

Университет "Святой Кирилл и Мефодий", Скопье
Институт инженерии землетресений и инженерной сейсмологии

ДОКЛАД ИЗИИС 2007-44

**IN SITU ТЕСТИРОВАНИЕ ЗДАНИЯ ПРЕЗИДЕНТСКОГО
ДВОРЦА , БАКУ, АЗЕРБАЙДЖАН ПОСРЕДСТВОМ
ИЗМЕРЕНИЯ ВНЕШНИХ КОЛЕБАНИЙ**

Подготовил:

**Профессор Доктор Любомир Ташков
Профессор Доктор Лидия Крстевска**

Руководитель:

Профессор Доктор Михаил Гаревски

Скопье, Сентябрь 2007

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ
2. ЦЕЛИ ТЕСТИРОВАНИЯ
3. ОПИСАНИЕ ЗДАНИЯ ДВОРЦА И ПОЗИЦИЙ ТОЧЕК ЗАМЕРА
4. ПРОЦЕДУРА ТЕСТИРОВАНИЯ ВНЕШНИХ ВИБРАЦИЙ
5. ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
7. ВЫВОДЫ

1. ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с запросом компании SERBAZ из Баку, Азербайджан, в августе 2007-го года было проведено экспериментальное in-situ тестирование здания Президентского Дворца измерением внешних вибраций. Измерения внешних вибраций на здании Президентского Дворца с целью выявления динамических характеристик: собственных частот, типа (формы) колебаний и коэффициентов демпфирования были выполнены до момента упрочения объекта по технологии «Система ДЦ 90». Сигнальная обработка полученных данных была выполнена с помощью компьютерной программы «ARTeMIS», которая была специально разработана для анализа данных, полученных в результате теста внешних вибраций, одновременно данный программный продукт располагает функциями пространственного представления динамического поведения структурного объекта.

2. ЦЕЛИ ТЕСТИРОВАНИЯ

Целью тестирования было исследование динамического поведения структурного объекта в условиях воздействия окружающей среды (обмотка возбуждения), на основании чего возможно было бы определить динамические характеристики, а именно - собственные частоты, типы колебаний и коэффициенты демпфирования. Эти параметры тесно связаны с прогнозированием сейсмического поведения конструкции объекта в условиях сейсмологической активности, т.е. при землетрясении.

Измерение динамических характеристик конструкции здания до и после мероприятий по упрочению предоставит наглядную информацию об эффекте проведения стабилизационных работ, целью которых было бы повышение как поперечной жесткости объекта, так и его амортизационной мощности.

3. ОПИСАНИЕ ЗДАНИЯ ДВОРЦА И ПОЗИЦИЙ ТОЧЕК ЗАМЕРА

Структурная система конструкции здания представляет собой трех-уровневое сооружение неправильной формы из кирпичной кладки, базирующееся на фундаменте. На фото 1 представлен внешний вид здания, на фото 2 - интерьер главного входа. На рисунке 3 представлены характеристики здания в высоту в поперечном разрезе.



Фото 1. Здание Президентского Дворца в Баку.



Фото 2. Главный вход и его интерьер.

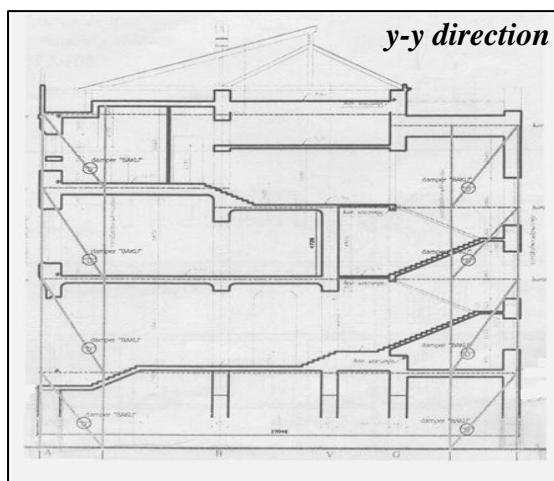
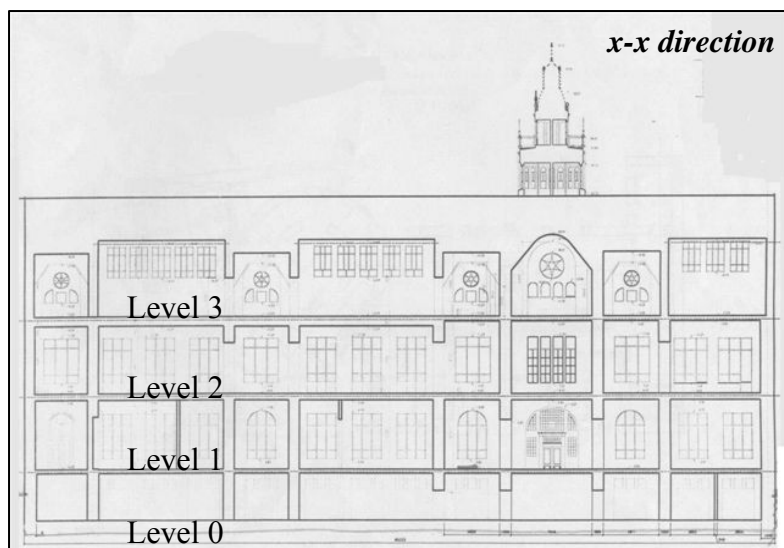


Рис. 3. Здание в высоту в поперечном разрезе.

