Статический, динамический и сейсмический мониторинг состояния строительных конструкций зданий и сооружений в период строительства и эксплуатации для обеспечения безопасности ОИАЭ

Живаев А.А., Болдырев Г.Г.
ООО «НПП «Геотек»
www.npp-geotek.ru
www.npp-geotek.com

Мониторинг конструкций

Цель

непрерывное слежение за текущим состоянием конструкций и дестабилизирующих факторов и прогноз их изменения для обеспечения безопасности эксплуатации конструкций

Задачи

- определение и оценка контролируемых параметров – факторов окружающей среды, параметров конструкций и оснований
- измерения инструментальными средствами
- экспресс-анализ в режиме реального времени для оперативной оценки состояния строительных конструкций
- анализ архивных данных мониторинга для определения изменения состояния объекта и оценки остаточного ресурса

Статический мониторинг

Определение

- наблюдения за реакцией конструкций на факторы, медленно изменяющиеся во времени
- и/или наблюдения за указанными факторами

Примеры

- изменение крена фундамента вследствие неравномерности осадок и/или факторов, влияющих на крен
- осадка фундамента и/или изменение НДС конструкций

Динамический и сейсмический мониторинг

Определение

- наблюдения за реакцией конструкций на факторы, быстро изменяющиеся во времени
- и/или наблюдения за указанными факторами

Примеры

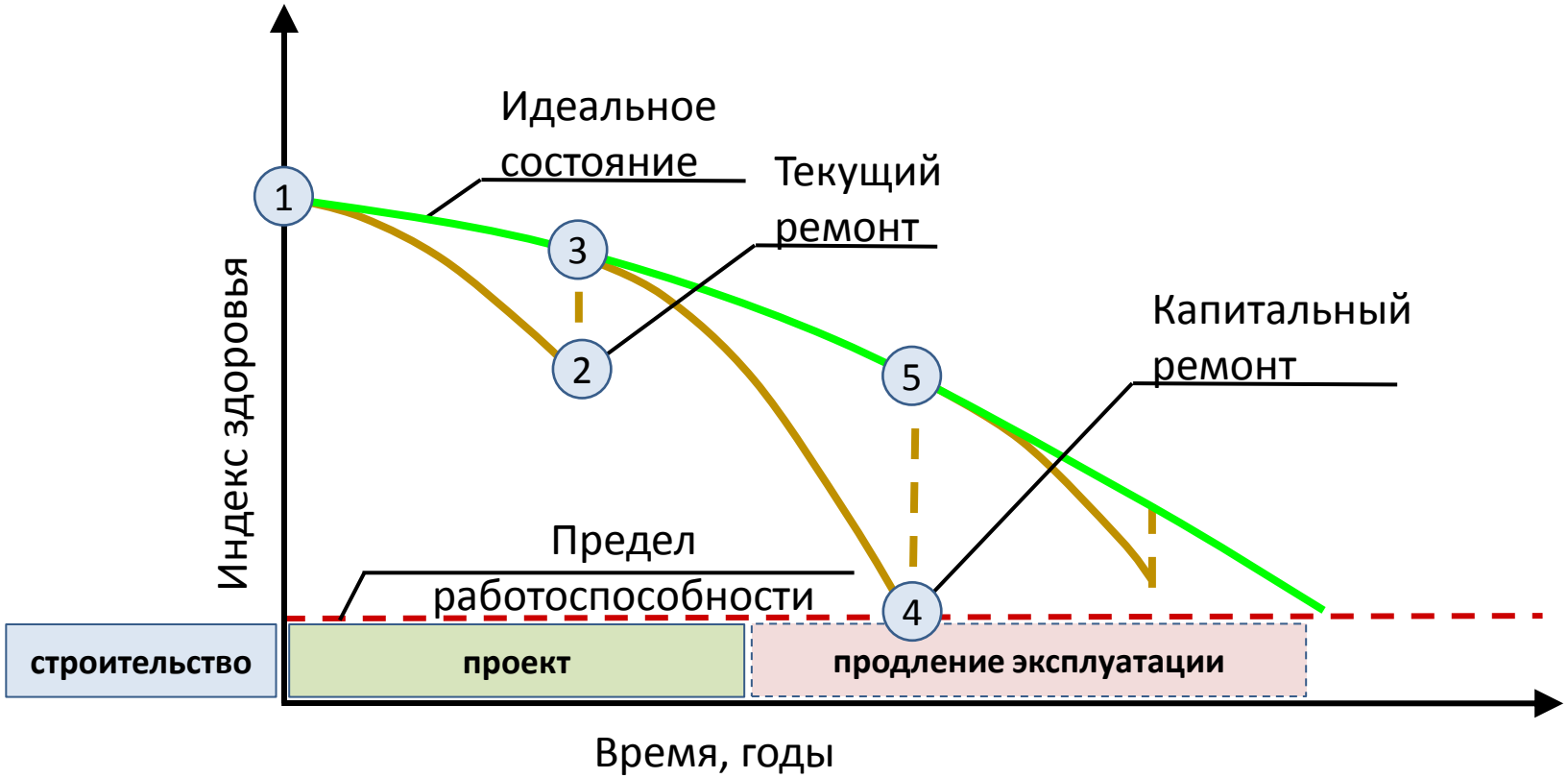
- колебания строительных конструкций от машин, механизмов и движущегося транспорта

Сейсмический мониторинг

наблюдения за сейсмическими нагрузками на строительные конструкции и их реакцией на указанные нагрузки

Мониторинг текущего состояния и ресурса на протяжении жизненного цикла конструкций

