

УДК 550. 4 +УДК 699.84

DOI: 10.23671/VNC.2014.2.55424

## ФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ МЕЖЭТАЖНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ ЗДАНИЙ В ВИДЕ ОБОЛОЧЕК

© 2014 В.Б. Заалишвили<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., проф., М.А. Даниели<sup>2</sup>, доц.

<sup>1</sup>Центр геофизических исследований ВНЦ РАН и PCO-A, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: cgi\_ras@mail.ru,

<sup>2</sup>Ариэльский университет, Израиль, 40700, г. Ариэль, Кирьят Хамада, 3 e-mail: madanieli@ariel.il

Динамическое испытание сооружений и их конструктивных элементов предполагает использование внешнего, искусственного воздействия на них в виде импульсной или вибрационной нагрузки. Импульсное воздействие отличается кратковременным воздействием, как правило, в пределах упругих деформаций. При значительном увеличении времени воздействия нагрузка, и соответствующие испытания примут вид статических. Вибрационное интенсивное воздействие позволяет управлять спектральным составом возбуждающих колебаний и приближается к реальному воздействию. В статье приводится анализ результатов динамических испытаний школьного здания в г. Тбилиси, проведенных в 1991 г.

**Ключевые слова:** межэтажные перекрытия, динамические испытания, сейсмограмма.

### Введение

Динамическое испытание сооружений и их конструктивных элементов предполагает использование внешнего, искусственного воздействия на них в виде импульсной или вибрационной нагрузки. Импульсное воздействие отличается кратковременным воздействием, как правило, в пределах упругих деформаций. При значительном увеличении времени воздействия нагрузка, и соответствующие испытания примут вид статических. Вибрационное интенсивное воздействие позволяет управлять спектральным составом возбуждающих колебаний и приближается к реальному воздействию. В то же время при испытании старых, деформированных зданий и сооружений, как правило, используются импульсные источники, т. к. здесь появляется необходимость более осторожного воздействия, а вибрационное воздействие, при всех его достоинствах, не исключает вредного, за пределами линейного, воздействия. Это, разумеется, совсем не исключает такого же вредного воздействия импульсными источниками, но, как правило, здесь продолжительность воздействия весьма ограничена. В то же время, динамические испытания с помощью вибраторов рекомендованы и даже необходимы при исследовании, например, сейсмостойкости уникального, строящегося или вновь построенного здания или сооружения, а также при определении динамических характеристик конструкций нового типа и т. д.

Строго говоря, воздействие на здание или сооружение в реальных условиях происходит через грунты оснований. Поэтому результаты реакции здания или сооружения на искусственное воздействие в виде вибраций или импульса непосредственно через элементы конструкции имеют определенные ограничения. В то же время это

позволяет изучать конкретные проявления строго контролируемых воздействий.

В линейных системах с  $N$  степенями свободы ( $N > 1$ ) свободные колебания в каждой точке являются суперпозицией  $N$  колебаний. Если восстанавливающая сила не пропорциональна отклонению от положения равновесия, тогда свободные колебания описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, и система будет рассматриваться в виде нелинейной. При этом колебания – не синусоидальны и их период зависит от начальных условий (период свободных колебаний маятника тем больше, чем больше амплитуда). Сам характер и скорость затухания позволяет определить т. н. логарифмический декремент колебаний:

$$\delta = \ln \frac{a_n}{a_{n+1}}, \quad (1)$$

где  $a_n, a_{n+1}$  – ординаты амплитуд последовательных соседних экстремумов колебаний.

Поглощение энергии  $\psi$  непосредственно определяется этим параметром ( $\psi = 2\delta$ ). Рассмотренные параметры наиболее полно характеризуют не только динамические характеристики сооружения, но и его физическое (техническое) состояние. Как показывают материалы обследования последствий землетрясений, здания или сооружения после воздействия сильного движения, часто внешне, даже не имеющие следов деформаций, характеризуются измененными динамическими параметрами. Указанное явление достаточно хорошо известно. В то же время многие взаимосвязи между интенсивными воздействиями и реакцией любой физической системы, определяющих их поведение при сильных землетрясениях или взрывах все еще остаются неясными. В этой связи представляется целесообразным рассмотреть результаты динамических испытаний школьного здания в г. Тбилиси, проведенных нами еще в 1991 г. и до сих пор не опубликованных [Заалишвили, 2009].

