным в Научно-Исследовательском центре Министерства обороны, был значительно расширен и дополнен как уникальными сооружениями, расположенными в сейсмоопасных районах, так и ведомственными объектами в Санкт-Петербурге и Москве [10-12]. При этом практика динамических испытаний «методом свободных колебаний» выявила как определенные трудности методического характера, так и необходимость использования для этих целей специальной высокочувствительной аппаратуры, средств регистрации и обработки, что нашло свое отражение в ряде публикаций того времени [13-14]. Цель предложенной работы – дать представление как об особенностях проведения мониторинга уникальных зданий и сооружений, так и о неоднозначности интерпретации получаемых параметров.

Рассмотрим на примере Кронштадтского Морского собора эффективность использования динамических характеристик для диагностики его технического состояния.

Определение динамических характеристик здания собора проводилось дважды: в период с 10 марта по 10 апреля 2005 г. и в период 22-26 июня 2009 г. Целью испытаний являлось определение технического состояния здания по результатам сравнительного анализа его пространственной жесткости.

Для оценки динамических характеристик на каждом этапе мониторинга (собственных частот колебания, форм колебания храма) использовались средства и методы, разработанные в организациях Министерства обороны.

Обследуемый объект выполнен по жесткой конструктивной схеме с продольными и поперечными несущими стенами, кирпичными и бетонными колоннами, куполами и перекрытиями. Центральный купол и главные конхи – из армированного бетона.

В результате испытаний, проведенных в 2009 г., получены следующие значения собственных частот колебаний:

- 2.7 Гц – первый тон, поперечное направление;
- 3.0 Гц – первый тон, продольное направление;
- 3.78 Гц – крутильные колебания.

Кроме того, имеют место сложные колебания (осесимметричные) на близкой к основным формам частоте: 4,4 Гц.

Сравнительный анализ собственных частот колебаний здания в марте 2005 г. и в июне 2009 г. показывает, что:

- собственная частота колебаний здания по первому тону в продольном направлении практически не изменилась и составляет 3,0 Гц (значения частоты, полученные при испытаниях в 2005 г., составляли 3,01 Гц);
- собственная частота колебаний здания по первому тону в поперечном направлении **снизилась на 12 %** (была 3,08 Гц, стала 2,7 Гц), что соответствует **снижению жесткости на 17 %**, см. спектры колебаний 2005 и 2009 гг., представленные на рис. 1;
- частота крутильных колебаний снизилась на 7%;
- частоты «осесимметричных» колебаний снизились на 6% в обоих направлениях, что косвенно свидетельствует об отсутствии изменений в степени защемления фундаментов.