На рисунках 4 и 5 представлены планы этажей (уровней), а также отмечены точки замеров, на которых были проведены измерения. Нумерация точек замеров производится в виде числа x_n , где x - порядковый номер точки замера, а n - номер уровня. Например, запись 3_1 означает точку замера № 3 на 1-ом уровне, запись 8_3 означает точку замера № 8 на 3-ом уровне и т.д.

Измерения проводились в 43-ех точках замера в двух ортогональных направлениях: $x-x$ (продольном) и $y-y$ (поперечном) направлении, из которых 7 точек замера были установлены на 0-ом уровне (фундамент), 12 – на 1-ом уровне, 12 – на 2-ом уровне и 12 – на 3-ем уровне. Пространственное представление базисных контрольных точек на 3-ем уровне, а также всех остальных точек замера приведено на рисунке 6.

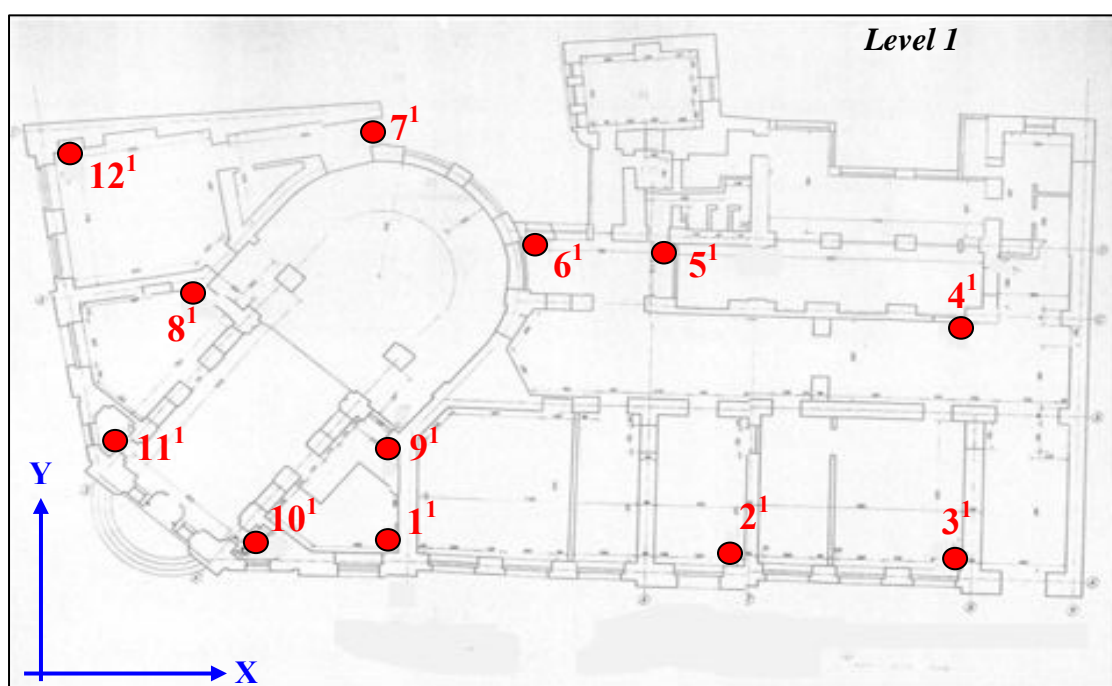
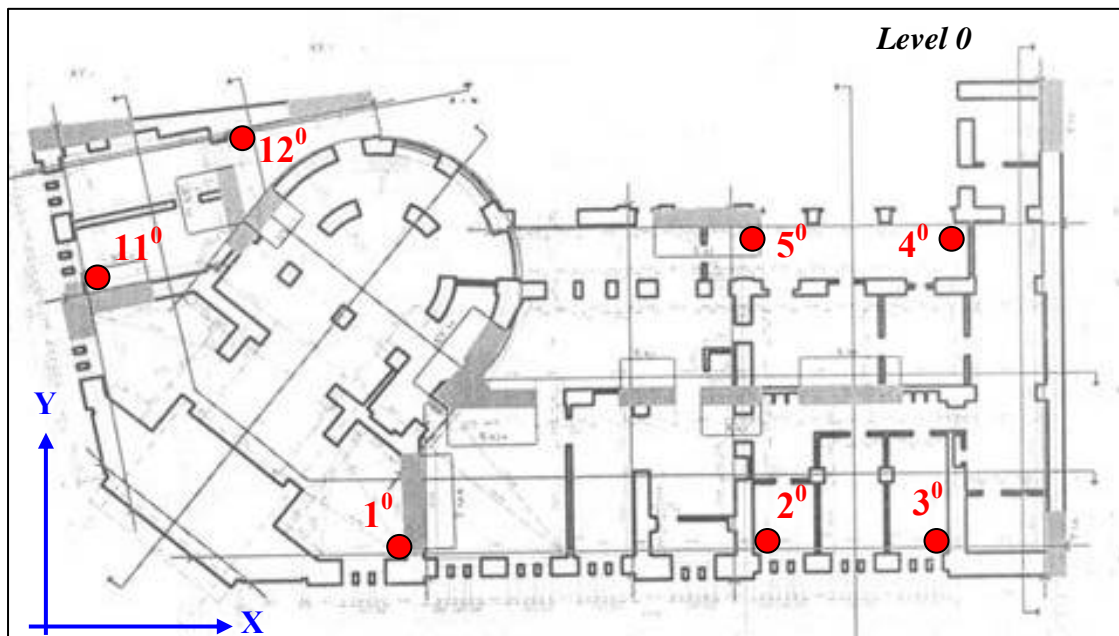