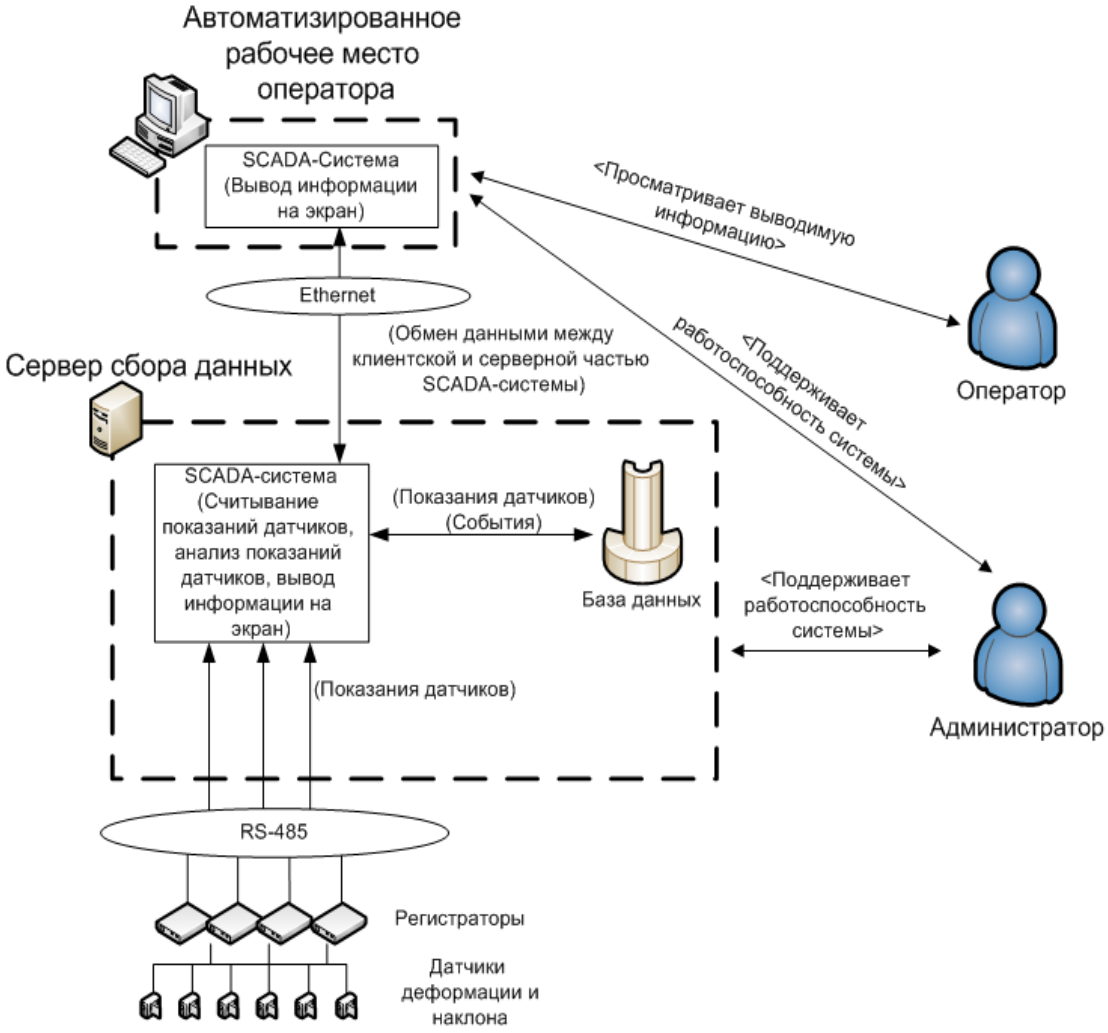
N 384-ФЗ "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений"
ГОСТ Р 22.1.12 - 2005 "Безопасность в ЧС. СМИС. Общие требования"
Отраслевые стандарты для строительных конструкций ОИАЭ
Отраслевые стандарты эксплуатации машин и механизмов



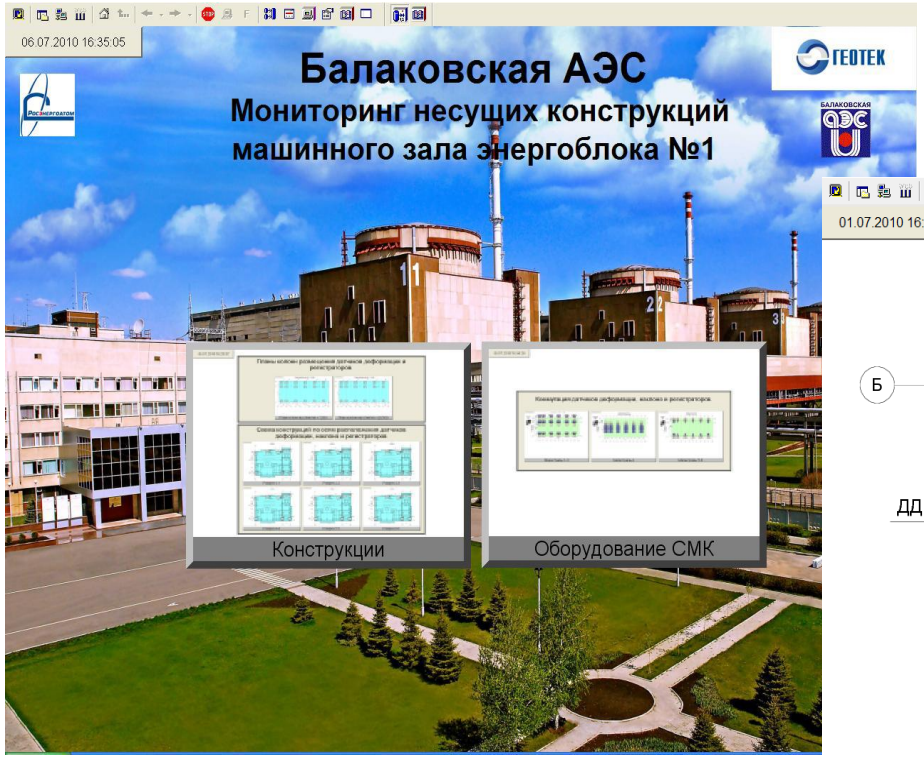
Парадигма мониторинга конструкций LANL

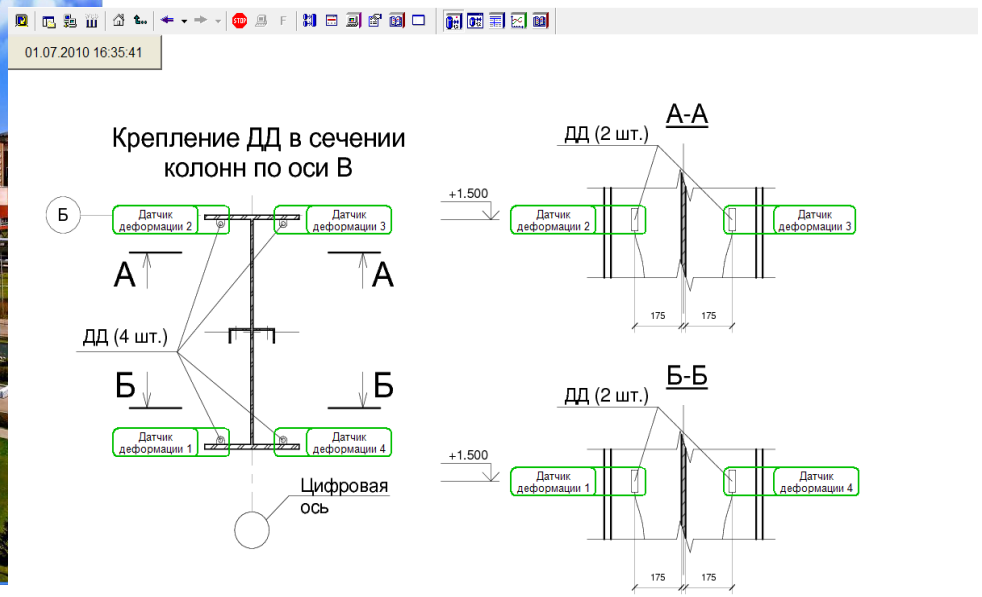
- оценка цели и задач мониторинга
- процесс измерения данных – выполняется автоматизированными системами мониторинга конструкций (СМК)
- вычисление признаков - некоторых характеристик объекта, служащих для оценки состояния конструкций, например, частот собственных колебаний, форм колебаний, коэффициентов демпфирования
- разработка статистических моделей для оценки текущего состояния и прогноза его изменения