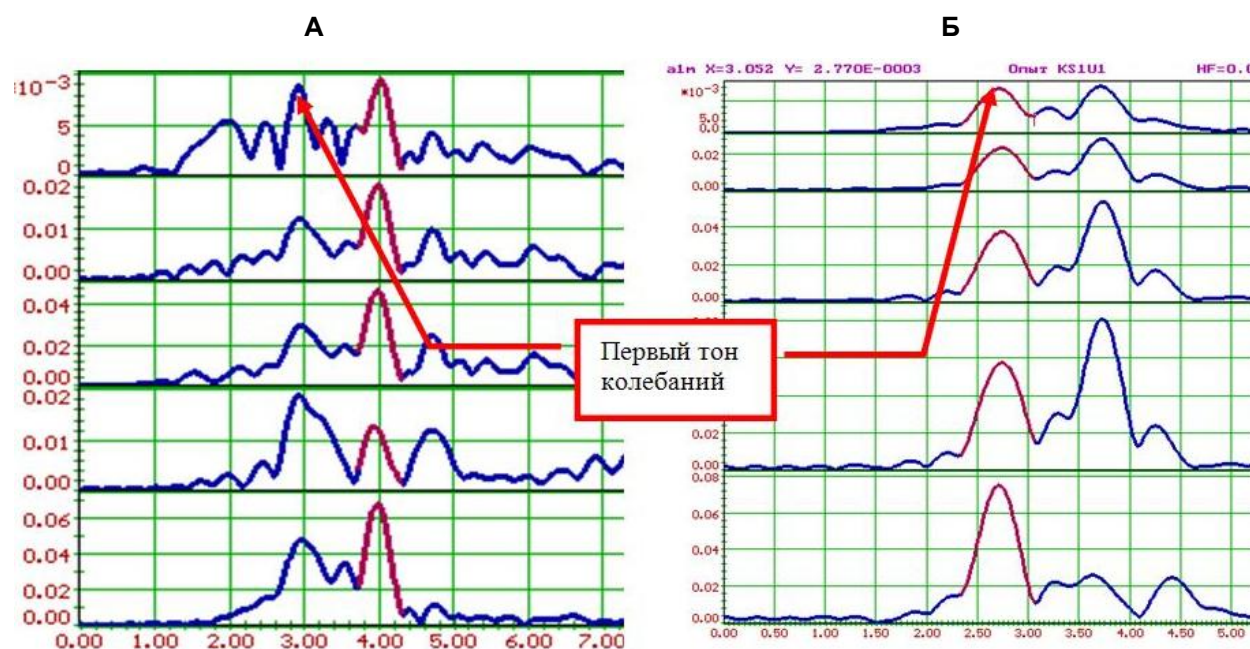


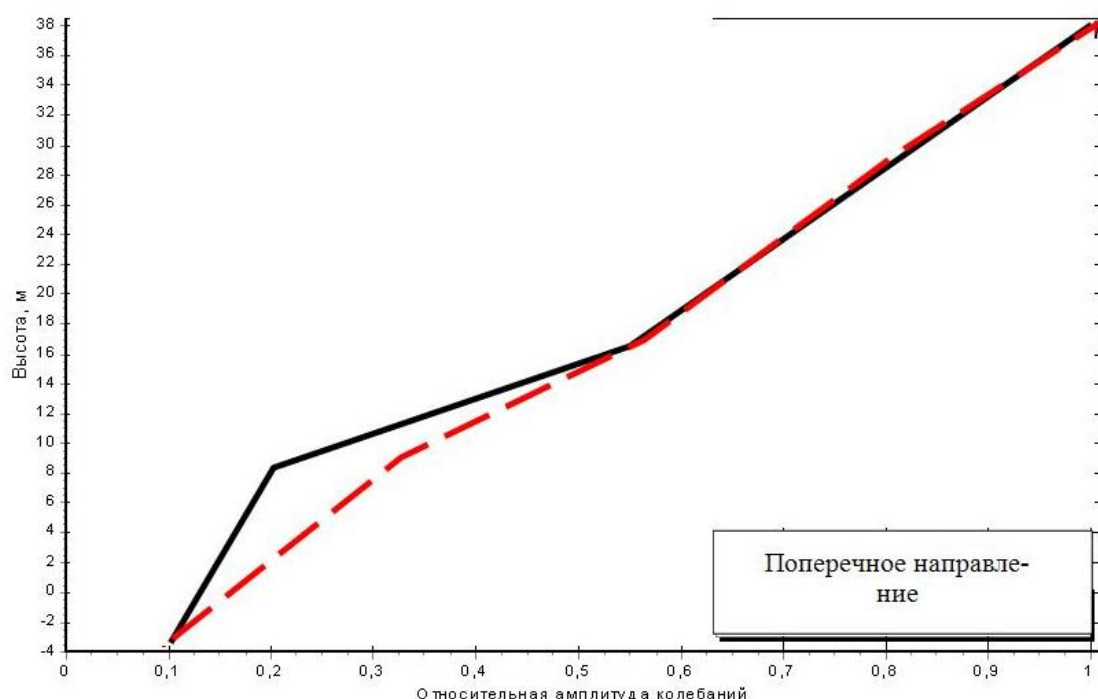
Рисунок 1. Амплитудный спектр. Первый тон. Вертикальный створ, поперечное направление. А) измерения 2005 г.; Б) измерения 2009 г.

Таким образом, можно предполагать, что с 2005 г. произошли определенные изменения в состоянии несущих конструкций, повлекшие снижение пространственной жесткости сооружения.

Если теперь вернуться к требованиям ГОСТ Р, то все, что остается в случае получения такого рода результата, это провести повторное обследование через два года, если здание находится в работоспособном состоянии, или провести обязательное внеплановое обследование, если здание находится в ограниченно работоспособном состоянии. На наш взгляд, этого явно недостаточно, поскольку можно значительно расширить информативность «динамических параметров», проанализировав, например, не только собственные частоты, но и формы колебаний.