Рис. 4. Распределение точек замера на планах 0-го и 1-го уровней

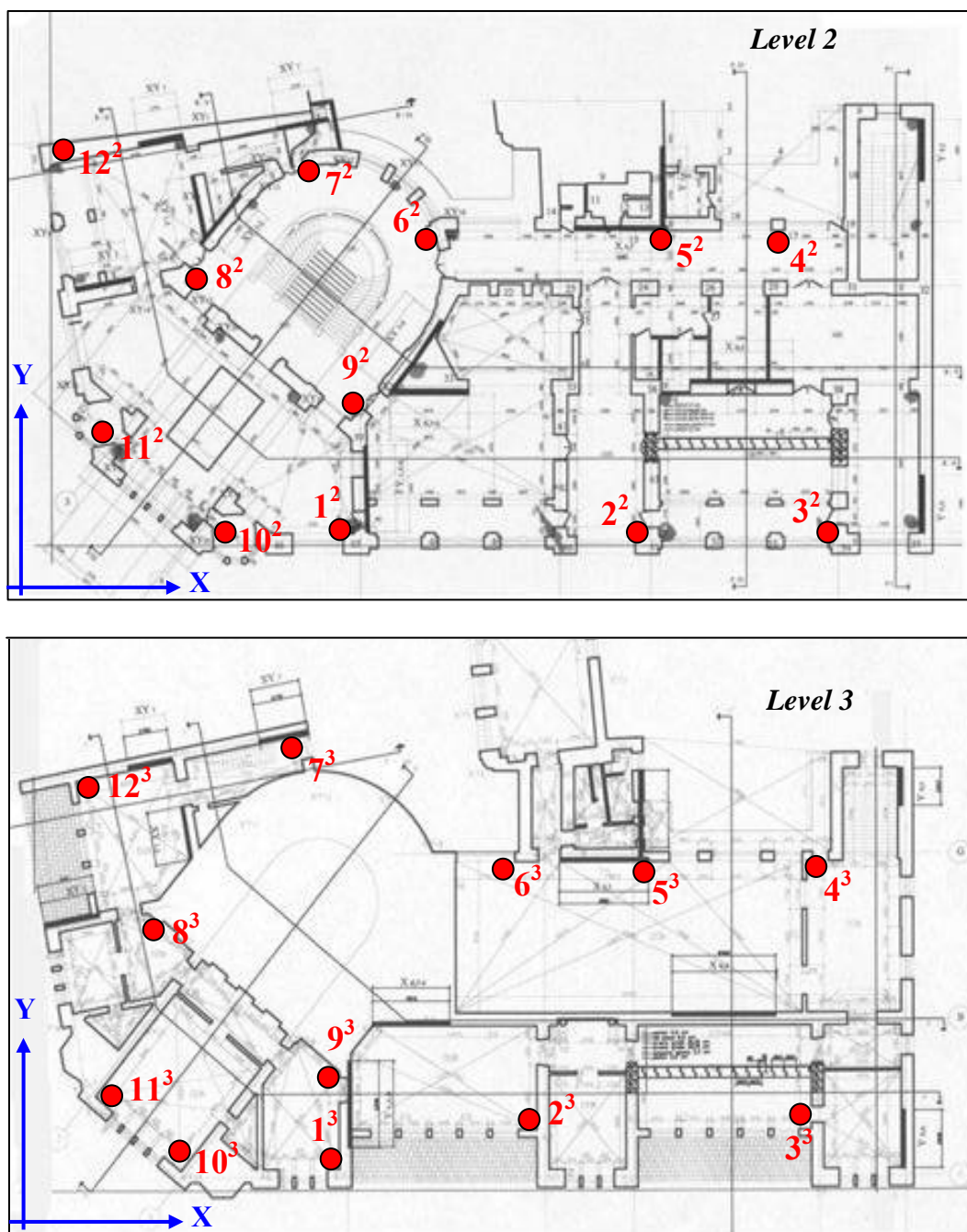


Рис. 5. Распределение точек замера на планах 2-го и 3-го уровней.

