

**Инновационная система полной сейсмоизоляции
гражданских сооружений и зданий АЭС,
возводимых в районах умеренной и высокой
сейсмичности до 10 баллов по шкале MSK-64
(PGA = 0.3 – 1.0g)**

**Костарев В.В.
«ЦКТИ-Вибросейсм»
Санкт-Петербург, Россия**

Актуальные вопросы и задачи сейсмоизоляции

- Получение оптимальных параметров высокоэффективной 3D сейсмоизоляции.
- Решение проблемы изоляции вертикальной компоненты сейсмического воздействия, игнорируемую в обычных проектах.
- Поиск сейсмоизолирующих устройств, отвечающих поставленным критериям оптимальной 3D изоляции.
- Что предлагает рынок и производители изоляционных устройств и как далеко это от того, что реально необходимо?
- Разработка процедур испытаний и подтверждения реальных характеристик натуральных устройств 3D сейсмоизоляции при полных статической и динамической проектной и запроектной нагрузках.
- Как преодолеть ограничения существующих самых мощных в мире испытательных стендов для полномасштабных испытаний 3D сейсмоизолирующих устройств (G-Defence 1500 t. shaking table, SRMD and Eucentre TREES Lab).

9-ти балльное землетрясение на самой мощной в мире АЭС BWR Kashiwazaki-Kariwa, Блоки 1-7

Niigataken - Chuetsu - Oki Earthquake at Kashiwazaki-Kariwa NPP Site,
July 16, 2007, 10:13 AM (980gals= 1.0g)

Foundation of Reactor Building	Unit 1 Out- age	Unit 2 Start- up	Unit 3 100%	Unit 4 100%	Unit 5 Out- age	Unit 6 Out- age	Unit 7 100%
Design Basis Seismic Motion S2, gals	273	167	193	194	254	263	263
Observed values, gals (Factor to Design)	680 (2.5)	606 (3.6)	384 (2.0)	492 (2.5)	442 (1.74)	322 (1.22)	356 (1.35)

Некоторые последствия и выводы по сейсмическому событию на АЭС Кашивазаки

1. Ущерб от события на К-К АЭС составил более 15 млрд. долларов (до Фукушимы).
2. Около 10 000 человек участвовало в сейсмических обходах, анализах и восстановлении К-К АЭС.
3. Пересмотрены проектные основы для возможного сейсмического воздействия на Японских АЭС, которые составляют в настоящее время PGA 1.0 – 2.0g.
4. Во всем мире пересматриваются проектные сейсмические основы с сторону их увеличения, в том числе для сейсмической переквалификации существующих станций.
5. Для самой мощной в Европе – Запорожской АЭС уровень пиковых ускорений на фундаментах 1 и 2 блоков после проведения процедур PSHA и SSI в соответствии с требованиями и рекомендациями МАГАТЭ вырос с 0.07 до 0.19g.
6. Для зарубежных площадок с блоками ВВЭР по Российским проектам уровень пиковых ускорений грунта для МРЗ (Бушер, Аккую, Иордания) составляет до 0.5g. С учетом требований по рассмотрению запроектных (BDB) воздействий этот уровень может вырасти до:
$$0.5g \times 1.68/1.4 = 0.84/0.7g$$

Одним из кардинальных выходов из создавшегося положения является создание системы полной сейсмической изоляции сооружений АЭС, связанных с безопасностью

Зачем нужна система сейсмоизоляции (СИС) для АЭС?

Главные аргументы «ЗА»:

1. Безопасность:

СИС обеспечивает общую сейсмическую безопасность сооружений АЭС и защиту от других внешних экстремальных воздействий.

2. Новые сейсмические требования:

Постоянное и существенное увеличение сейсмических требований к площадкам АЭС в пределах 0.4g – 1.5g с учетом запроектных требований.

3. Стоимость:

Постоянное увеличение стоимости сейсмического проектирования, стоимости зданий и сооружений и оборудования в сейсмостойком исполнении.