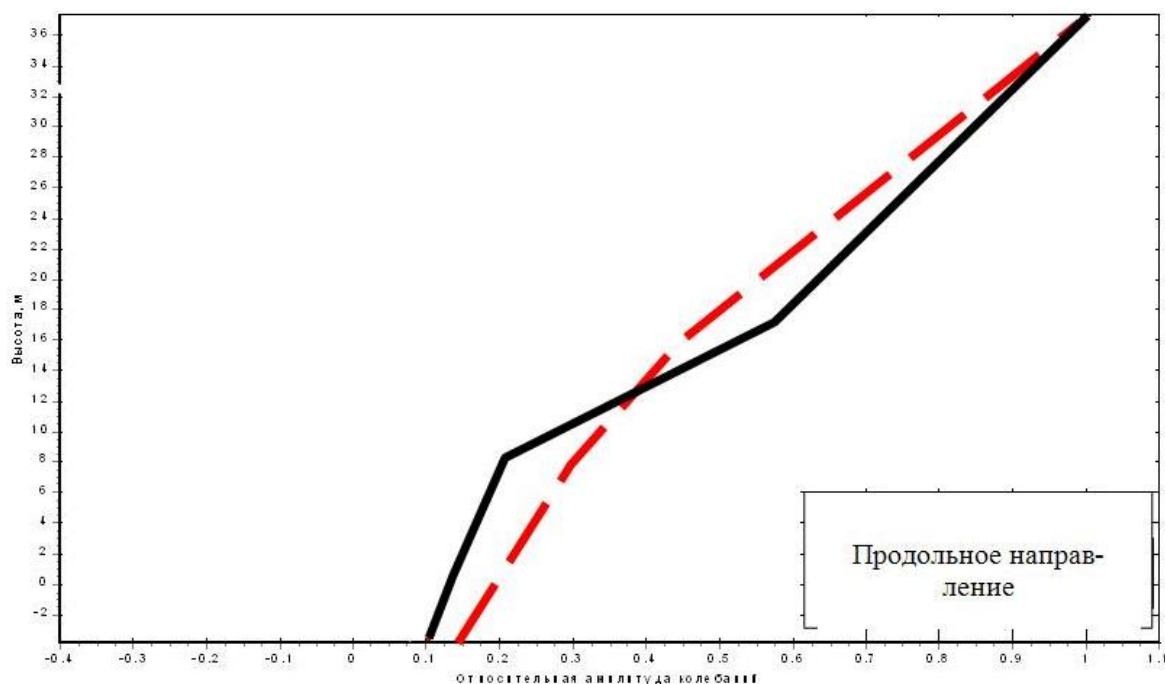
На рис. 2 приведены формы колебаний в поперечном направлении, относящиеся к периодам 2005 г. (прерывистая линия) и 2009 г. (сплошная линия). Анализ эпюр наглядно

показывает, что при одинаковой степени защемления фундаментов отмечается заметное снижение жесткости в уровне 0–16 м.



**Рисунок 2. Эпюры колебаний сооружения по первому тону (поперечное направление).
Прерывистая линия (2,7 Гц) — 2009 г., сплошная — (3,08 Гц) 2005 г.**

Объяснением этого может служить гипотеза о потере связи основного объема сооружения с «контрфорсами», роль которых выполняют лестничные клетки, располагающиеся по обеим сторонам здания до высоты 20 м. По-видимому, имеющиеся вертикальные трещины по линии соединения контрфорсов и основного объема здания освободились ото льда и обеспечили податливость в поперечном направлении (измерения в 2005 г. проводились в марте и, возможно, стены здания и трещины были «заморожены»). Косвенным подтверждением этой гипотезы может служить тот факт, что частота крутильных колебаний снизилась всего на 7%, что вдвое меньше, т.е. доля поперечной податливости присутствует, но она значительно ниже.



**Рисунок 3. Эпюры колебаний сооружения по первому тону (продольное направление).
Прерывистая линия (3,0 Гц) — 2009 г., сплошная — (3,01 Гц) 2005 г.**

Савин С.Н., Демишин С.В., Ситников И.В. Мониторинг уникальных объектов с использованием динамических параметров по ГОСТ Р 53778-2010

Сопоставительный анализ эпюр колебаний в продольном направлении (рис. 3) также не противоречит предложенной гипотезе. Очевидно, что выключение из процесса колебаний «контрфорсов» снизило жесткость здания и в продольном направлении. Об этом свидетельствует изменение наклона эпюры и увеличение относительной податливости фундаментов. Однако при этом снизилась масса сооружения, что компенсировало снижение частоты колебаний, которая осталась неизменной.

Таким образом, можно предполагать, что с 2005 г. по 2009 г. произошли определенные изменения в состоянии несущих конструкций Собора, повлекшие снижение пространственной жесткости всего сооружения. По всей видимости, эти изменения связаны с отделением «контрфорсов», роль которых выполняют лестничные клетки, от основного объема сооружения из-за раскрытия трещин и вытаивания влаги в теплый период.