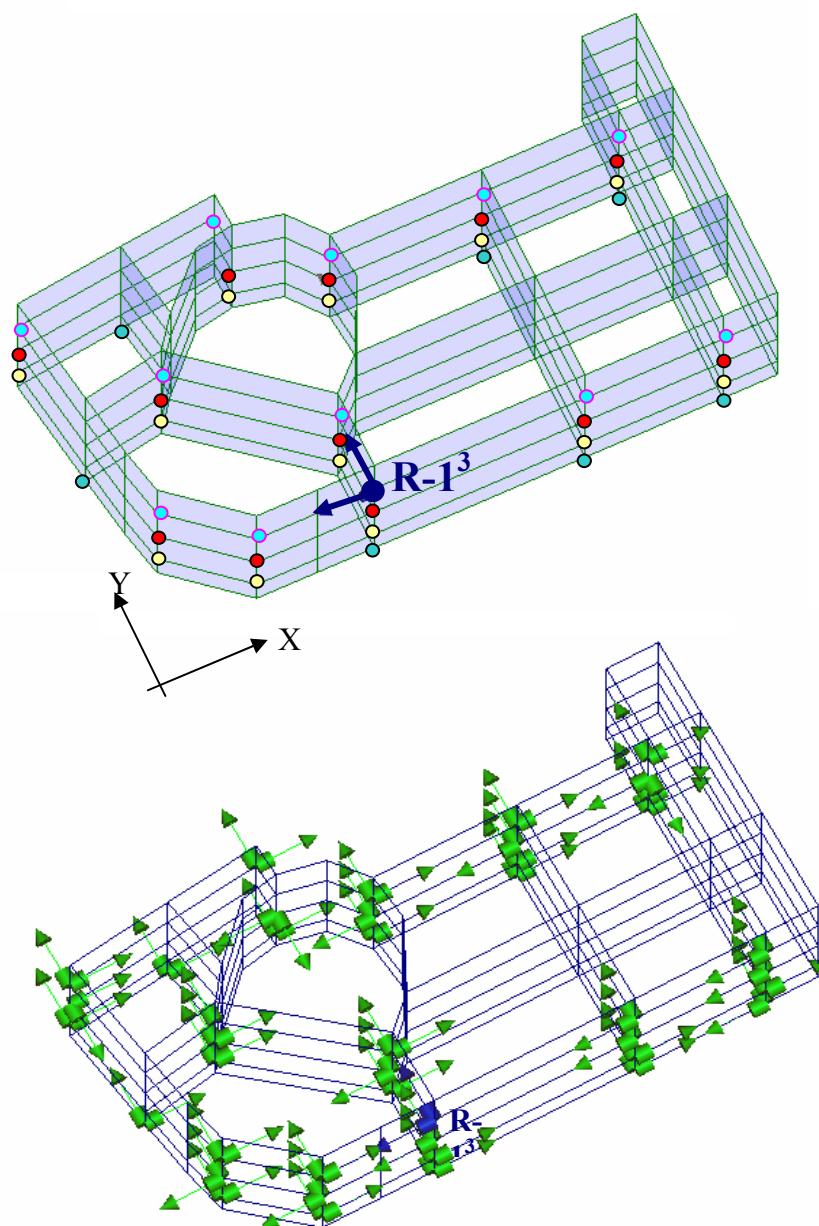


Рис. 6. Пространственное представление всех точек замера на конструкции объекта, а также базисная контрольная точка $R - 1^3$ (согласно «ARTeMIS»)

4. ПРОЦЕДУРА ТЕСТИРОВАНИЯ ВНЕШНИХ ВИБРАЦИЙ

Динамические характеристики конструкции здания были получены с помощью метода тестирования внешних вибраций. Это очень популярный и полномасштабный метод тестирования, который используется для экспериментального определения динамических характеристик структуры конструкции. Он основывается на измерении вибраций конструкции, вызываемых действием окружающей среды (график 7). Под действием сил окружающей среды будем понимать ветер, транспортные шумы, а так же другие микро-колебания и толчковые силы, к примеру, волновые нагрузки или периодические ротационные силы, возникающие при работе некоторых видов автоматических машин. Этот метод представляет собой очень экспедитивную и относительно простую процедуру, и может применяться на жилом объекте, без нарушения его нормального функционирования.

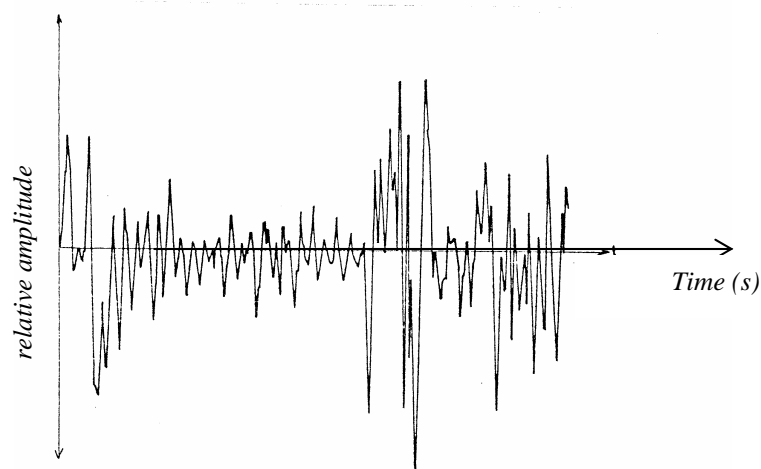


График 7. Временная диаграмма вибраций, вызываемых внешней средой.

Основное предположение, находящееся в основе этого метода, следующее – возбуждающие силы представляют собой постоянный случайный процесс, имеющий допустимо ровный частотный спектр. Под такими условиями, структура объекта вибрирует с откликом в границах его нормальных форм.