Преимущества и ограничения использования СИС

Преимущества

- СИС обеспечивает большую безопасность АЭС при внешних воздействиях.
- Значительно меньшие ускорения (воздействия) на здания, сооружения, системы, оборудование и трубопроводы.
- Возможность снижения масс зданий, сооружений, систем, оборудования и трубопроводов, в том числе за счет сокращения количества антисейсмических опор.
- Возможность упрощения расчетных моделей зданий и сооружений и использования общестроительных методов проектирования.
- Возможность корректировки и поддержания вертикального положения зданий и сооружений.
- Уменьшение неопределенности в вероятностном анализе безопасности: одна ключевая система отвечает за сейсмическую безопасность.
- Уменьшение давления со стороны надзорных органов, общественности и средств массовой информации по вопросам сейсмостойкого проектирования АЭС.
- Уменьшение общей стоимости строительства АЭС.

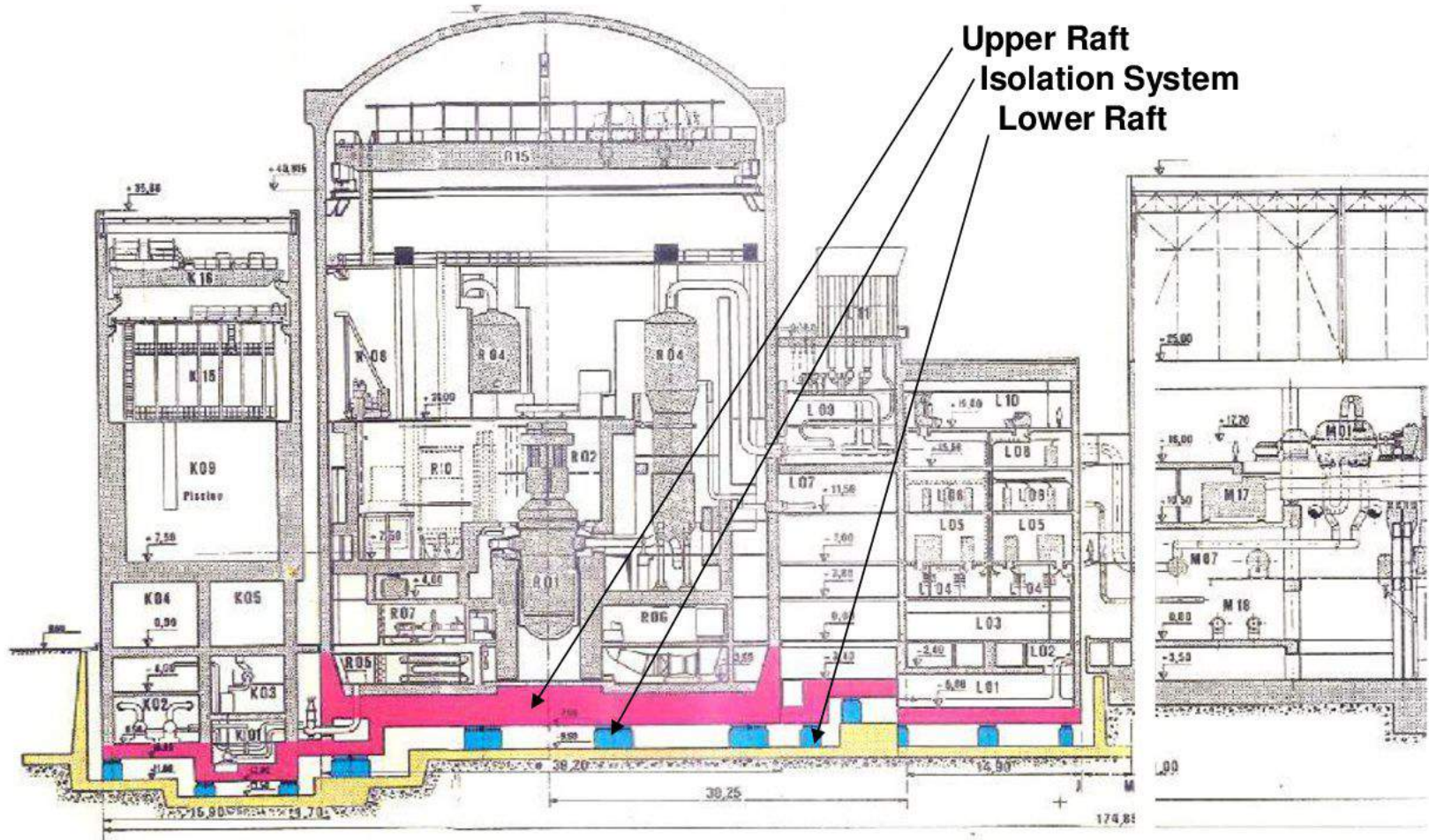
Преимущества и ограничения использования СИС