Другим объектом мониторинга, на котором определялись динамические характеристики, являлись своды-оболочки цеха ЖБИ-2 ДСК-3 в Санкт-Петербурге. Определение динамических характеристик проводилось в 2004 и 2010 гг. в связи с необходимостью объективной оценки технического состояния уникальных конструкций.

Свод-оболочка представляет собой цельную конструкцию, состоящую из пяти однотипных бочарных сводов со стрелой подъема 10 метров, шириной 7,5 м и длиной 100 м.

Каждый свод представляет собой арочную конструкцию, состоящую из сборной железобетонной скорлупы, образующей верхний пояс, и двух предварительно напряженных затяжек. Промежутки между сводами длиной 2,5 м перекрываются сборными железобетонными плитами, опирающимися на консоли бортов скорлупы сводов. Каждый свод состоит из девяти рядовых, двух переходных и двух опорных секций. Внутри свода выполнены диафрагмы поперечной жесткости.

Затяжки размером 850x290x8200 мм выполнены с пазами на боковых поверхностях для размещения пучковой арматуры. Для крепления затяжек применена система подвесок из уголкового стали 75x75 мм с двумя диагональными связями, располагаемыми в третях свода. По оболочке выполнено покрытие из утеплителя и рулонного изолятора. Толщина покрытия 100 мм.

Определение динамических характеристик осуществлялось «методом свободных колебаний». При этом измерения проводились в 2004 и 2010 гг. по одним и тем же измерительным схемам, а состояние конструкции оценивалось путем сравнения жесткостных характеристик оболочки – значений периодов собственных колебаний.

Как показывает опыт обследований, снижение собственной частоты колебаний по первой форме свидетельствует об изменении жесткости в местах опирания конструкции, а по второй и более высоким формам – об изменении прочности материала, из которого выполнена конструкция.

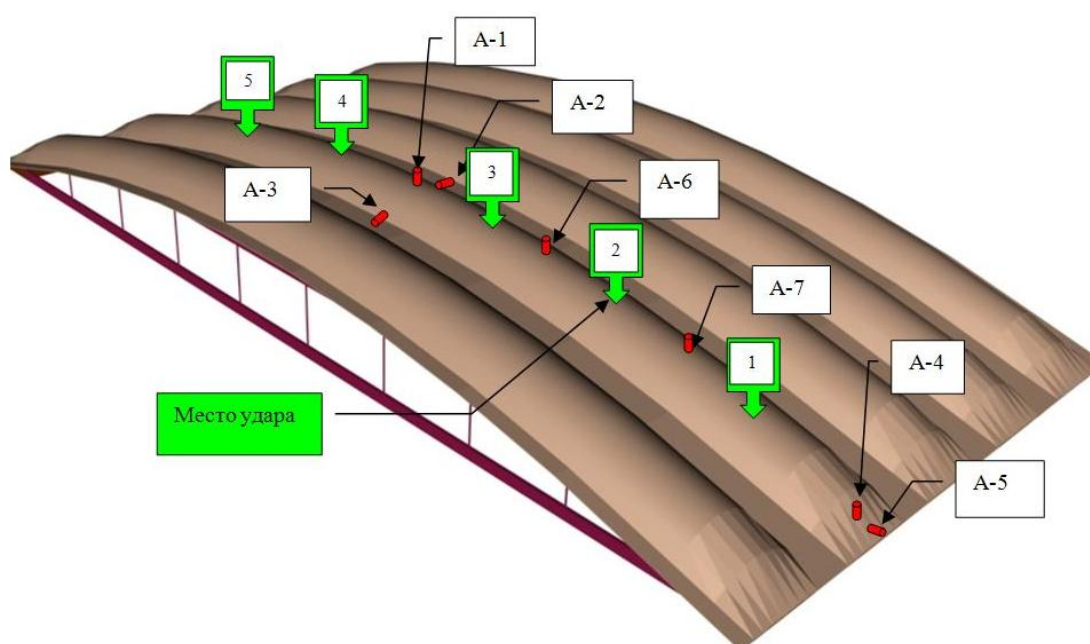


Рисунок 4. Типовая схема проведения испытаний

Савин С.Н., Демишин С.В., Ситников И.В. Мониторинг уникальных объектов с использованием динамических параметров по ГОСТ Р 53778-2010

В соответствии с ранее разработанными методическими рекомендациями микроколебания возбуждались путем создания серии нагрузок в различных точках покрытия при различных схемах расстановки измерительных датчиков. Для выделения каждой формы колебаний создавались комбинации воздействий, имитирующие одновременное приложение нагрузки в заданных точках конструкции и в заданных направлениях. На рис. 4 представлена одна из схем расстановки датчиков, которая использовалась при испытаниях покрытия. Пример результатов измерения колебаний покрытия приведен на рис. 5 и 6 (модули спектров Фурье). Как видно из приведенных записей, выделены частоты свободных колебаний (отмечены красным цветом) составляют 1,68 и 2,0 Гц. Кроме того, выделены следующие частоты колебаний: 2,4 Гц; 2,85 Гц; 3,5 Гц; 4,05 Гц.