### **Динамические испытания элементов конструкций школы**

Школа представляла собой трехэтажное, прямоугольное в плане, здание (рис. 1). Отличительной особенностью школы являлось использование в качестве межэтажных перекрытий оболочек на всех трех уровнях по высоте здания. Оболочки – достаточно большие (в плане –  $8 \times 16$  м, толщиной порядка 10 см). В свое время (50-е годы XX столетия) применение оболочек в строительстве того или иного здания являлось показателем технического совершенства ж/б конструкций. Оболочки как строительная конструкция – достаточно экономная, гибкая и легкая в использовании во многих общественных зданиях получила большое на тот период распространение. Но со временем (на период проведения исследований, т. е. конец 80-х годов XX столетия), многие из них уже подвергались вынужденным, т. е. необходимым усилительным мероприятиям (здание санатория «Металлург» в Цхалтубо, здание по пр. И. Чавчавадзе Тбилисского государственного университета им. И. Джавахишвили и т. д.). В связи с этим, исследованию физического состояния указанных конструкций со стороны властных структур на тот период стало уделяться достаточно внимания и средств, сегодня редко достижимых.

Рассмотрим кратко конструктивные особенности исследуемого школьного здания. Межэтажные перекрытия здания фактически на момент испытания находятся в различных условиях эксплуатации путем различного защемления стенами – перегородками.

Так перекрытие третьего этажа в верхней плоскости пересекается по всей ширине (рис. 1) бетонными жесткостными элементами (0,4x0,4 м). Сверху по продольной оси на перекрытия опирались деревянные стойки крыши. На момент испытания об этом можно было говорить только в прошедшем времени, т.к. указанные стойки не опирались на перекрытие, опустившееся или ушедшее ниже на 10-15 см.

На перекрытие II этажа по той же продольной оси опиралась легкая перегородка, образующая несколько дополнительных классных комнат. Другими словами, здесь только половина оболочки представляла свободную поверхность.

Перекрытие I этажа было полностью свободно. Здесь при самом осторожном передвижении ощущались значительные колебания, т.е. оболочка здесь была весьма гибкой (дело доходило до того, что школьники здесь раскачивались на перемехах).

Для стандартизации экспериментальных исследований был выбран поперечный разрез, свободный по всему протяжению, по линии которого устанавливались сейсмоприемники (СМ-3, ВЭГИК) комплектующие трехкомпонентные измерительные пункты.



Рис. 1 Модель исследуемого здания.

Испытание было начато с третьего, самого верхнего перекрытия. Для возбуждения колебаний нами использовалось раскачивание, а также сбрасывание груза. Один из соавторов (строитель) в силу, видимо, большой опытности и собственной массы делал это более изощренно. При этом второму соавтору (геофизик) на фоне неожиданно возникших интенсивных колебаний, много превышающих все мыслимые уровни воздействия, пришлось несколько тяжелейших мгновений его жизни уповать исключительно на надежность подлежащей испытанию с этой же целью конструкции или, наконец, высокий профессионализм будущего второго соавтора будущей статьи (а точнее – только на Всевышнего!). Необходимо, впрочем, отметить, что оба внешних фактора в связи с, несомненно, более основополагающей и глубокой причиной, на которую мы честно указали, благополучно оправдали ожидания. Можно только догадываться, что думал обо всем этом высокопоставленный представитель главного врача санатория, на тот период все еще всесоюзного уровня, наблюдавший «неприхотливые» движения ученых и, на его счастье (или большую сообразительность?), так и не осмелившийся ступить на деформированное перекрытие. Но вернемся к испытанию перекрытия, по оценке надежности которого, так заблаговременно и в органическом единении с природой были получены самые обнадеживающие результаты.