Ограничения и сложности применения СИС

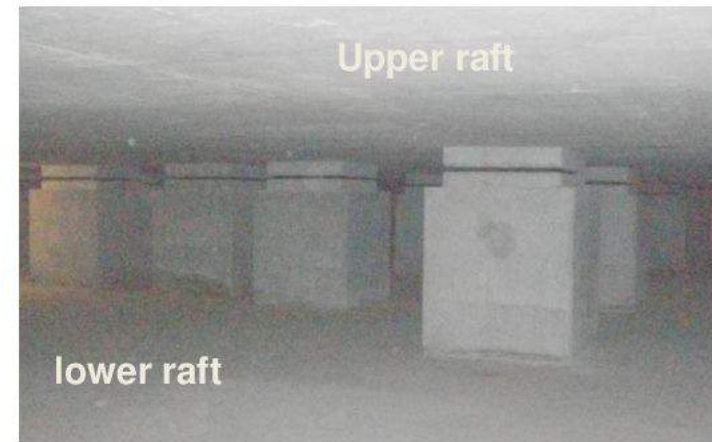
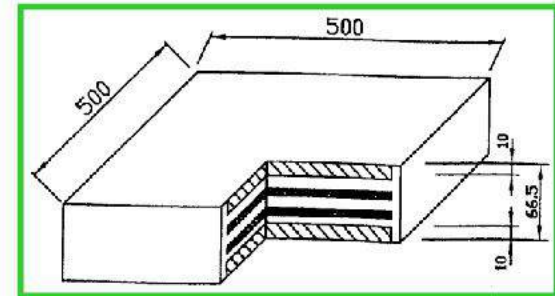
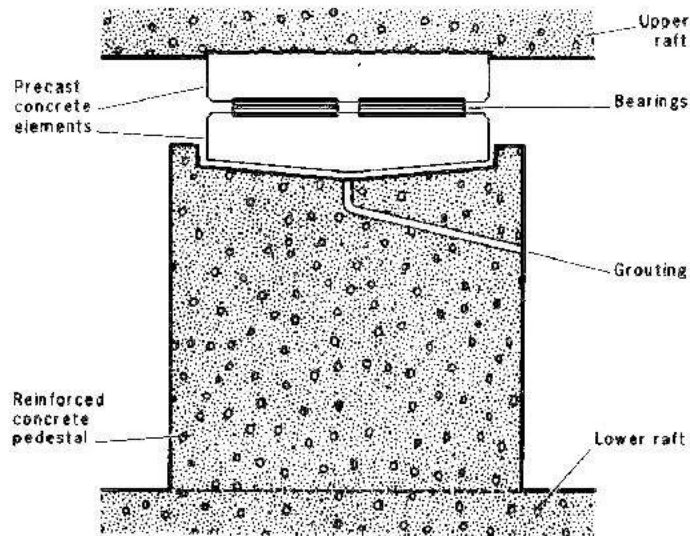
- Необходимость использования разрезного фундамента.
- Увеличенные относительные смещения верхней изолированной структуры относительно основного нижнего фундамента, требующие компенсационных решений для распределительных систем (проблема «пуповины»).
- Повышенные требования к надежности и безопасности одной ключевой системы, обеспечивающей устойчивость и сейсмостойкость АЭС.
- Необходимость формулирования специальных требований по безопасности, комбинациям нагрузок и условий эксплуатации, в том числе при запроектных событиях и авариях.
- Более сложная и дорогая конструкция разрезного фундамента с верхней и нижней частями.