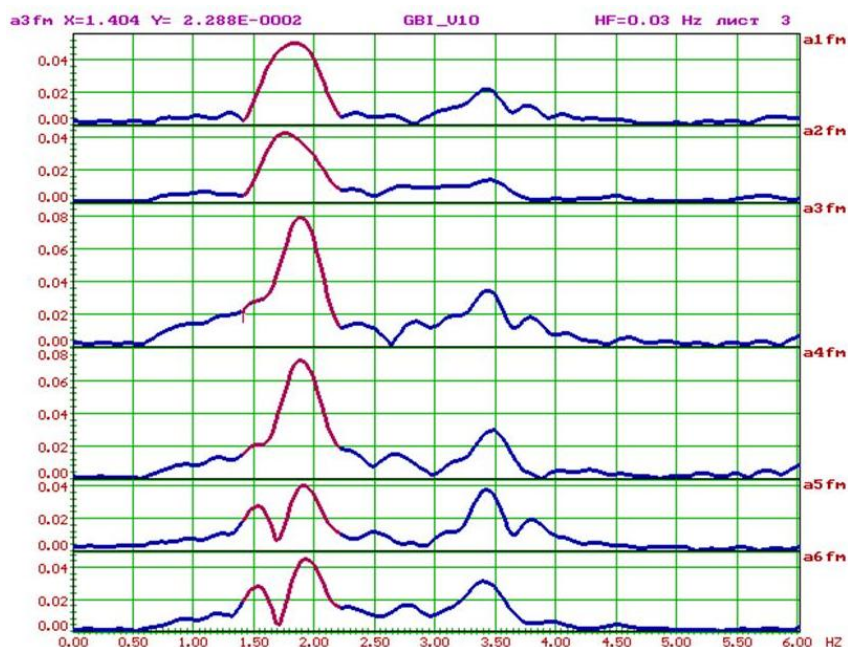


Рисунок 5. Модули спектров Фурье. Выделены колебания на частоте 2,0 Гц

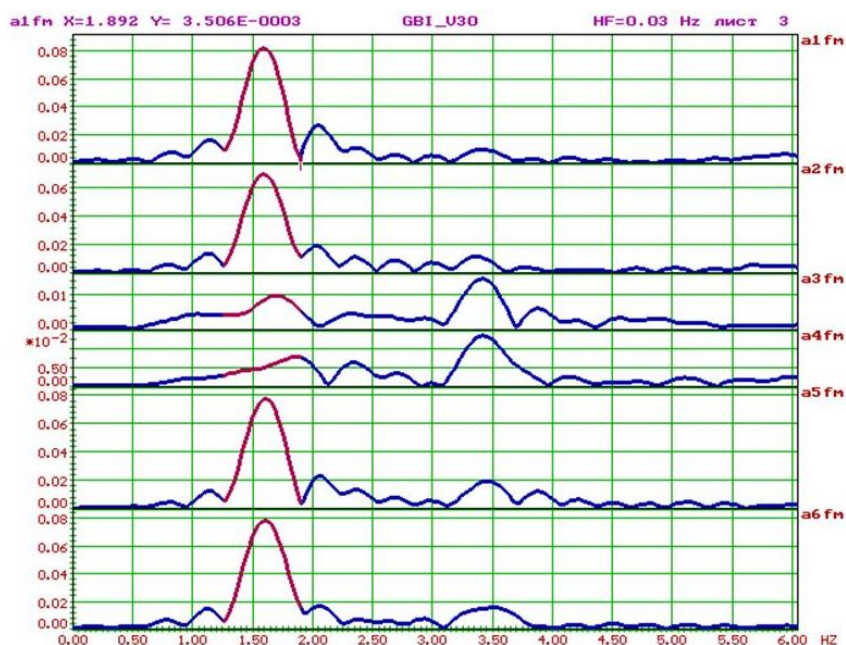


Рисунок 6. Модули спектров Фурье. Выделены колебания на частоте 1,68 Гц

Анализ полученных результатов показывает, что во всех случаях величины собственных частот колебаний оболочки покрытия, полученные при повторном исследовании в 2010 г., имеют значения не ниже данных 2004 г. и различаются в пределах погрешности измерений. На рис. 7 и 8 приведены в качестве сравнения модули спектров Фурье колебаний оболочки покрытия в 2004 г. и современные (2010 г.) измерения.