Итак, анализ полученных данных показал, что на всех сейсмограммах (рис. 2, перекрытия III этажа) присутствовали колебания с частотой 6-7 Гц с наложенными на них более высокочастотными колебаниями 13-14 Гц. Частота собственных колебаний системы составляла  $6 \pm 7$  Гц. Более высокочастотные колебания были связаны с особенностями крепления оболочки (поперечные бетонные стены и т.д.). Низкочастотные колебания, наблюдающиеся на всех записях при выходе системы из положения равновесия ( $f=3,5$  Гц), можно было бы, на первый взгляд, отнести к особенностям возмущения. В то же время, нами были зарегистрированы «автоколебания», т.е. незатухающие колебания, которые (согласно определению) «могут существовать и при отсутствии внешнего воздействия». При этом их амплитуда и частота колебаний определяются только свойствами самой системы, и в определенных пределах не зависят от начальных условий. Здесь везде наблюдались колебания частотой 3,5 Гц, накладывающиеся на колебания с частотой 6-7 Гц и являющиеся ничем иным, как частотой собственных колебаний «чистой» (свободной) оболочки. «Обросшая» связями оболочка характеризовалась частотой колебаний уже 6-7 Гц.

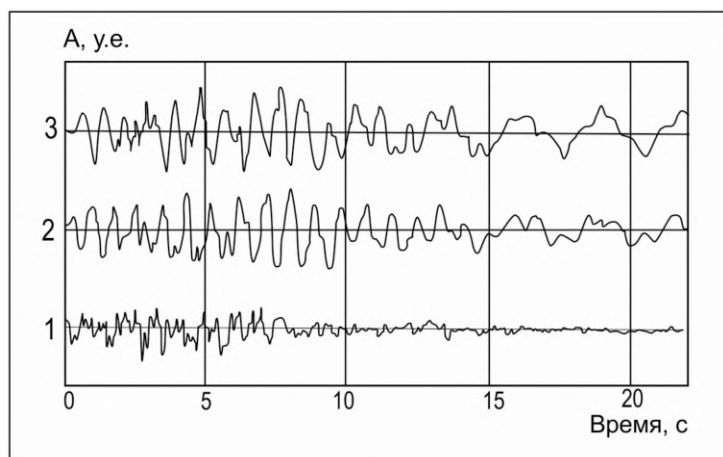


Рис. 2. Типичная сейсмограмма испытаний (1- номер оболочки)

Следует отметить явление значительного изменения величины логарифмического декремента колебаний оболочек. При выведении системы из положения равновесия имеет место т.н. переходной процесс, когда система «сопротивляется» изменению ее состояния. В начальный момент затухания, т.е. при больших значениях амплитуд, затухание – наибольшее и значения логарифмического декремента также наибольшие:  $\delta_1 = 0,51 - 0,85$ , второй этап затухания характеризуется  $\delta_2 = 0,33 - 0,30$  и наконец, третий –  $\delta_3 = 0,13 - 0,30$ .

За установившееся (устойчивое) колебание, обычно, принимается колебание с момента наступления третьего этапа затухания. Первые два отрезка колебаний, как правило, не рассматриваются и никак («переходной этап») не комментируются [Лужин и др., 1987]. В то же время, именно здесь наблюдаются наибольшие ускорения, характеризуемые относительно высокочастотными составляющими, причем, весьма быстро (поглощающимися системой) затухающими. Другими словами, здесь большие амплитуды, характеризуются большей частотой колебаний и малые – меньшей частотой колебаний.

Таким образом, частота колебаний зависит от интенсивности колебаний (высокочастотные колебания –  $14 \div 16$  Гц, даже иногда достигающие 40 Гц, являются, очевидно, вкладом в результирующее колебание различного рода жесткостных ребер или пластических деформаций и т.д.). На перекрытии II этажа частота собственных колебаний выше –  $7 \div 8$  Гц (на краях –  $10 \div 20$  Гц).

Таким образом, наблюдается влияние схемы заземления оболочки на спектральный состав колебаний. Так, больше влияет верхняя, покоящаяся на ней конструкция заземления (стены), изменяющая ее массу и в конечном итоге – жесткость. Для перекрытия III этажа она всего лишь поддерживает, ограничивает движение (внутренние стены не являются несущими). Перекрытие I этажа колеблется с частотой  $4,3 \div 5,3$  Гц. У краев перекрытия частота колебаний составляет –  $8 \div 20$  Гц.