Применение СИС для АЭС и ядерных установок

АЭС Круаз, Франция, 4 блока по 900 МВт, 30 лет успешной эксплуатации

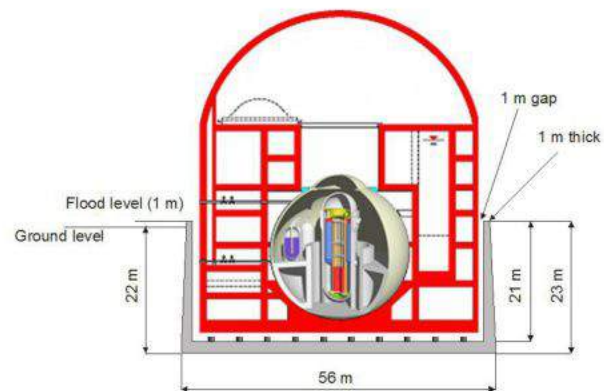


Сейсмоизолирующие опоры АЭС Круаз, Франция

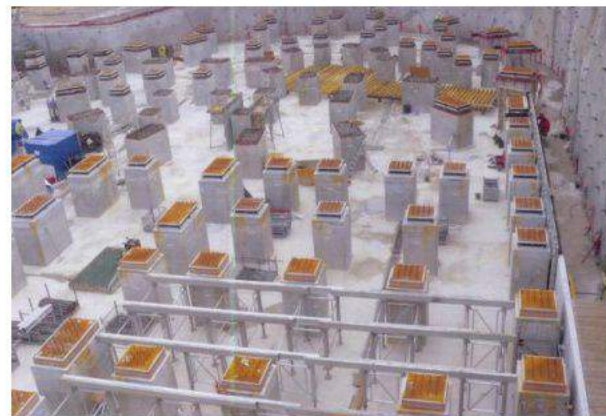
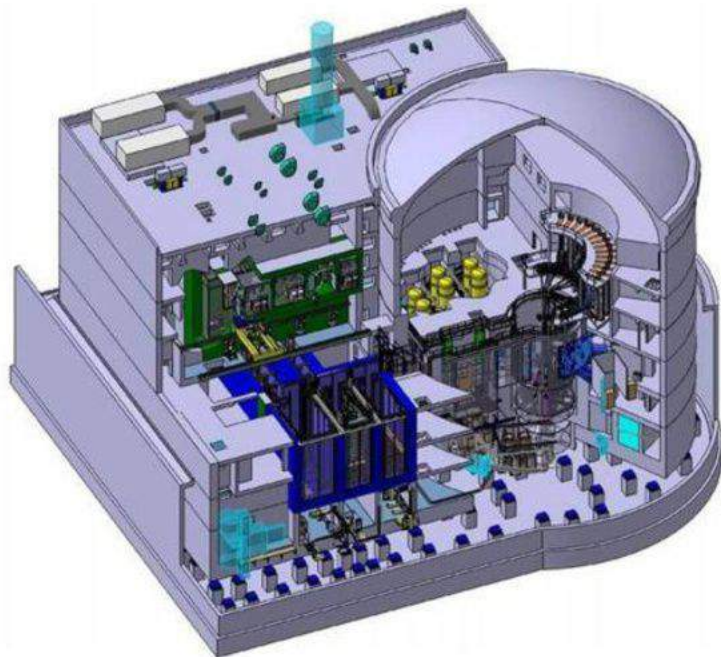


Примеры применения СИС для АЭС и АУ

The four PWR units of Cruas, France with seismic isolation



The IRIS Reactor (Innovative and Secure) with a seismic isolation system made of 99 HDRBs