Структура проекты СМК БалАЭС с использованием SCADA



Фрагменты интерфейса автоматизированного рабочего места оператора СМК БалАЭС





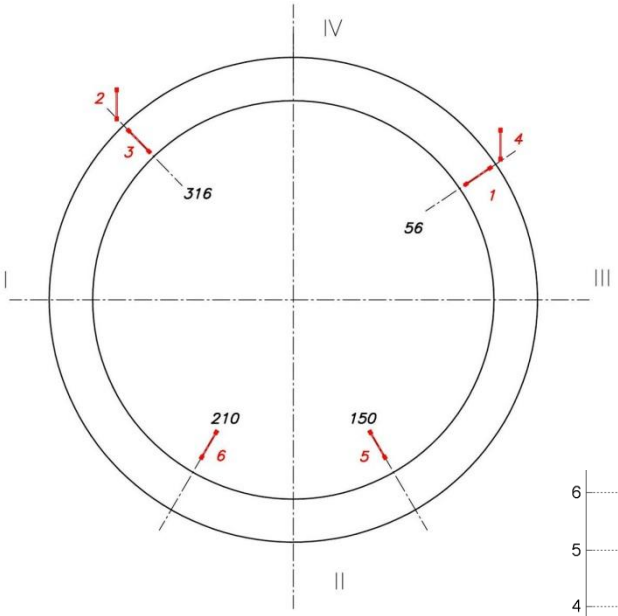
Оборудования для систем мониторинга ООО «НПП «Геотек»

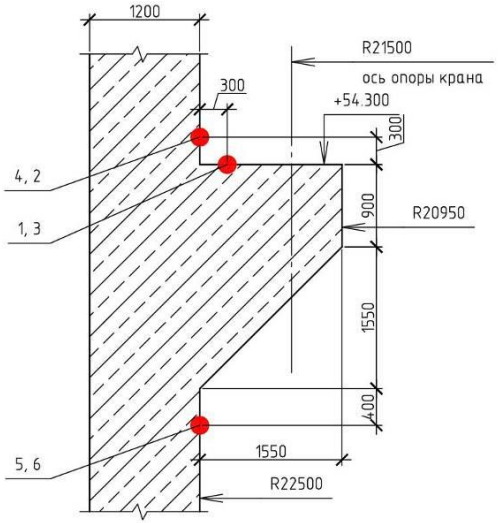
Модуль измерения ускорения

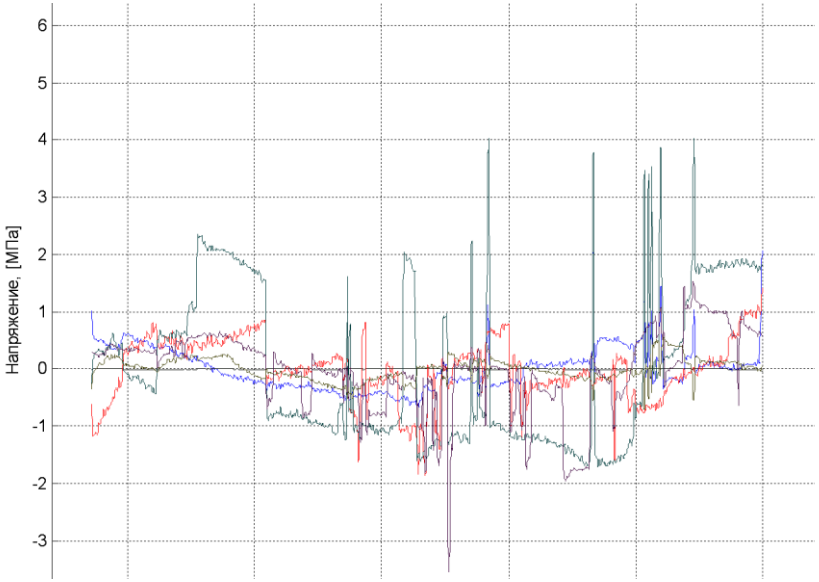
Модуль измерения деформации

Модуль измерения наклона

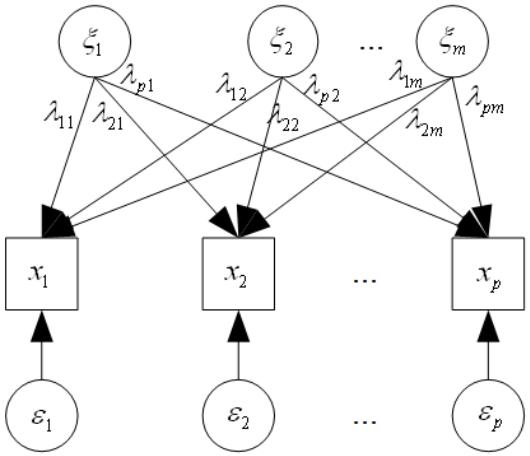
Измерение деформаций облицовки ЗО НВАЭС при движении полярного крана