На сейсмограммах, полученных на перекрытии I этажа, наименьший декремент колебаний –  $\delta = 0,05 \div 0,25$ . В центральной части перекрытия имеем самые низкочастотные колебания –  $2 \div 3,5$  Гц (рис. 3). Здесь хорошо видны затухающие, низкочастотные, квазисинусоидальные колебания в начале и последующей части трассы сейсмограммы. Колебания модулированы как по амплитуде, так и по фазе, что приводит к определенным трудностям при обработке данных наблюдений. Если проводить аналогию с радиотехническими понятиями и концепциями, то можно сделать вывод, что гармонические, относительно высокочастотные колебания модулируются низкочастотными. Интересно отметить, что при этом, высокочастотные колебания являются, т.н. несущей частотой, являющейся лишь средством передачи сигнала, а основная информация о движении рассматриваемого элемента здания или сооружения, впрочем, как и любой физической системы – передается низкочастотной модуляцией.

Действительно, предполагая сигнал модулированным, частоты колебаний  $3,5-7,0$  Гц можно рассматривать, как частоты собственных колебаний системы ( $3,5-7$  Гц), а частоты  $10 \div 14$  Гц, рассматривать лишь средством передачи энергии или колебаниями несущей частоты. При этом появляется возможность путем анализа колебаний получать более глубокие сведения о явлениях, происходящих в испытуемом элементе при интенсивных нагрузках. С этой точки зрения особый интерес представляет, на наш взгляд, сейсмограмма, полученная на перекрытии III этажа. В средней части записи имеет место регистрация, очевидно, изменения

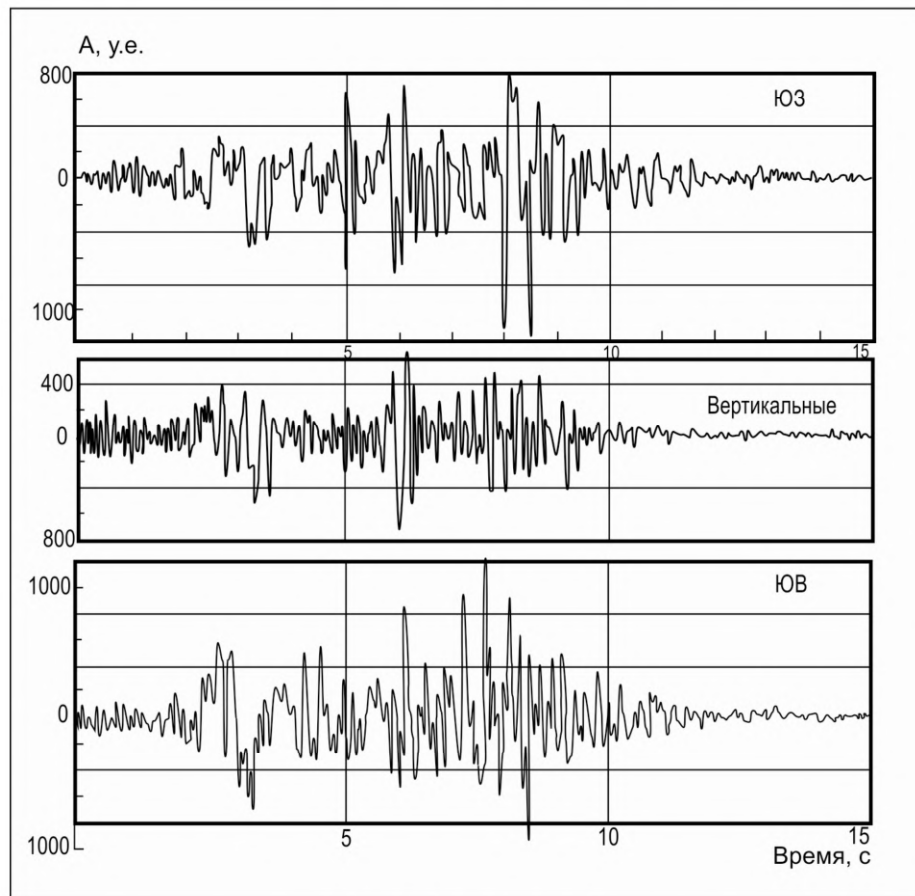


Рис. 3. Анализ записей

физико-механических свойств данной части строительной конструкции в процессе деформации. Указанное явление можно сравнить с сейсмограммой, полученной при землетрясении в Ниигата в 1964 г. (рис. 4).

