

# ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРИОДОВ И ДЕКРЕМЕНТОВ КОЛЕБАНИЙ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ

**Улыбин Алексей Владимирович**

к.т.н., генеральный директор

тел.: +7 (921) 777-45-16, e-mail: [ulybin@mail.ru](mailto:ulybin@mail.ru)

ООО «ОЗИС-Венчур» ([www.ozis-venture.ru](http://www.ozis-venture.ru)), г. Санкт-Петербург

## АННОТАЦИЯ

В современных российских документах по обследованию и мониторингу зданий регламентируется обязательное проведение измерений динамических параметров зданий при их обследовании. При этом инженерное сообщество в большинстве своем не знает ни как измерять, ни как использовать данные параметры. Данная статья отражает опыт ознакомления с данной методикой диагностики. В статье приведены не только реальные данные динамического мониторинга нескольких объектов, но и дана критическая оценка действующих норм с точки зрения их практической применимости. Материал адресован всем специалистам, кто сталкивается с данной задачей как с точки зрения заказчика, так и исполнителя динамических измерений.

*Ключевые слова:* динамический мониторинг зданий, декремент колебаний, период колебаний, обследование зданий.

## *Введение*

На сегодняшний день в России основным документом, регламентирующим процедуры обследования и мониторинга технического состояния зданий и сооружений, является ГОСТ 31937-2011 [1]. Помимо общих правил и рекомендаций по проведению мониторинга вообще, ГОСТ [1] описывает необходимость измерения динамических параметров зданий. Первичное измерение данных параметров (периодов или частот колебаний, а также декрементов), зафиксированное в итоговых документах по обследованию, позволит в дальнейшем проводить интегральную оценку технического состояния здания довольно оперативно.

Так в форме заключения по обследованию технического состояния (Приложение Б ГОСТ [1]) указывается на необходимость фиксации периодов колебаний (Т) в продольном (далее Х) и поперечном направлениях (далее Y). В форме паспорта (Приложение Г) и заключения по этапу общего мониторинга

(Приложение Л) предусмотрено измерение вышеуказанных периодов, а также вдоль вертикальной оси (далее Z), и логарифмических декрементов (D) колебаний по указанным направлениям. Итого необходимо измерить шесть параметров обследуемого здания:

**$T_x, T_y, T_z, D_x, D_y, D_z.$**

На практике, с учетом того, что не каждый заказчик знает данные нормы и не каждая экспертная организация имеет измерительное оборудование, данные параметры измеряются довольно редко. Часто встречаются отчеты и заключения, составленные по форме ГОСТ [1], в которых в графах фиксации указанных параметров стоит прочерк, либо указано «измерение не проводилось». К сожалению, и те организации, которые обладают измерительными приборами, во многих случаях не имеют возможности углубиться в суть процесса измерения, возможные ошибки и прочие имеющиеся нюансы. Таким образом, процесс измерения сводится к записыванию цифр, которые отображает прибор, и переноса их в графы заключения. Это связано как с отсутствием времени на полноценный анализ методики измерения, так и с весьма поверхностными указаниями в нормах. Также можно отметить отсутствие курсов повышения квалификации или тренингов, на которых можно обучиться данному виду измерений.

Данная статья является попыткой частичного устранения указанной проблемы и дрсрована всем специалистам, кто сталкивается с вопросом динамических измерений, как с точки зрения заказчика, так и исполнителя данной работы.

### ***Применение результатов измерения динамических параметров***

Перед рассмотрением вопросов «Зачем измерять динамические параметры?» и «Как использовать их результаты?», необходимо отметить, что имеется нормативный документ, описывающий не только, что нужно измерять, но и как. Этим стандартом является ГОСТ 54859-2011 [2]. Именно этот документ содержит правила выполнения измерений, условия и расположение датчиков измерительного комплекса и прочие важные указания.

Итак, для каких целей можно использовать динамические параметры зданий. На рис. 1. представлена схема, укрупненно отвечающая на данный вопрос.