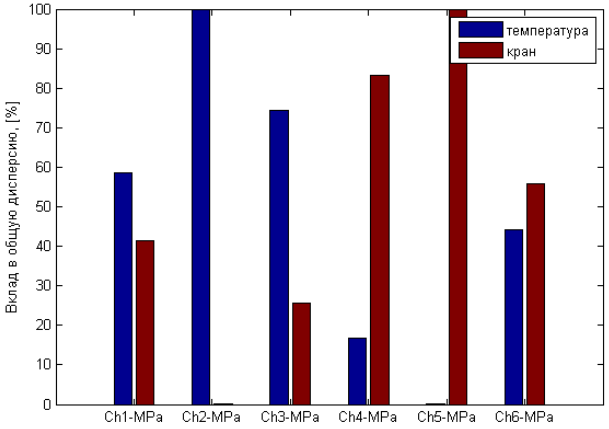


Факторный анализ измерения деформаций облицовки консоли полярного крана ЗО НВАЭС



$$x = \Lambda\xi + \varepsilon$$

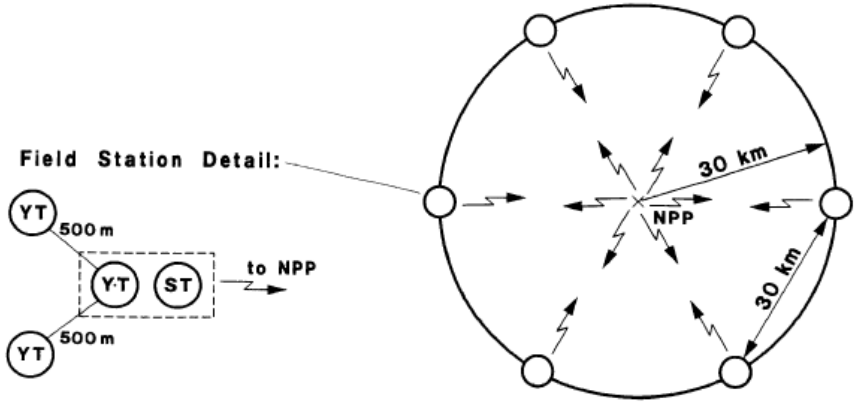
$$\sigma_\Sigma = \sigma_{t_{BH}} + \sigma_{кр} = \lambda_{1st}\xi_{1st} + \varepsilon$$



	σ_Σ	$\sigma_{t_{BH}}$	$\sigma_{кр}$
	Ch1-MPa		
σ_{min}, [МПа]	-2,71	-0,79	-0,67
σ_{max}, [МПа]	0,00	1,16	2,07
$\Delta\sigma$, [МПа]	2,71	-1,95	2,74
	Ch2-MPa		
σ_{min}, [МПа]	-2,13	-1,04	-0,03
σ_{max}, [МПа]	0,47	1,53	0,02
$\Delta\sigma$, [МПа]	2,59	-2,58	-0,05
	Ch3-MPa		
σ_{min}, [МПа]	-3,67	-1,67	-1,88
σ_{max}, [МПа]	0,68	2,45	1,42
$\Delta\sigma$, [МПа]	4,35	-4,12	3,30
	Ch4-MPa		
σ_{min}, [МПа]	-0,26	-1,62	-1,71
σ_{max}, [МПа]	6,26	1,10	4,04
$\Delta\sigma$, [МПа]	6,52	2,72	5,75
	Ch5-MPa		
σ_{min}, [МПа]	-3,83	-0,03	-3,55
σ_{max}, [МПа]	1,28	0,02	1,54
$\Delta\sigma$, [МПа]	-5,11	0,06	-5,09
	Ch6-MPa		
σ_{min}, [МПа]	0,00	-0,45	-0,71
σ_{max}, [МПа]	1,43	0,30	0,58
$\Delta\sigma$, [МПа]	-1,43	0,75	-1,28

Сейсмический мониторинг

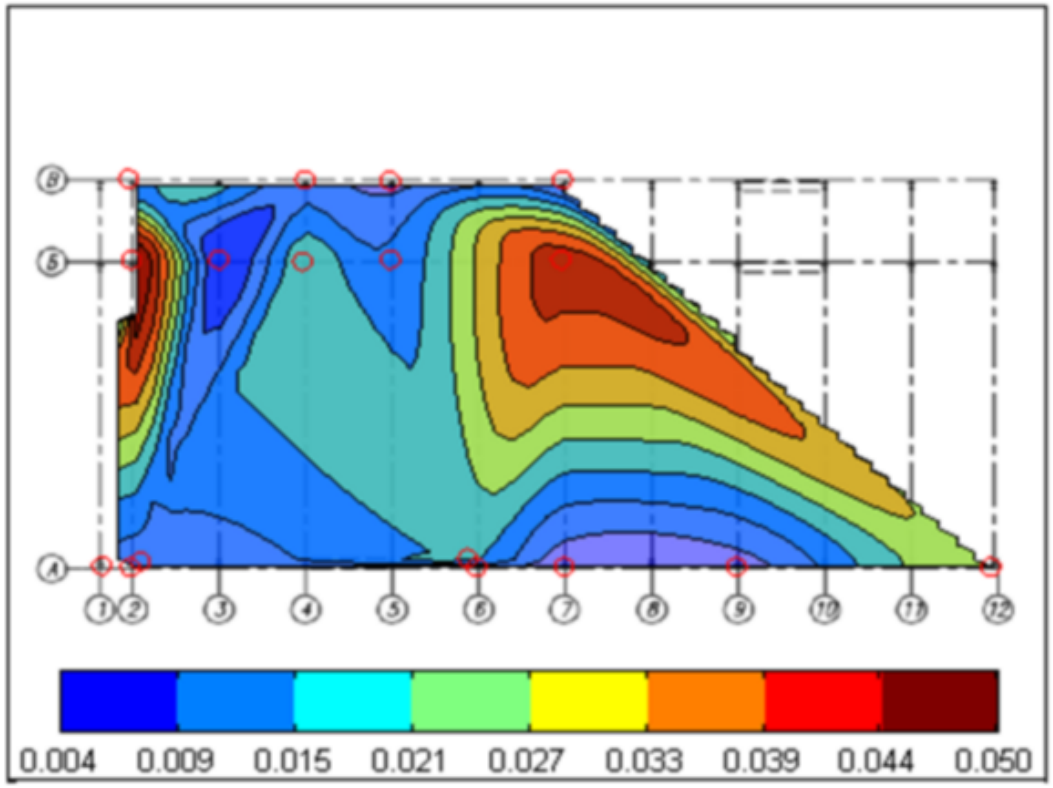
Система раннего предупреждения Игналинской АЭС



Оборудование для сейсмического мониторинга – СД4 (ОАО «НИИФИ»)

Карта амплитуд виброускорений МЗ БалАЭС на частоте 25 Гц

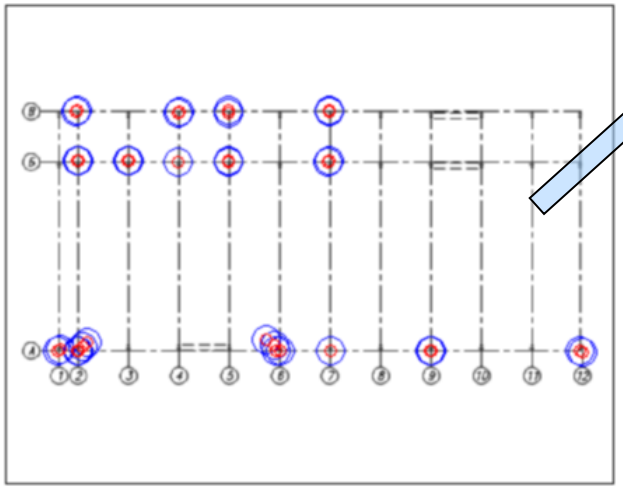
Карта амплитуд виброускорений по оси X на частоте 25[Гц]