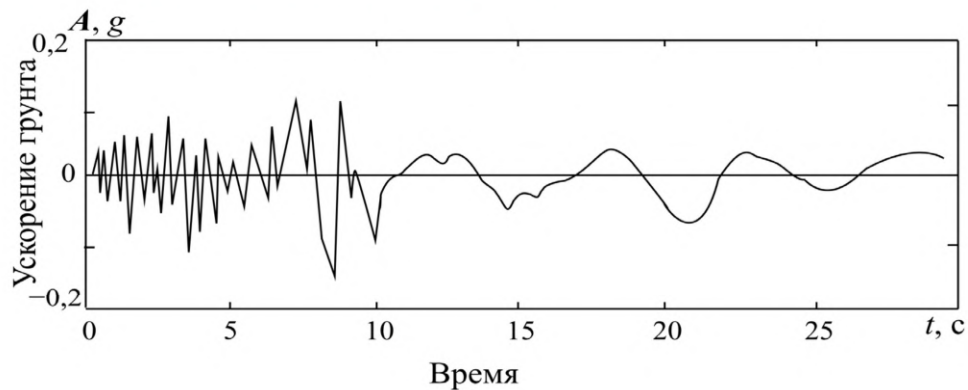


Рис. 4. Запись Ниигатского землетрясения (Япония, 1964)

Таким образом, даже простое сопоставление показывает, что на анализируемых записях движений оболочек отчетливо наблюдаются нелинейные явления в области интенсивных воздействий. Запись характеризуется также весьма неравномерным уходом от начального положения или положения равновесия. Если бы это был грунт, то можно было бы говорить о различиях движений, обусловленных

присутствием свободной границы и различиями эффектов «разрежения – сжатия». Но здесь мы имеем интегрированную систему «перекрытие-среда» со свободными границами с обеих сторон. Поэтому такая неравномерность может объясняться особенностями физического состояния элементов конструкций указанного здания, которые при интенсивных воздействиях характеризуются отчетливыми проявлениями нелинейных эффектов.

Итак, анализ сейсмограмм показывает, что на них зарегистрировано модулированное колебание. Рассмотрим модуляцию синусоидального сигнала в различных аспектах. При амплитудной модуляции синусоидальным сигналом модулированное колебание может быть записано в виде [Гершензон и др., 1971]:

$$X = A_0(1 + m \sin \Omega t) \sin(\omega t - \gamma), \quad (2)$$

где  $A_0$  и  $\omega$  – амплитуда, и угловая скорость исходного сигнала, соответственно;

$\Omega$  – частота модуляции;

$m$  – глубина модуляции;

При этом

$$m = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} \quad (3)$$

Модулированное колебание представляет собой сумму трех синусоидальных колебаний:  $\omega$ ,  $\omega + \Omega$  и  $\omega - \Omega$ .

В случае частотной модуляции синусоидальным сигналом частота колебаний меняется согласно зависимости:

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t, \quad (4)$$

где  $\cos \Omega t$  – модулирующий сигнал;

$\Delta\omega$  – девиация частоты.

Полоса частот модулированного колебания зависит от величин индекса частотной модуляции ( $\beta = \frac{\Delta\omega}{\Omega}$ ). При  $\beta < 1$  (это справедливо для нашего случая) будем иметь следующее выражение для частотно-модулированного колебания [Гершензон и др., 1971]:

$$X = A_0(\sin \omega t + \beta \sin \Omega \cos \omega t) \quad (5)$$

Частотно-модулированное колебание, как и амплитудно-модулированное, состоит из несущей частоты  $\omega$  и двух спутников с частотами  $\omega + \Omega$  и  $\omega - \Omega$ . Поэтому полосы частот занимаемые ими одинаковы. При больших  $\beta$  спектр боковых частот значительно увеличивается и кроме колебаний с частотами  $\omega \pm \Omega$  появляются колебания, частоты которых будут кратны  $\Omega$ :  $\omega + 2\Omega$ ,  $\omega + 3\Omega$  и т. д.