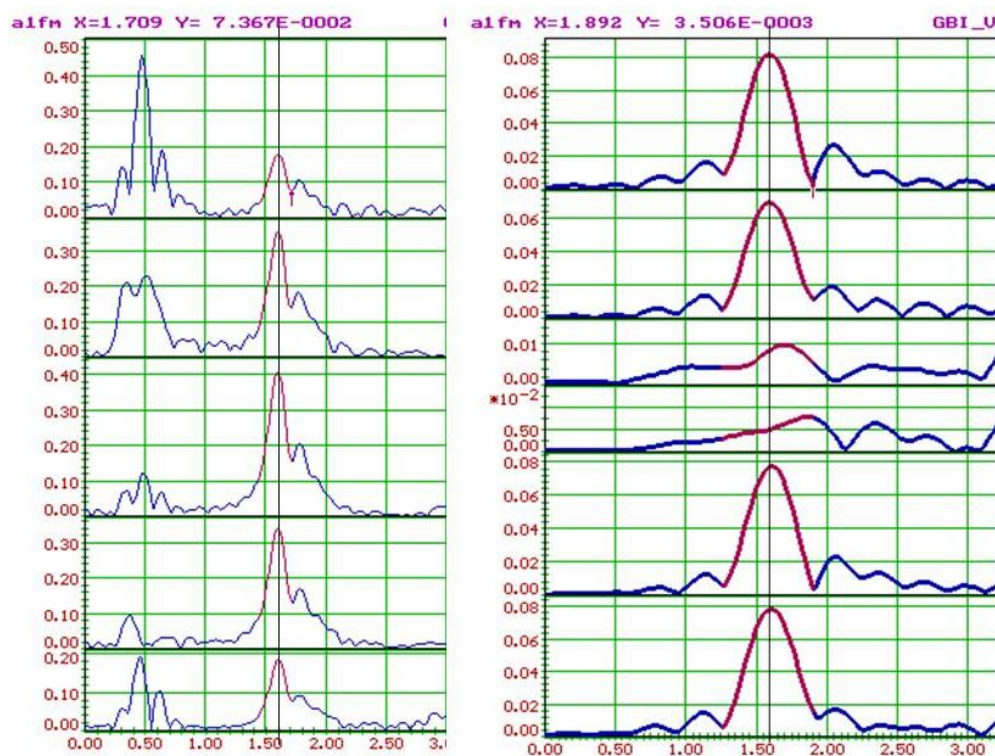


Рисунок 7. Модули спектров колебаний оболочки на частоте 1,59 Гц (2004 г.) и 1,60 Гц (2010 г.)