Point name	Accel [m/s^2]
col-1A-0.000-Ch2	0.0036
col-2A-0.000-Ch3	0.0114
col-2B-0.000-Ch2	0.0503
col-2V-0.000-Ch2	0.0087
col-3B-0.000-Ch3	0.0051
col-4B-0.000-Ch2	0.0223
col-4V-0.000-Ch2	0.0113
col-5B-0.000-Ch2	0.0151
col-5V-0.000-Ch2	0.0065
col-6A-0.000-Ch3	0.0113
col-7A-0.000-Ch3	0.0059
col-7B-0.000-Ch2-rev	0.0417
col-7V-0.000-Ch2-rev	0.0050
col-9A-0.000-Ch3	0.0067
col-12A-0.000-Ch3	0.0270
near-col-2A-0.000-Ch3	0.0125
near-col-6A-0.000-Ch3	0.0201

Карты расположения источников гармонических колебаний МЗ БалАЭС

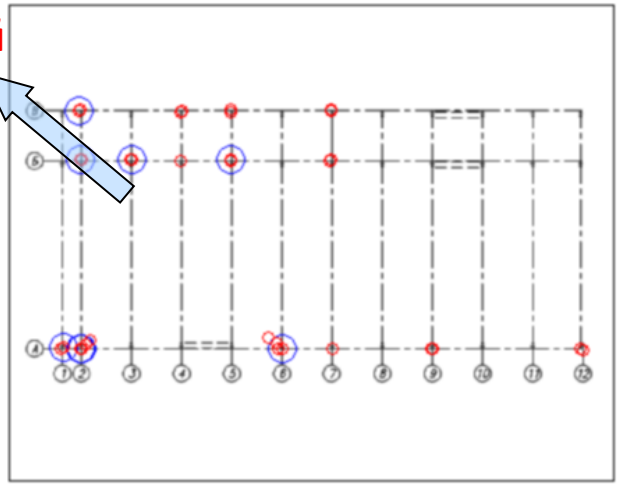
Топология источников вибрации с частотой 1500[Об/мин]



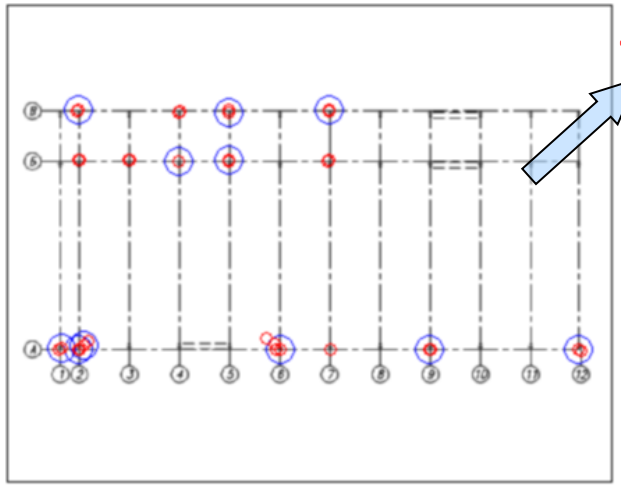
Глобальный источник - турбоагрегат!

Топология источников вибрации с частотой 600[Об/мин

Локальный источник



Топология источников вибрации с частотой 1800[Об/мин]