Предполагая колебания синусоидальными (допущение вполне оправданное для практических целей), получим, что форма модулированных колебаний и их спектральный состав для частотной и фазовой модуляции будет аналогичны, и тогда колебание с частотной модуляцией будет иметь вид:

$$X = A_0 \sin(\omega_0 t + \Delta\gamma \cos \Omega t) \quad (6)$$

Учитывая, что мы имеем затухающее колебание с амплитудно-фазовой модуляцией с учетом (6), можно записать:

$$X = A_0 e^{-\alpha t} (1 + m \sin \Omega t) \sin(\omega_0 t + \Delta \gamma \cos \Omega t) \quad (7)$$

Исходя из того, что форма модулированных колебаний и спектральный состав для фазовой и частотной модуляций идентичны, можно с учетом (6) переписать выражение (8) в виде:

$$X = A_0 e^{-\alpha t} (1 + m \sin \Omega t) (\sin \omega t + \beta \sin \Omega t \cos \omega t) \quad (8)$$

Полученное выражение будет достаточно точно описывать зарегистрированные колебания на межэтажных перекрытиях. Примем, что частота  $\Omega$  – это исходная частота затухающих (собственных) колебаний и  $\omega$  – несущая частота. Рассмотрим пример, использования указанной формулы (амплитуды приняты в абсолютных значениях записей).

$$\text{Пусть } \beta = \frac{\Delta \omega}{\Omega} = 0.0167;$$

$$m = 0,474;$$

$$\delta = 0,442.$$

$$A_0 = A_{\text{макс}} = 14 \text{ мм};$$

$$A_{\text{мин}} = 5 \text{ мм};$$

$$t = 15 \cdot 0,0233 \text{ с} = 0,357 \text{ с};$$

$$\omega = 24 \text{ Гц};$$

$$\Omega = 88 \text{ Гц};$$

$$\text{Тогда } x = 14 \cdot 0,56 \cdot e^{-0,442 \cdot 0,357}$$

$$x = 6,7 \text{ мм} \approx 7 \text{ мм}$$

Соответствующее измерение показало, что реальная амплитуда смещения оболочки действительно составила  $x = 7 \text{ мм}$ .

## Выводы

Таким образом, существует возможность достаточно точного расчета затухающих нелинейных колебаний зданий и сооружений аналитическим путем. Это предполагает необходимость постановки специальных экспериментальных исследований по изучению уровню нелинейных явлений в строительных конструкциях, позволяющих с большей надежностью выделить те или иные воздействующие факторы на их основные динамические характеристики по сравнению со сложными дисперсными системами – рыхлыми грунтами. Это позволит в дальнейшем развить глубину и обоснованность метода анализа сильного грунтового движения при интенсивных сейсмических нагрузках. С другой стороны, полученные выводы представляют интерес и для анализа особенностей колебаний строительных конструкций и их физического состояния в момент исследования.

## Литература

1. Гершензон Е.М., Малов Н.Н., Полянина Г.Д., Эткин В.С. Радиотехника. М.: – Просвещение. 1971. 456 с.
2. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. М.: – Наука, 2009. 350 с.
3. Лужин О.В., Злочевский А.Б., Горбунов И.А., Волохов В.А. Обследование и испытание сооружений. М.: – Стройиздат, 1987, 263 с.



DOI: 10.23671/VNC.2014.2.55424

**PHYSICAL ANALYSIS OF THE SPECIAL FEATURES  
OF FLUCTUATIONS WITH THE INTENSIVE DYNAMIC  
LOADS OF THE INTERFLOORS OF THE BUILDINGS  
IN THE FORM OF THE SHELLS**

© 2014 V.B. Zaalishvili<sup>1</sup>, Doct. Phys.-Math. Sci., Prof., M.A. Daniely<sup>2</sup>, Senior Lecturer

<sup>1</sup>Center of Geophysical Investigations of VSC RAS and RNO-A, 93a, Markova st.,  
Vladikavkaz, 362002, Russia, e-mail: cgi\_ras@mail.ru

<sup>2</sup>Ariel University, <sup>3</sup>Kiryat Hamada, Ariel, 40700, Israel  
e-mail: madanieli@ariel.il

Dynamic testing of construction and their structural elements assumes the use of external, artificial action on them in the form of pulse or vibration load. Pulse action is characterized by short-term action, as a rule, in the limits of elastic deformations. With a notable increase in the time of action the load, and the corresponding tests will take the static form. Vibration intensive action makes it possible to govern the spectral composition of the exciting fluctuations and it approaches to the real action. In the article is given the analysis of the results of the dynamic tests of school building in Tbilisi, carried out in 1991.

**The keywords:** interfloors, dynamic tests, seismogram.