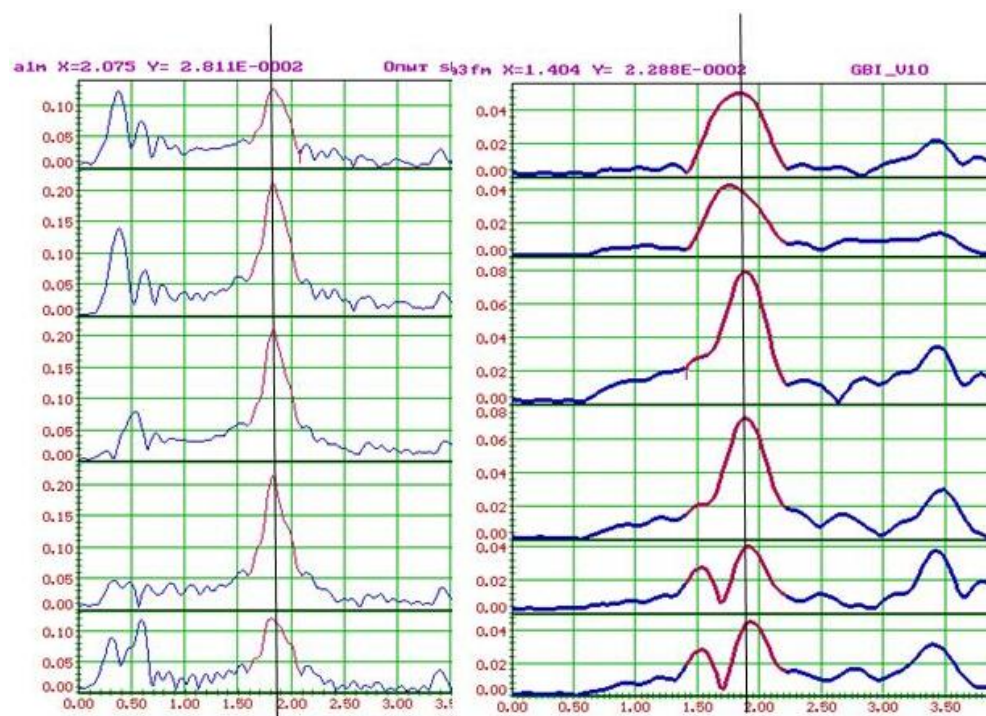


Рисунок 8. Модули спектров колебаний оболочки на частоте 1,85 Гц (2004 г.) и 1,90 Гц (2010 г.)

Приведенные примеры являются наглядным подтверждением как высокой эффективности использования динамических характеристик для мониторинга зданий и сооружений, так и явной недостаточности требований ГОСТ Р по необходимому набору регистрируемых параметров.

В частности, вместо «передаточных функций объектов» следовало бы предложить построение форм (эпюр) колебаний, а число фиксируемых частот колебаний по основным формам не регламентировать жестко указаниями «вдоль длинной, короткой и вертикальной» осей здания. Кроме того, имело бы смысл для наиболее распространенных конструктивных схем указать

Савин С.Н., Демишин С.В., Ситников И.В. Мониторинг уникальных объектов с использованием динамических параметров по ГОСТ Р 53778-2010

ориентировочные значения частоты колебаний, чтобы был возможен предварительный анализ при первых измерениях. А для зданий смешанных конструктивных схем с неравномерно распределенными весовыми или жесткостными характеристиками следовало бы рекомендовать чисто методические приемы, например, по регистрации специфических форм колебаний. В этом случае определяются динамические характеристики для изгибных колебаний относительно горизонтальной оси здания и т.п.

Все это, по нашему мнению, является достаточно веским основанием рекомендовать разработку пособия к ГОСТ Р 53778-2010, которое бы более подробно раскрывало методические и другие аспекты процесса определения динамических характеристик при мониторинге зданий и сооружений, особенно уникальных.

Литература

1. ВСП 22-01-95. Правила паспортизации и оценки фактической сейсмостойкости воинских зданий и сооружений / МО РФ. М., 1996. 44 с.
2. Пособие по расчетно-экспериментальной оценке сейсмостойкости общевоинских зданий и сооружений (к ВСП 22-01-95) / МО РФ. М., 2004. 108 с.
3. Методика оценки и сертификации инженерной безопасности зданий и сооружений / МЧС России. М., 2003. 46 с.
4. Cherry S., Brady A.G. Determination of Structural Dynamic Properties by Statistical Analysis of Random Vibrations // Proceedings of Third World Conference on Earthquake Engineering. New Zealand, 1965. Volume II. Pp. 50-68.
5. Bishop R. E., Gladwell G. M. An investigation into the theory of resonance testing // Philosophical Transactions. 1963. Series A, Volume 225, A-1055. Pp. 241-280.
6. Динамические испытания строительных материалов, конструкций и сооружений. Труды ЦНИИС. М., 2000. Выпуск № 202. 155 с.
7. Вибрационные испытания зданий / Под ред. Г. А. Шапиро. М. : Стройиздат, 1972. 159 с.
8. Мохов Б. А., Савин С. Н., Кабанцев О. В. К контролю состояния зданий в сейсмоопасных районах // Научно-технический сборник Минобороны. 1992. № 82. С. 10-14.
9. Савин С. Н., Ситников И. В., Титова Л. И., Чернов В. И. Инструментальное определение динамических характеристик зданий и первичная обработка информации // Научно-технический сборник Минобороны. № 82. 1992. С. 7-9.
10. Савин С. Н., Ситников И. В., Терехов В. М., Титова Л. И., Соколов В. А. Некоторые результаты инструментального обследования здания 101-й серии с использованием волновой микродинамики // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2000. Выпуск 6. С. 3-6.
11. Савин С. Н., Артемьев А. Н., Шевченко Н. И. Комплексный метод выявления скрытых дефектов и оценка надежности строительных конструкций // Зодчий. 2001. № 1. С. 76-78.
12. Савин С. Н., Ситников И. В., Привалов С. Ю. Результаты обследования конструкций бочарных сводов большого пролета с использованием метода свободных колебаний // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2001. Выпуск 6. С. 3-7.
13. Савин С. Н. Техническая диагностика прочностных характеристик зданий и сооружений на основе анализа форм их собственных колебаний / МО РФ. М., 2006. 141 с.
14. Савин С. Н. и др. Современные методы технической диагностики строительных конструкций зданий и сооружений. СПб. : РДК-принт, 2000. 127 с.