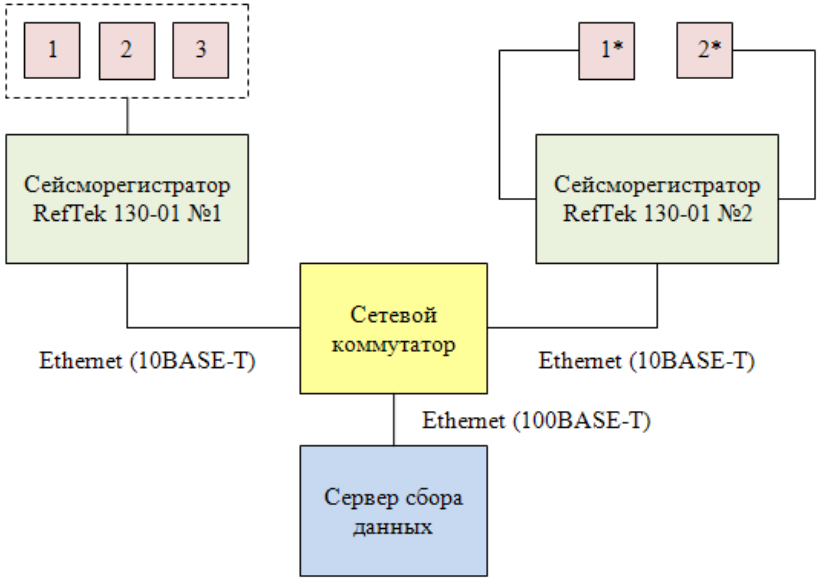


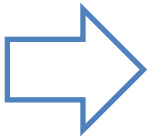
Локальный источник

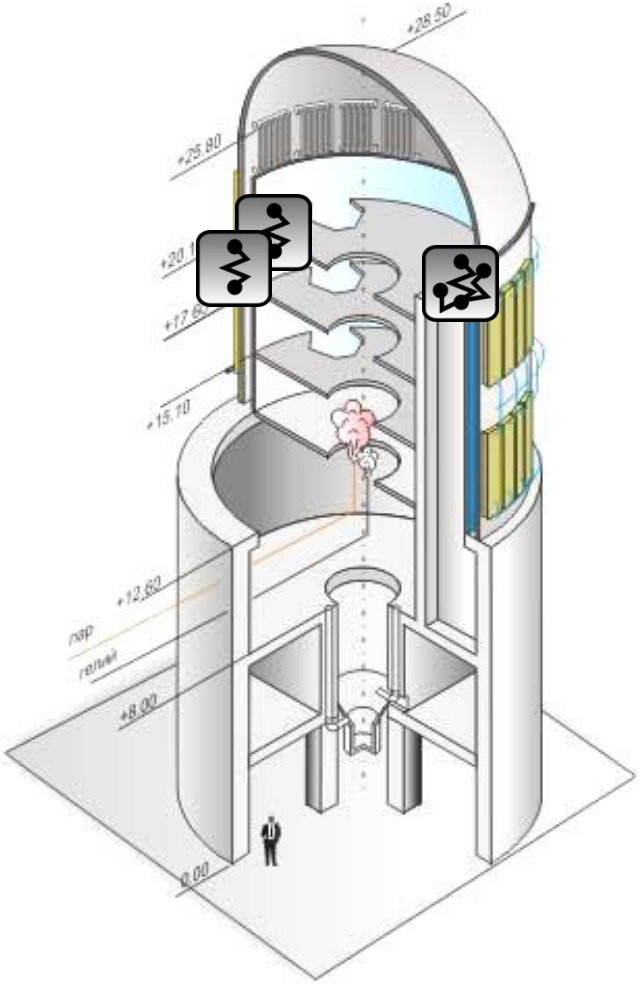
Мониторинг виброускорений ЗО НВАЭС

3-компонентный акселерометр

1-компонентные акселерометры



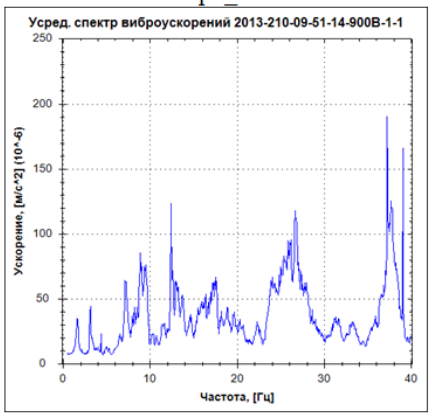




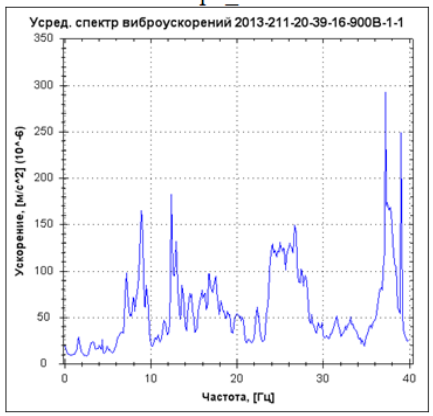
Анализ виброускорений ЗО НВАЭС по РБ-045-08 при движении полярного крана