Процедура тестирования внешних вибраций здания состоит из записи вибраций в режиме реального времени и последующей обработки полученных данных. Стартовый тест – это тест динамической калибровки. Во время этого теста все сенсоры (сейсмометры) находятся на одних и тех же местах и направлениях, при этом проводится одновременная запись полученных сигналов, достигается спектр Фурье. Резонансная частота структуры может быть предварительно определена с помощью тестов динамической калибровки, но конечное определение собственных частот возможно лишь после получения результатов типов колебаний при вибрациях. После теста калибровки сейсмометры размещаются на различных уровнях и в различных точках структуры объекта, но при этом в одном направлении, и опять одновременно проводится запись. Это необходимо для

получения данных о формах колебаний при вибрациях. Одна из точек становится контрольной, обычно это точка на самом высоком уровне структуры объекта. Продолжительность записи должна быть достаточной для того, чтобы исключить влияние возможных не-стохастических возбуждений, которые могут возникнуть во время теста.

5. ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для записи структурных вибраций, вызванных возбуждающим фактором окружающей среды, используется система сейсмометров, усилителей и записывающих устройств. Сейсмометр измеряет частоту, при этом у него есть ограничения по частоте и диапазону амплитуд. Сигнал сейсмометра посредством специальных кабелей передается в систему обработки сигналов, которая в свою очередь исключает эффект высоких частот. В случае Президентского Дворца в Баку для измерения вибраций окружающей среды были использованы три сейсмометра типа «Ranger», изделие Kinometrics (a), а измеренные сигналы были усилены четырехканальным анализатором сигналов, так же изделие Kinometrics (b). На следующем этапе усиленные и отфильтрованные сигналы, полученные от сейсмометров, были обработаны высокоскоростной системой сбора данных, которая в свою очередь трансформировала аналоговые сигналы в цифровой облик. ПК и специальное программное обеспечение для обработки данных в режиме on-line использовались для распечатки временной диаграммы и спектра амплитуд Фурье при отклике каждой точки замера (d). Анализатор Фурье (e) использовался в целях быстрого контроля и анализа сигналов в частотной области и для получения спектра амплитуд Фурье (FAS). На фото 8 представлено упомянутое измерительное оборудование.

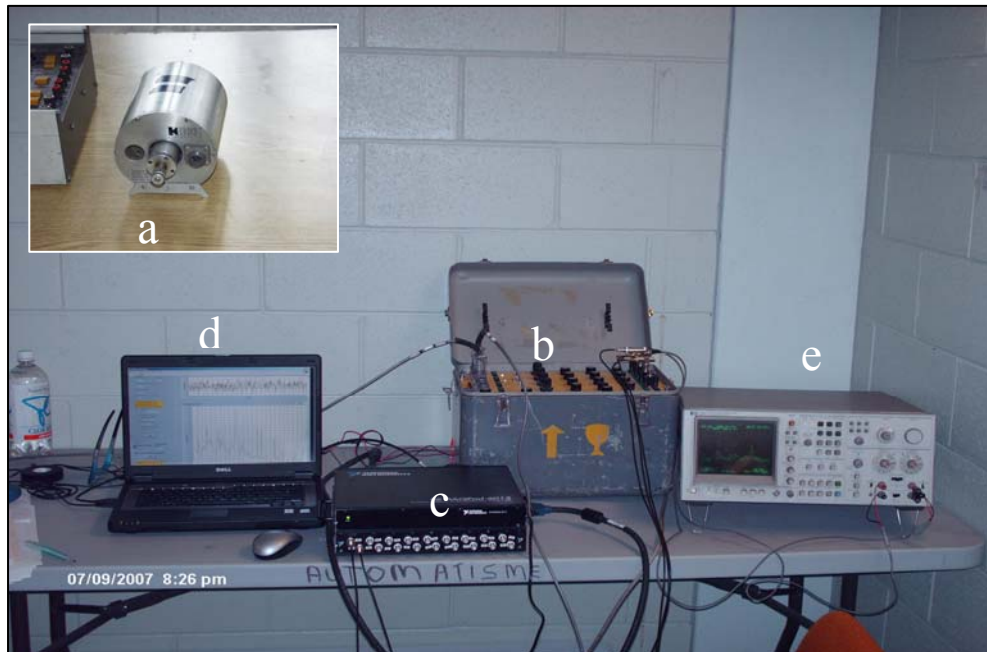


Фото 8. Оборудование для измерения внешних вибраций.

Для последующей обработки и анализа регистрованных на точках замера вибраций использовалось программное обеспечение ARTeMIS. Это программное обеспечение основывается на технике выборки максимального значения и декомпозиции частотной области, наряду с этим обладает возможностью отличной графической презентации полученных данных.

6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Показатели внешних вибраций по продольному и поперечному направлениям, полученные во время проведения экспериментального тестирования Президентского Дворца, анализировались в частотной области до 25 Hz. В общей сложности было выполнено 87 тестов, включая тесты динамической калибровки с контрольной точкой на 3-ем уровне. Во время процесса сбора данных было рассмотрено 20 средних значений. Продолжительность каждой отдельной записи составила 100 секунд, а частота замеров – 200 замеров в секунду.

Для каждой отдельной точки замера был получен спектр амплитуд Фурье (FAS).

На графике 9 представлен FAS, измеренный в контрольной точке 1³ 3-го уровня по продольному x-x и поперечному y-y направлениям относительно. Первая резонансная частота является доминантной, но можно заметить, что кроме нее существует еще несколько доминирующих частот спектра.