Рисунок 1 – Схема применения результатов динамических измерений

1. **Мониторинг технического состояния** является, по мнению автора, наиболее объективным и простым применением описываемого вида измерений. Суть мониторинга в данном случае, как и при использовании других видов мониторинга, например, геодезического, сводится к сравнению результатов периодических измерений с первоначальными или предшествующими.

Идея контроля основана на том, что в случае существенного изменения жесткости здания данный факт можно будет обнаружить, не прибегая к традиционному осмотру или инструментальному обследованию конструкций, в том числе к расчету. Для контроля нужно лишь установить датчик акселерометр на участок измерения (как правило, верхняя точка объекта вблизи центра масс) и сравнить результаты измерения с предыдущими. Наиболее показательным примером преимущества данного подхода перед традиционным является следующий пример. Допустим, в существующем здании эксплуатирующая организация выполнила демонтаж ненесущих диафрагм жесткости (всех или части). За счет резервов узлов сопряжения элементов и отсутствия реализации неблагоприятного сочетания нагрузок здание может эксплуатироваться после демонтажа определенное время без образования дефектов и обрушения. На поверочный расчет конструкций, особенно поэлементный, демонтаж диафрагм, отвечающих за пространственную жесткость, может никак не сказаться. При этом за счет того, что пространственная жесткость здания будет снижена, динамический мониторинг сразу обнаружит данную проблему. Аналогичные примеры можно привести с повреждениями несущих конструкций или изменением

напряженно-деформированного состояния грунтов основания. Во всех случаях, когда интегральное техническое состояние здание изменится (преимущественно жесткостные параметры) это можно будет выявить условно, не заходя внутрь.

Если обратиться к требованиям ГОСТ 31937 [1] по указанному вопросу, то можно привести следующие выдержки из норматива:

- п.6.2.2 При общем мониторинге, вместо проведения обследования технического состояния зданий в полном объеме, проводят визуальный осмотр конструкций, измеряют динамические параметры и составляют паспорт здания.
- п.6.2.3 Если по результатам приблизительной оценки категория ТС здания соответствует нормативному или работоспособному, то повторные измерения динамических параметров проводят через **2 года**.
- п. 6.2.4 Если по результатам повторных измерений динамических параметров их изменения не превышают **10%**, то следующие измерения проводят еще через **2 года**.
- п. 6.2.5 Если ... при повторном измерении динамических параметров здания результаты измерений различаются **более чем на 10%**, то такое здание (сооружение) подлежит обязательному внеплановому обследованию.

В руководящих документах также имеются и другие критерии оценки технического состояния, базирующиеся на сравнении результатов измерения динамических параметров. Например, в методике по оценке безопасности сооружений МЧС [3] приводятся критерии, представленные в табл. 1.

Таблица 1 – Рекомендации по оценке изменения динамических параметров [3]

Увеличение периода собственных колебаний, %	Степень повреждения
0- 10	1 - без повреждения (легкая)
11-30	2 - умеренная
31-60	3 - сильная
61-90	4 - тяжелая
91-100	5 - катастрофическая

**2. Оценка технического состояния** по результатам динамических измерений подразумевает использование данных единичных измерений без сравнения с предыдущими. При этом предполагается, что для здания типовой конструкции и высоты (этажности) стандартная величина измеряемого параметра (например, периода собственных колебаний в поперечном направлении) должна быть известна. Приблизительно оценить стандартное значение можно воспользовавшись данными, указанными в Приложении Ж ГОСТ 54859 [2] или по формуле, приведенной в монографии [4]:

$$T=k*N, \quad (1)$$

где  $T$  – период колебаний, с;

$N$  – высота здания, м;

$k$  – эмпирический коэффициент, учитывающий конструктивный тип объекта.