Спектры

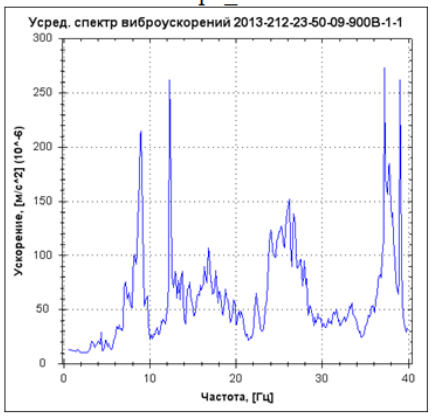
Exp5_1*



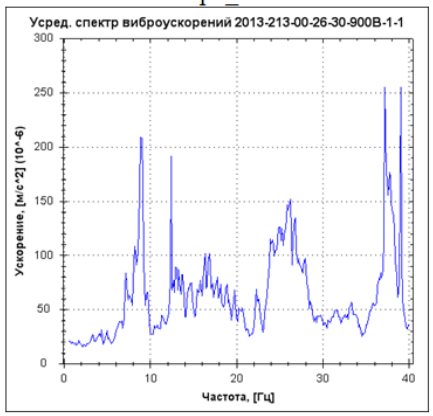
Exp6_1*



Exp7_1*

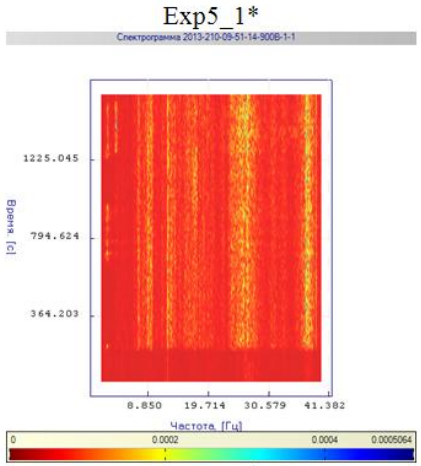


Exp8_1*

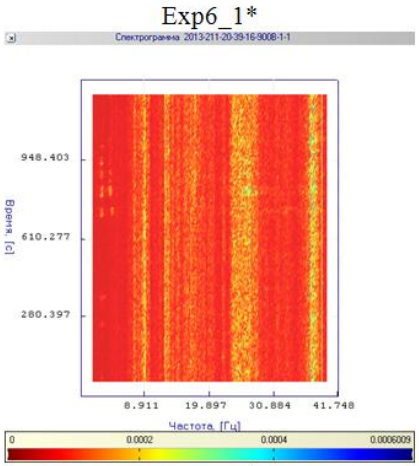


Спектрограммы

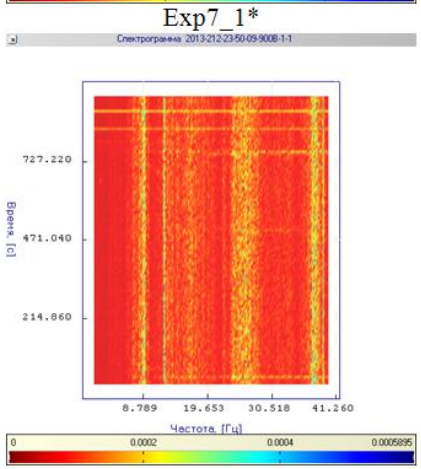
Exp5_1*



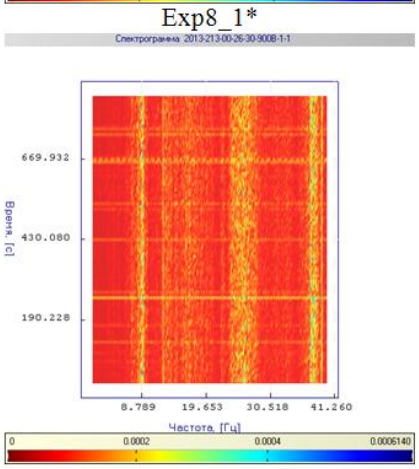
Exp6_1*



Exp7_1*



Exp8_1*

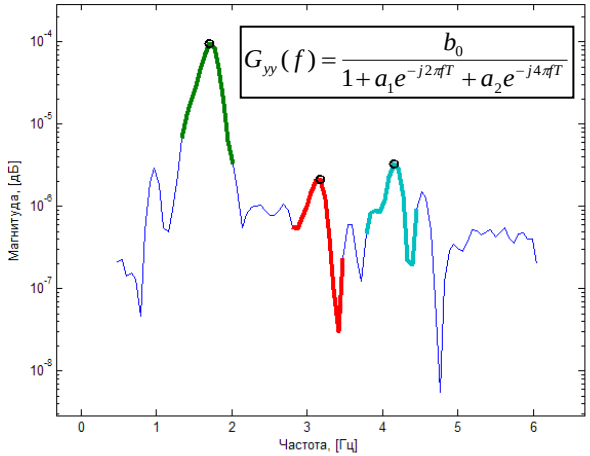


Определение частот колебаний точек консоли ЗО НВАЭС при работе полярного крана

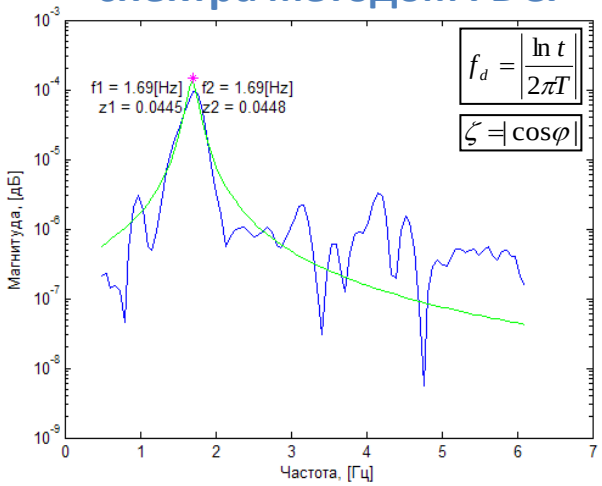
Частоты и коэффициенты демпфирования по ГОСТ Р 54859—2011

Exp5_3							
«min»							
Частота				Коэф. демпфирования, [%]			
$\bar{x}-\delta$, [Гц]	$\bar{x}$, [Гц]	$\bar{x}+\delta$, [Гц]	V	$\bar{x}-\delta$, [%]	$\bar{x}$, [%]	$\bar{x}-\delta$, [%]	V
1.62	1.66	1.69	2.71	2.81	4.22	5.63	46.70
3.14	3.24	3.34	4.32	1.78	2.98	4.18	56.37
4.35	4.39	4.43	1.13	1.35	1.98	2.61	44.61
«max»							
Частота				Коэф. демпфирования, [%]			
$\bar{x}-\delta$, [Гц]	$\bar{x}$, [Гц]	$\bar{x}+\delta$, [Гц]	V	$\bar{x}-\delta$, [%]	$\bar{x}$, [%]	$\bar{x}-\delta$, [%]	V
1.68	1.71	1.74	2.23	1.80	3.29	4.77	63.22
3.05	3.09	3.13	1.82	0.87	1.81	2.75	72.77
4.20	4.30	4.40	3.37	1.74	2.37	3.00	37.03