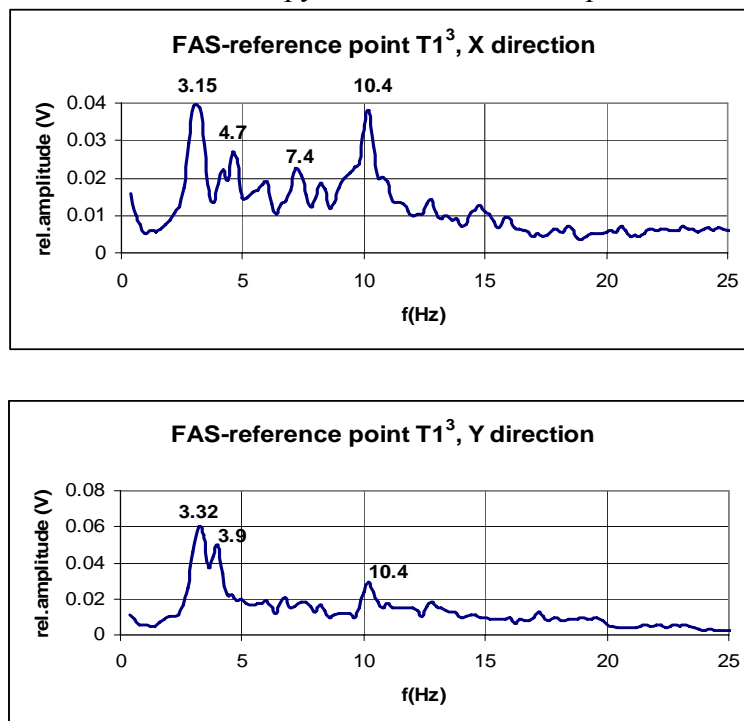


График 9. Спектр амплитуд Фурье (FAS) измеренный в контрольной точке R-1³

Как уже упоминалось ранее, для последующей обработки сигналов было использовано программное обеспечение ARTeMIS. Выборка максимума в доминирующих частотах средствами программного обеспечения ARTeMIS

представлено на графике 10, 11 а в таблице 1 даны значения этих частот, а также соответствующие им коэффициенты демпфирования.

Частота, равная 3.15Hz, является первой резонансной частотой здания по продольному направлению(х-х), в то время как первая резонансная частота по поперечному направлению (у-у) равна 3.32Hz. Первая крутильная частота составляет 3.9Hz. На рисунках 11 и 12 представлены формы колебаний здания при воздействии вибраций при каждой доминантной частоте, в то время как AVI-моделирование приведено в отдельном приложении. Принимая во внимание полученный спектр, а так же вид колебаний, очевидно, что в структуре здания доминируют пространственные колебания, при чем во время колебаний превалирует крутильное воздействие.

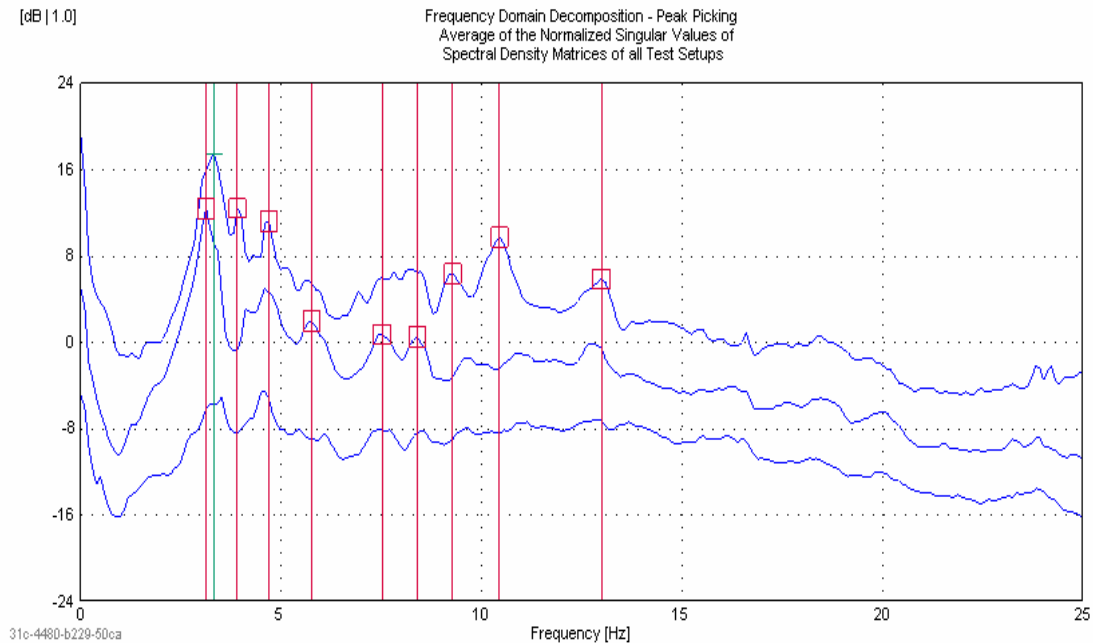
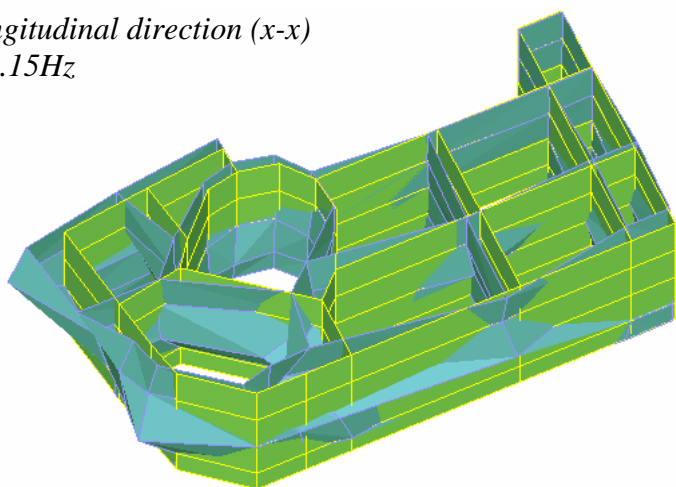