За простотой такого подхода, в действительности, скрывается тот факт, что каждая динамическая система (в частности, здание) является уникальной. С учетом фактического конструктивного решения не только несущих, но и ограждающих конструкций, типа фундамента, свойств грунтов основания, наличия прочих обстоятельств, фактические параметры колебаний могут отличаться от среднего «стандартного» значения на величину гораздо большую, чем указанные в нормах [1] 10%. Таким образом, техническое состояние вполне работоспособного здания может быть поставлено под сомнение на основании однократных измерений, выполненных за пару часов.

В подкрепление вышесказанного приведем цитату из книги [4]. *«Как показал опыт исследований, во многих случаях такой упрощенный подход без должного анализа конкретной ситуации может привести к серьезным ошибкам, которые, однако, идут «в запас» и могут занижить оценку состояния вполне добротного здания, но не наоборот. Поэтому надежней в современных условиях анализировать и сопоставлять частоты собственных колебаний реального объекта и его идеальной модели.»*

**3. Верификация модели**, о которой идет речь в конце приведенной цитаты является решением обратной задачи в комплексной оценке состояния объекта. Речь идет о том, что фактически измеренные значения динамических параметров можно сравнивать не со «стандартными» значениями, а с теми же параметрами, полученными в результате модального анализа компьютерной модели здания. Такой анализ можно провести во многих современных расчетных комплексах, таких как SCAD Office, ЛИРА, ANSYS, MIDAS и др. При этом нужно

понимать, что учесть в компьютерном образе все особенности (граничные условия) реального объекта не просто, а для сложных, в частности, бескаркасных объектов, практически невозможно. Поэтому особенность подхода заключается в том, что более правильным является адаптация (верификация) идеализированной модели по измеренным динамическим параметрам реального объекта, а не наоборот.

В любом случае, сравнение, производимое данным способом, требует построения модели конкретного здания, что является достаточно трудоемкой задачей, а соответственно требует времени и финансовых затрат.

### *Результаты экспериментальных измерений*

Для анализа предлагаемого ГОСТ [1,2] метода мониторинга был проведен кратковременный мониторинг шести многоэтажных зданий, основные параметры которых отображены в табл. 2.

Таблица 2 – Описание исследуемых зданий

№	Назначение	Конструкция	Год постройки	Кол-во секций	Этажность	Высота, м
1	Жилое	Монолитное	2014	2	12	36
2	Жилое	Монолитное	2006	3	17	52
3	Жилое	Монолитное	2007	1	20	64
4	Жилое	Монолитное	2010	2	20	61
5	Обществ.	Монолитное	2010	3	9	37
6	Жилое	Панельное	1973	10	9	30

Мониторинг выполнялся в ходе 2-3 циклов измерений (включая первичный) в период июль – октябрь 2017 г.

Для измерений использованы 2 прибора российского производства:

- Вибран 3.1 (НПП «Интерприбор», Челябинск);
- ПРДП-СМ (производитель неизвестен).