**Сергей Николаевич Савин, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +7-911-220-49-92; эл. почта: savinsn@gmail.com

doi: 10.5862/MCE.25.5

Monitoring of unique buildings with using of dynamic parameters according to GOST R 53778-2010

S.N. Savin;
S.V. Demishin;
I.V. Sitnikov,

26 TSNII (26 Central Research Institute), Saint-Petersburg, Russia
+7-911-220-49-92; e-mail: savinsn@gmail.com

Key words

reinforcement corrosion; structures inspection; reinforced concrete structure; non-destructive testing method

Abstract

Determination of dynamic characteristics of constructions is now demanded by GOST R 53778-2010. It is a very important step to achieve safety of constructions. But GOST requirements do not pay attention to peculiarities of test procedures with unique objects.

The comparative results of tests and analysis of dynamic characteristics of the constructions of Kroonstad Naval Cathedral being obtained during 2005 – 2009 are represented. It was established that some definite changes resulting in loss of spatial rigidity of the whole building occurred in condition of Cathedral constructions.

References

1. VSP 22-01-95. *Pravila pasportizatsii i otsenki fakticheskoy seysmostoykosti voinskiykh zdaniy i sooruzheniy* [Rules of categorization and estimation of actual seismic stability of military buildings and constructions]. Moscow, 1996. 44 p. (rus)
2. *Posobiye po raschetno-eksperimentalnoy otsenke seysmostoykosti obshchevoyskovykh zdaniy i sooruzheniy (k VSP 22-01-95)* [Manual for design and experimental estimation of seismic stability of military buildings and constructions (to VSP 22-01-95)]. Moscow, 2004. 108 p. (rus)
3. *Metodika otsenki i sertifikatsii inzhenernoy bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy* [Estimation and certification methods of engineering security of buildings and structures]. Moscow, 2003. 46 p. (rus)
4. Cherry S., Brady A.G. Determination of Structural Dynamic Properties by Statistical Analysis of Random Vibrations. *Proceedings of Third World Conference on Earthquake Engineering*. New Zealand, 1965. Volume II. Pp. 50-68.
5. Bishop R. E., Gladwell G. M. An investigation into the theory of resonance testing. *Philosophical Transactions*. 1963. Series A, Volume 225, A-1055. Pp. 241-280.
6. *Dinamicheskiye ispytaniya stroitelnykh materialov, konstruktsiy i sooruzheniy. Trudy TsNIIS* [Dynamic tests of structural materials, constructions and buildings. TsNIIS proceedings]. Moscow, 2000. No. 202. 155 p. (rus)
7. Shapiro G. A. *Vibratsionnyye ispytaniya zdaniy* [Vibratory tests of buildings]. Moscow: Stroyizdat, 1972. 159 p. (rus)
8. Mokhov B. A., Savin S. N., Kabantsev O. V. *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik Minoborony*. 1992. № 82. Pp. 10-14. (rus)
9. Savin S. N., Sitnikov I. V., Titova L. I., Chernov V. I. *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik Minoborony*. № 82. 1992. Pp. 7-9. (rus)
10. Savin S. N., Sitnikov I. V., Terekhov V. M., Titova L. I., Sokolov V. A. *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy*. 2000. No. 6. Pp. 3-6. (rus)
11. Savin S. N., Artemyev A. N., Shevchenko N. I. *Zodchiy*. 2001. № 1. Pp. 76-78. (rus)
12. Savin S. N., Sitnikov I. V., Privalov S. Yu. *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy*. 2001. No. 6. Pp. 3-7. (rus)

13. Savin S. N. *Tekhnicheskaya diagnostika prochnostnykh kharakteristik zdaniy i sooruzheniy na osnove analiza form ikh sobstvennykh kolebaniy* [Technical diagnostics of strength properties of buildings and structures on the base of self-excited mode shapes analysis]. Moscow , 2006. 141 p. (rus)
14. Savin S. N i dr. *Sovremennyye metody tekhnicheskoy diagnostiki stroitelnykh konstruktsey zdaniy i sooruzheniy* [Modern methods of building structures technical diagnostics]. Saint-Petersburg : RDK-print, 2000. 127 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 33-39