График 10. Выборка максимума из доминантных частот, президентский Дворец, Баку

Таблица 1. Доминантные частоты здания

MODE	FREQUENCY (HZ)	DAMPING (%)
Mode 1	3.15	2.4
Mode 2	3.32	3.6
Mode 3	3.9	3.6
Mode 4	4.7	2.1
Mode 5	5.7	1.7
Mode 6	7.42	1.4
Mode 7	8.4	1.3
Mode 8	9.28	1.7
Mode 9	10.45	2.4
Mode 10	13.0	1.1

Longitudinal direction (x-x)
 $f=3.15\text{Hz}$



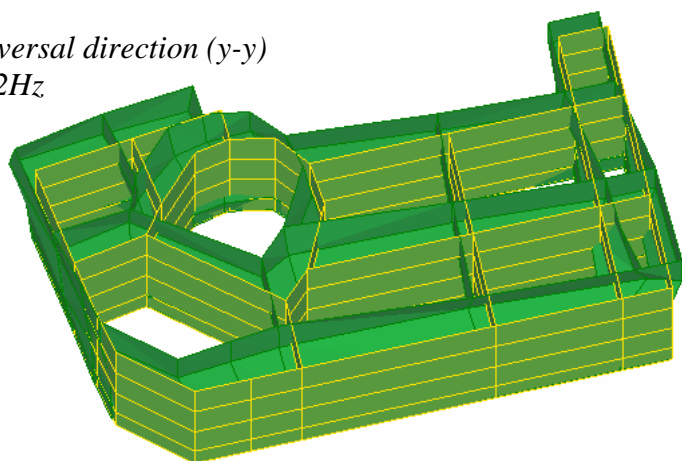
Modal Values
 Frequency = 3.145 Hz
 Damping Ratio = 2.459 %

Undeformed Geometry
 Lines
 Surfaces

Deformed Geometry
 Lines
 Surfaces

Display Settings
 Rotation - Horz. = 25°
 Rotation - Horz. = 65°
 Translation - Horz. = -3.8
 Translation - Vert. = -5.6
 Zoom Level = 124%
 Amplitude = 100%
 Phase Angle = -126°
 Frames per Sec. = 0

Transversal direction (y-y)
 $f=3.32\text{Hz}$



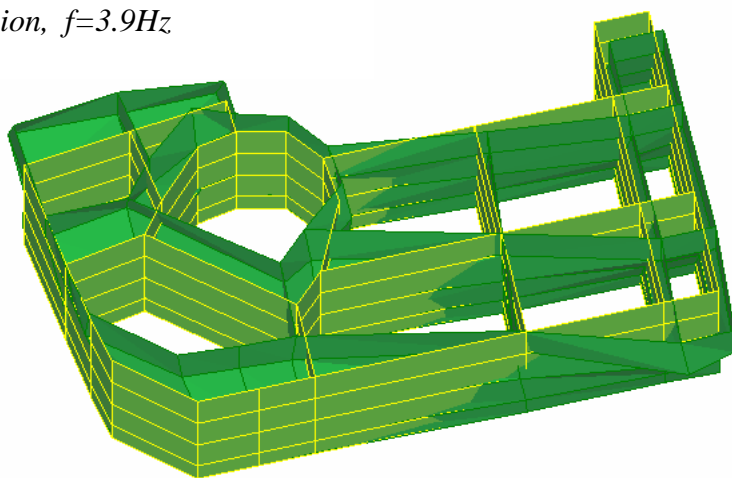
Modal Values
 Frequency = 3.32 Hz
 Damping Ratio = [None]

Undeformed Geometry
 Lines
 Surfaces

Deformed Geometry
 Lines
 Surfaces

Display Settings
 Rotation - Horz. = 13°
 Rotation - Horz. = 73°
 Translation - Horz. = 0
 Translation - Vert. = 0
 Zoom Level = 124%
 Amplitude = 100%
 Phase Angle = 90°
 Frames per Sec. = 0

Torsion, $f=3.9\text{Hz}$



Modal Values
 Frequency = 3.906 Hz
 Damping Ratio = [None]