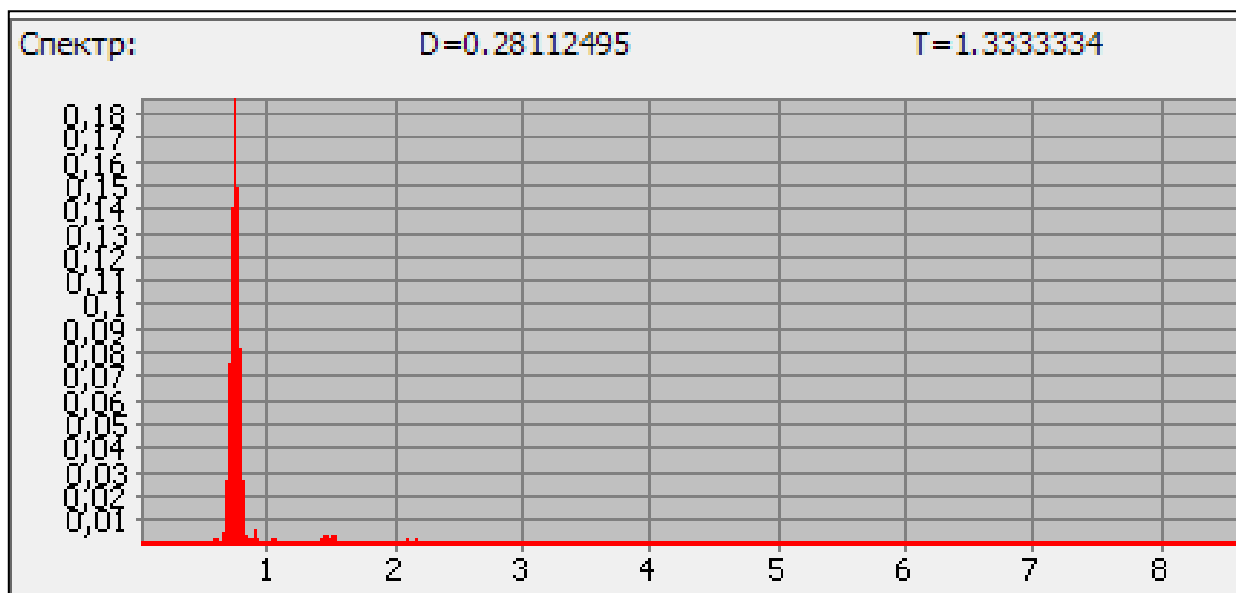
В табл. 3 приведены результаты измерений вдоль наименее жесткого - поперечного направления для всех зданий, а также «стандартные» значения периодов колебаний, определенные по указаниям [2].

Таблица 3 – Результаты измерений в направлении Y

	№ Объекта					
	1	2	3	4	5	6
	Период колебаний в направлении Y, с					
1 измерение	0,64	0,94	1,35	0,72	0,65	0,52
2 измерение	0,64	0,94	1,35	0,72	0,65	0,52
3 измерение	0,63	0,94	1,35	-	-	0,53
<b>По указаниям ГОСТ [2]</b>	<b>0,61- 0,93</b>	<b>0,81- 1,22</b>	<b>1,01- 1,51</b>	<b>1,01- 1,51</b>	<b>0,91- 0,93</b>	<b>0,28- 0,44</b>
<b>По формуле (1)</b>	<b>0,76</b>	<b>1,09</b>	<b>1,34</b>	<b>1,28</b>	<b>0,78</b>	<b>0,45</b>

По результатам, представленным в таблице, можно сделать следующие выводы. Кратковременный мониторинг показал стабильность измеряемого параметра во всех зданиях, отклонения не превышают 2%. В то же время, три из шести объектов имеют период колебаний вне пределов, указанных ГОСТ [2], а при сравнении со значениями, рассчитанными по формуле (1) отклонение достигает 43% (объект №4) и только в одном случае не превышает 10% (объект №3). С другой стороны, в пяти случаях из шести фактические периоды меньше «стандартных» значений, что косвенно свидетельствует о большей жесткости зданий.

Для примера, на рис.2 приведен спектр частот, измеренных на объекте №3. Вверху рисунка представлены значения периода ( $T \approx 1,33$  с) и декремента колебаний ( $D \approx 0,28$ ).