Выделение пиковых частот

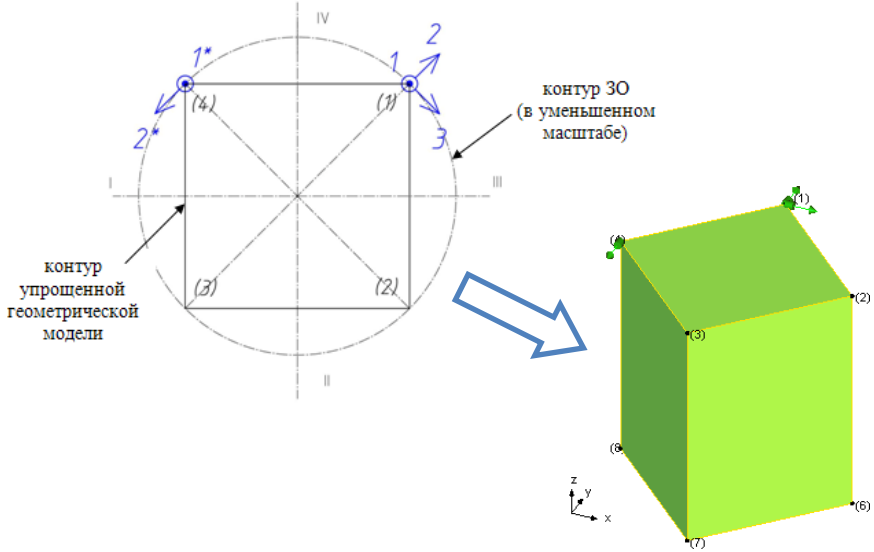


Аппроксимации участка спектра методом FDCF



Операционный модальный анализ ЗО НВАЭС

Упрощенная модель ЗО

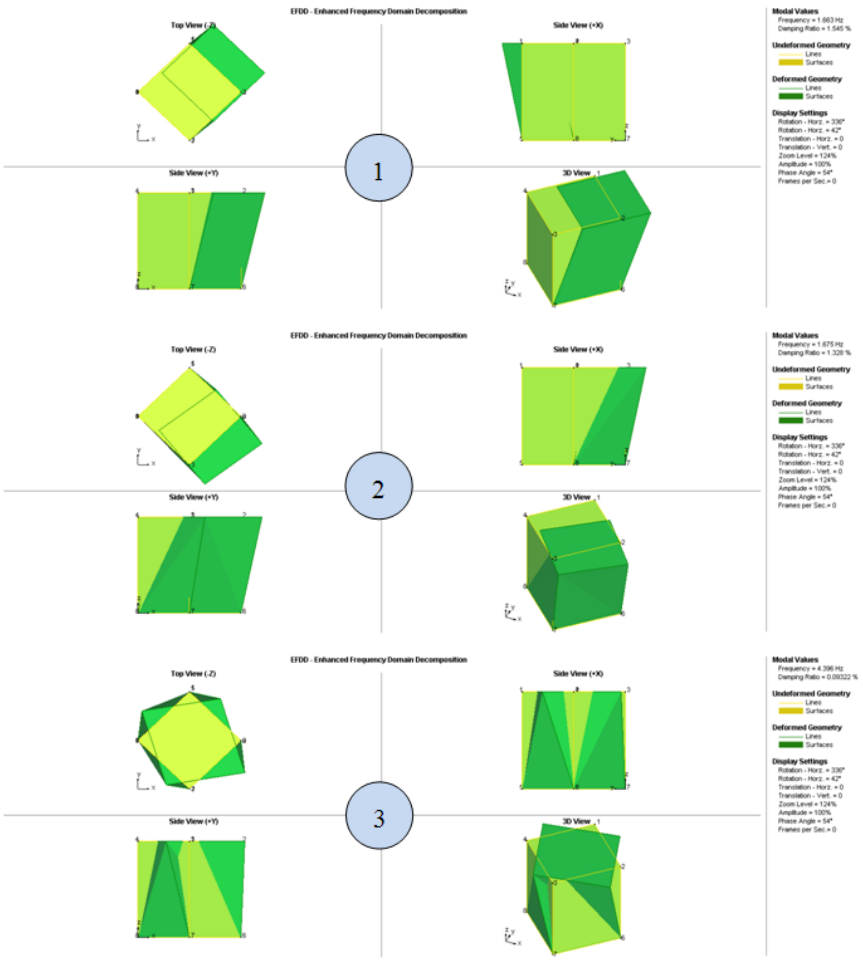


$$[G_{yy}(j\omega)] = [U(j\omega)][S(j\omega)][U(j\omega)]^T$$

$$x_{k+1} = A_d x_k + K e_k$$
$$y_k = C_d x_k + e_k$$

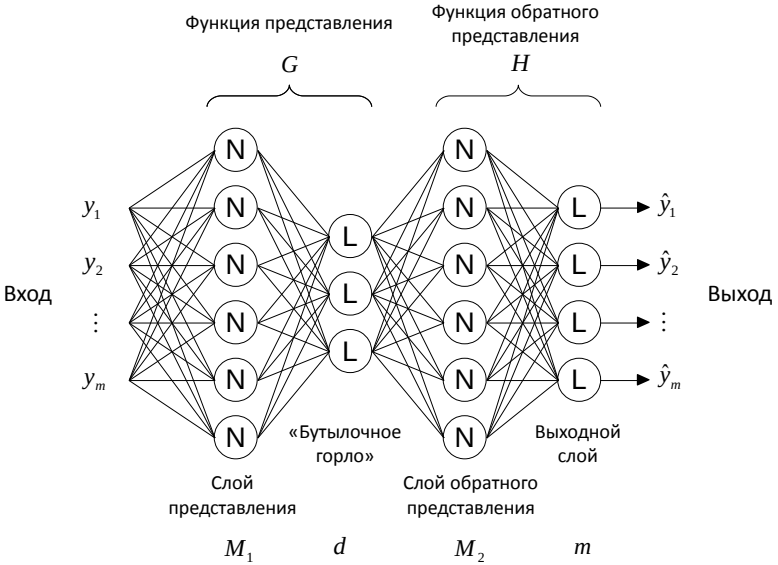
Mode	EFDD		SSI CVA	
	Frequency [Hz]	Damping Ratio [%]	Frequency [Hz]	Damping Ratio [%]
Mode 1	1.663	1.545	1.662	4.684
Mode 2	1.675	1.328	1.684	3.466
Mode 3	4.396	0.09322	4.394	0.611

Результаты модального анализа

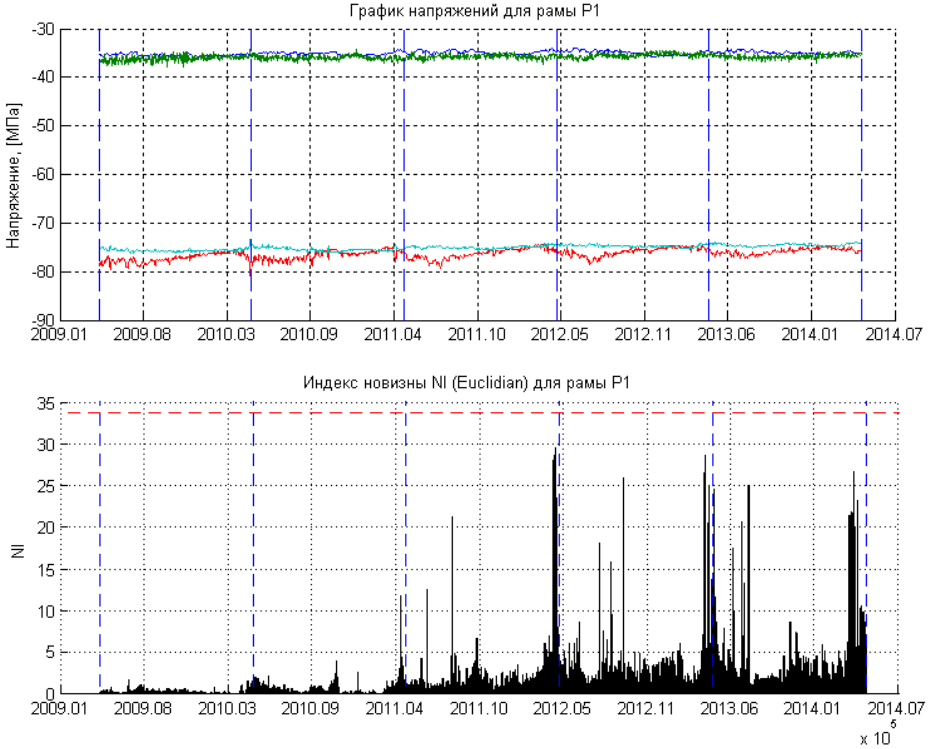


Оценка изменений во времени с использованием нейронных сетей

Автоассоциативная нейронная сеть



Измерения деформаций элементов металлической фермы



Оценка изменения – индекс новизны

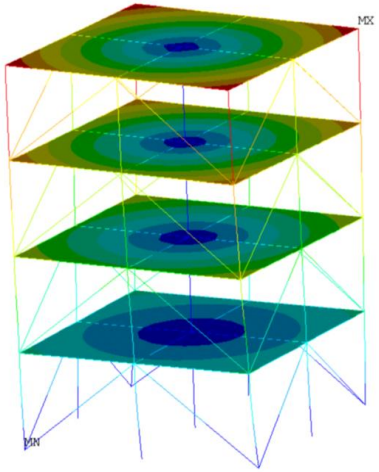
$$NI_E(y) = \left\| y - \hat{y} \right\|$$

Пример апробирования проектных решений и методик мониторинга на физической модели

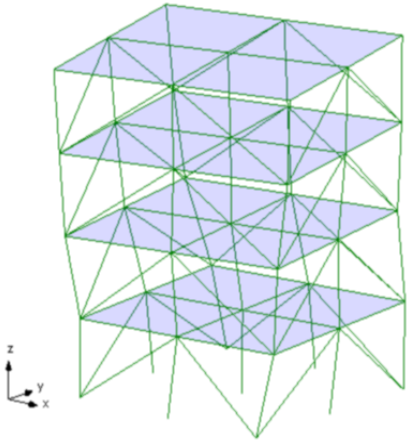
Этап 1

КЭ модель (ANSYS)

Этап 2



Экспериментальный модальный анализ (ARTeMIS Extractor)



Этап 3

Заключение

мониторинг позволяет следить за изменением состояния строительных конструкций и факторов, влияющих на это состояние, и т.о. образом обеспечивать безопасную эксплуатацию ОИАЭ