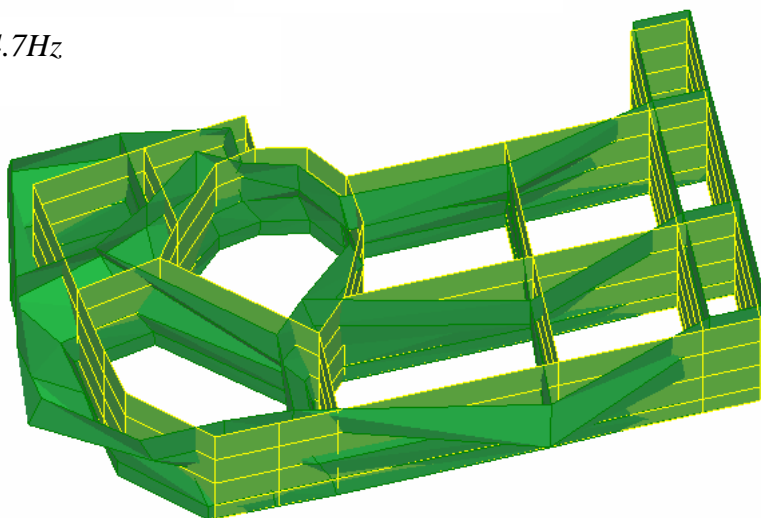
Undeformed Geometry
 Lines
 Surfaces

Deformed Geometry
 Lines
 Surfaces

Display Settings
 Rotation - Horz. = 13°
 Rotation - Horz. = 73°
 Translation - Horz. = 0
 Translation - Vert. = 0
 Zoom Level = 126%
 Amplitude = 100%
 Phase Angle = 90°
 Frames per Sec. = 0

Рисунок 11. Типы колебаний при резонансных частотах

$$f=4.7\text{Hz}$$



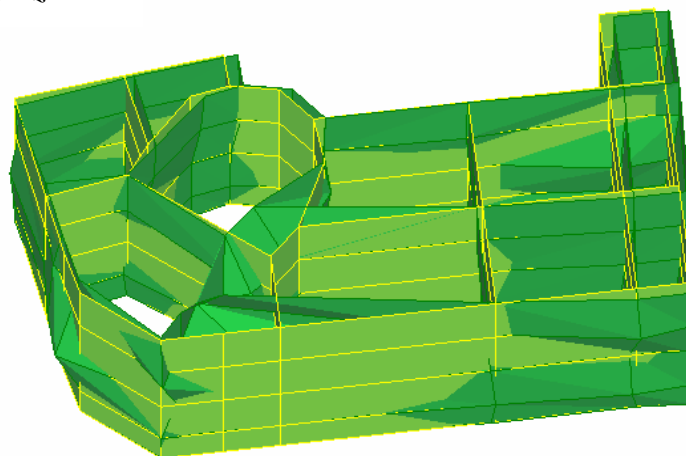
Modal Values
Frequency = 4.688 Hz
Damping Ratio = [None]

Undeformed Geometry
— Lines
— Surfaces

Deformed Geometry
— Lines
— Surfaces

Display Settings
Rotation - Horz. = 13°
Rotation - Horz. = 73°
Translation - Horz. = 0
Translation - Vert. = 0
Zoom Level = 126%
Amplitude = 100%
Phase Angle = 269°
Frames per Sec. = 0

$$f=10.45\text{Hz}$$



Modal Values
Frequency = 10.45 Hz
Damping Ratio = [None]

Undeformed Geometry
— Lines
— Surfaces

Deformed Geometry
— Lines
— Surfaces

Display Settings
Rotation - Horz. = 7°
Rotation - Horz. = 64°
Translation - Horz. = 1.1
Translation - Vert. = 2.9
Zoom Level = 126%
Amplitude = 100%
Phase Angle = 323°
Frames per Sec. = 0

Рисунок 12. Типы колебаний при резонансных частотах

7. ВЫВОДЫ

- В августе 2007-го года, до момента реализации мероприятий по упрочению здания согласно технологии «Система ДЦ90», было реализовано динамическое тестирование Президентского Дворца в Баку, Азербайджан, посредством метода внешних вибраций;
- Измерения проводились по двум ортогональным направлениям;

- В общей сложности было проведено 87 тестов, в результате которых были получены исчерпывающие экспериментальные данные, характеризующие динамические характеристики структуры объекта.
- Полученный диапазон частот составляет 0-25 Hz.
- Доминантные собственные частоты структуры здания следующие:
 - Первая собственная частота при колебаниях в продольном направлении - 3.15Hz;
 - Первая собственная частота при колебаниях в поперечном направлении - 3.32Hz;
 - Первая собственная частота при крутильных колебаниях - 3.9Hz;
 - Последующие доминантные частоты: 4.7Hz, 5.7Hz, 7.6Hz, 8.4Hz, 9.28Hz, 10.45Hz and 13.0Hz;
- Коэффициенты демпфирования находятся в диапазоне от 1.5 до 3.7% от критического гашения, при этом эти значения ниже тех, которые обычно характерны для структур из кирпичной кладки;
- Принимая во внимание типы колебаний, не считая колебаний первого типа в поперечном направлении, очевидно, что структура подвергается комплексным вибрациям со множеством крутильных эффектов. Учитывая неправильную геометрию и план здания, такие эффекты и следовало ожидать;
- Сравнение динамических характеристик здания, измеренных до и после проведения мероприятий по упрочению здания согласно технологии «Система ДЦ90», предоставит информацию об эффекте повышения поперечной жесткости и и амортизационной мощности (мощности демпфирования), явившихся результатом применения проекта укрепления.
- Полученные экспериментальные данные представляют собой качественную исчерпывающую базу для дальнейшего цифрового моделирования сейсмического отклика здания.