**Рисунок 2 - Спектр частот, измеренных на объекте №3**

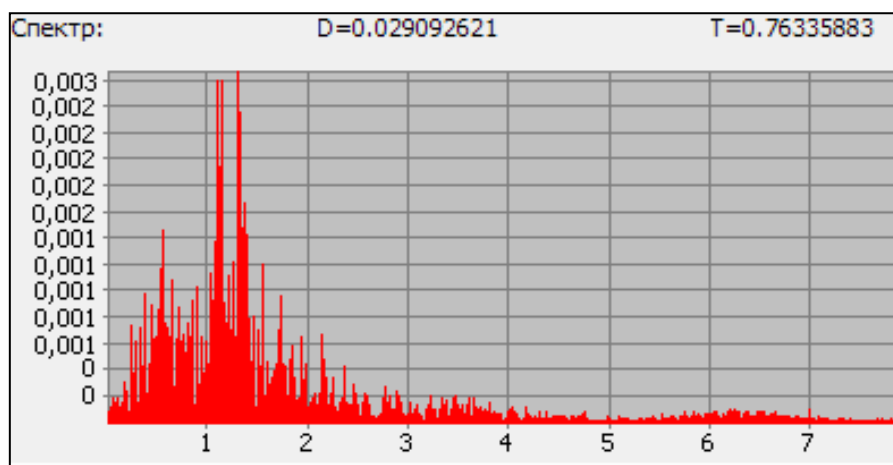
При измерении того же параметра в более жестком – продольном направлении X результаты не характеризуются таким же постоянством (табл.4), что обусловлено наличием различных частот в спектре.

**Таблица 4 – Результаты измерений в направлении X**

	№ Объекта					
	1	2	3	4	5	6
	Период колебаний в направлении X, с					
1 измерение	0,51	0,67	0,77-0,84	0,66-0,7	0,58	0,3-0,44
2 измерение	0,51	0,67	0,77-0,82	0,58-0,7	0,58	0,34-0,46
3 измерение	0,52	0,67	0,82	-	-	0,28-0,48

В качестве примера на рис. 3 приведен спектр колебаний, измеренных на объекте №6. На рисунке видно, что частот с большой амплитудой достаточно большое количество, что при различных измерениях приводит к изменению получаемого параметра в достаточно большом диапазоне, превышающем 10% (см. табл.3).



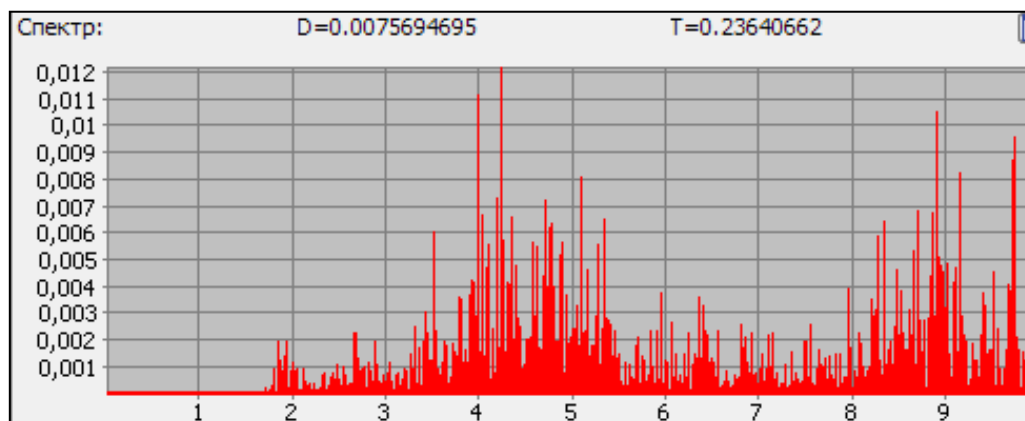


**Рисунок 3 - спектр колебаний, измеренных на объекте №6**

Результаты измерения периода колебаний в вертикальном направлении характеризуются еще большим разбросом, который даже в пределах одного измерения (измерение на одну дату без перемещений датчика) не позволяет отделить реальный результат от случайного. В табл. 5 приведены результаты измерений в направлении Z, выполненные прибором Вибран-3.1. На рис. 4 приведен характерный спектр частот в направлении Z по объекту №6.

**Таблица 5 – Результаты измерений в направлении Z**

	№ Объекта					
	1	2	3	4	5	6
	Период колебаний в направлении Z, с					
1 измерение	0,51-0,54	0,32-0,44	0,38-1,3	0,7	0,65-1,1	0,1-0,25
2 измерение	0,51-1,9	1,85-1,91	1,22-1,91	0,21-0,7	0,64	0,1-0,22
3 измерение	0,17-0,32	0,1-0,35	0,41-0,96	-	-	0,1-0,25



**Рисунок 4 - Характерный спектр частот в направлении Z по объекту №6**

По поводу результатов измерения декрементов колебаний, выполненных обоими приборами, можно констатировать следующее. На всех исследованных объектах, во всех трех направлениях значения декрементов значительно отличались даже в пределах одного измерения. Данное отличие иногда достигало 3 и более раз. По проведенным измерениям складывается впечатление, что декремент, вычисленный по указаниям ГОСТ [2] для такого сложного объекта как здания является скорее случайной величиной, нежели константой, которую можно использовать как базовый параметр мониторинга.

### ***Выводы***

В качестве выводов по результатам проведенного довольно выборочного и кратковременного мониторинга можно отметить следующее.

1. Метод динамического мониторинга для зданий (сооружений) может быть применен как интегральный метод оценки изменения их состояния.
2. При этом в ГОСТ необходимо ввести либо ограничения, либо четкие указания по его применимости для зданий различной конструкции, объемно-планировочного решения, высоты и пр.
3. Использование в качестве измеряемых показателей периода основного тона вертикальных колебаний ( $Z$ ), а также декрементов колебаний по всем осям представляется сомнительным.
4. Оценка технического состояния зданий по однократным измерениям параметров колебаний без дополнительных исследований (визуального обследования, построения модели, инструментального контроля и пр.) и без сравнения с выполненными ранее измерениями должна быть запрещена.

### ***Послесловие***

Автор выражает искреннюю благодарность за предоставление оборудования для реализации описанного в данной статье эксперимента генеральному директору ООО «НПП «Интерприбор» Губайдуллину Герману Асфовичу и директору ООО «РостПроект» Измestьеву Антону Ивановичу.

Описанный в данной статье эксперимент является лишь началом серии экспериментов по изучению практического применения метода динамического мониторинга в той постановке задачи, которую трактует ГОСТ. Автор будет признателен за любые отзывы, дополнения, пожелания, советы и замечания по

поводу вышеописанного материала. Со всей имеющейся информацией просьба обращаться по адресу электронной почты [ulybin@mail.ru](mailto:ulybin@mail.ru) или по телефону (812) 657-12-53.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния
2. ГОСТ 54859-2011 Здания и сооружения. Определение параметров основного тона собственных колебаний
3. Методика оценки и сертификации инженерной безопасности зданий и сооружений. МЧС России. М., 2003, 85 с.
4. С.Н. Савин, И.Л. Данилов, Сейсмобезопасность зданий и территорий / под общ. ред. О.М. Латышева.-Спб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2014.-216 с.

#### THE MEASUREMENT OF PERIODS AND DECREMENTS OF MULTI-STOREY BUILDINGS' OSCILLATIONS

**Ulybin Aleksey Vladimirovich**

PhD (Eng), CEO

Phone: +7 (921) 777-45-16, e-mail: [ulybin@mail.ru](mailto:ulybin@mail.ru)

LLC «OZIS-Venture» ([www.ozis-venture.ru](http://www.ozis-venture.ru)), Saint-Petersburg

#### ABSTRACT

Modern Russian documents on survey and monitoring of buildings state obligatory measuring of buildings' dynamic parameters during their surveying. At the same time, the most part of engineering community knows neither how to measure or how to use these parameters. The article presents the experience of acquaintance with this diagnostic technique. The article presents not only actual data of dynamic monitoring of several objects, but also gives a critical assessment of the current standards in terms of their practical applicability. The material is aimed at all specialists who deal with this problem both from the point of view of customer and performer of dynamic measurements.

*Keywords:* dynamic monitoring of buildings, decrement of oscillations, oscillation period, building survey.