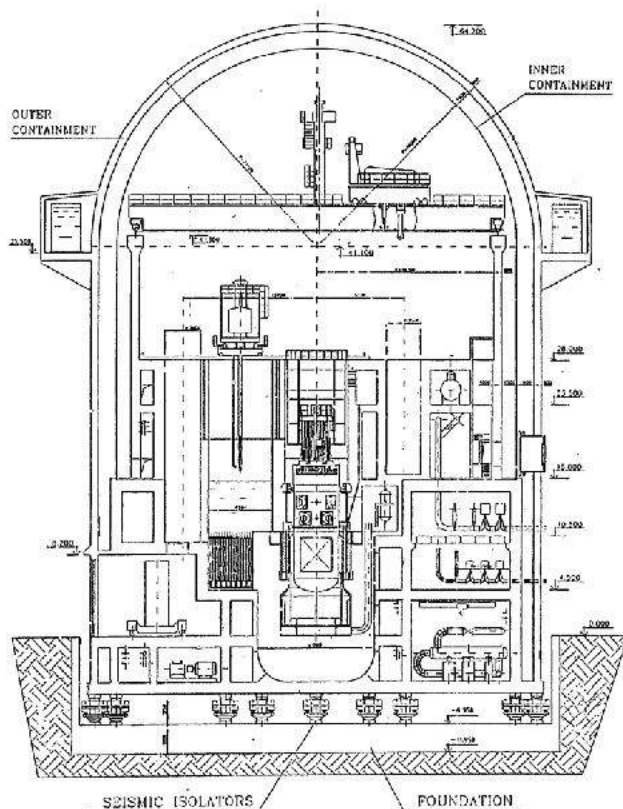


The Jules Horowitz Reactor and view of the isolation system during installation at the Cadarache centre (France)

Российский опыт создания системы СИС

Проект ВВЭР НР640 с 3D СИС для Кольской АЭС

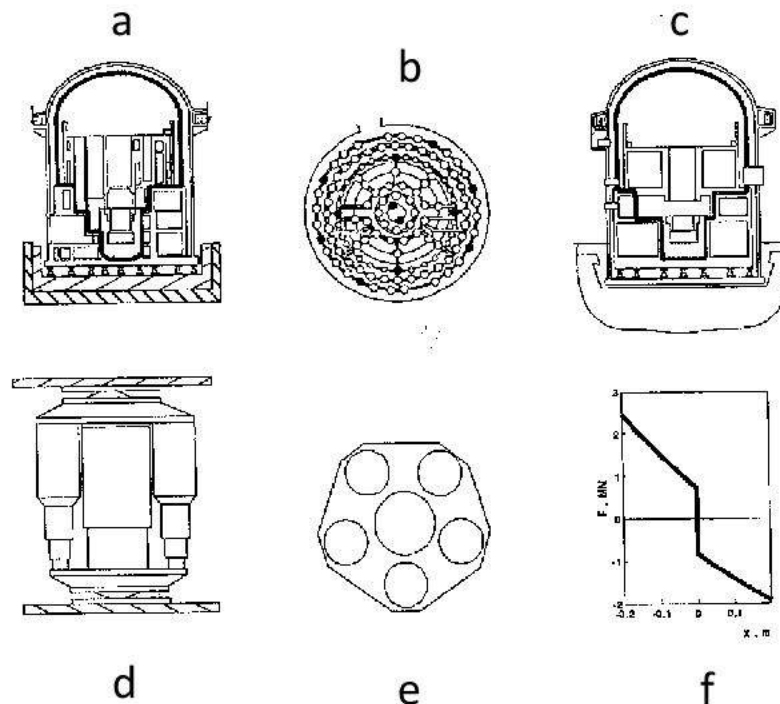
Качающиеся изоляторы с воздушными пружинами и 3D высоковязкими демпферами типа ВД по ТУ (СПб АЭП, В.Беляев, М.Рубинштейн и др.)



Общий вид

Fig. 1. Seismic isolated building of NPP VVR 640

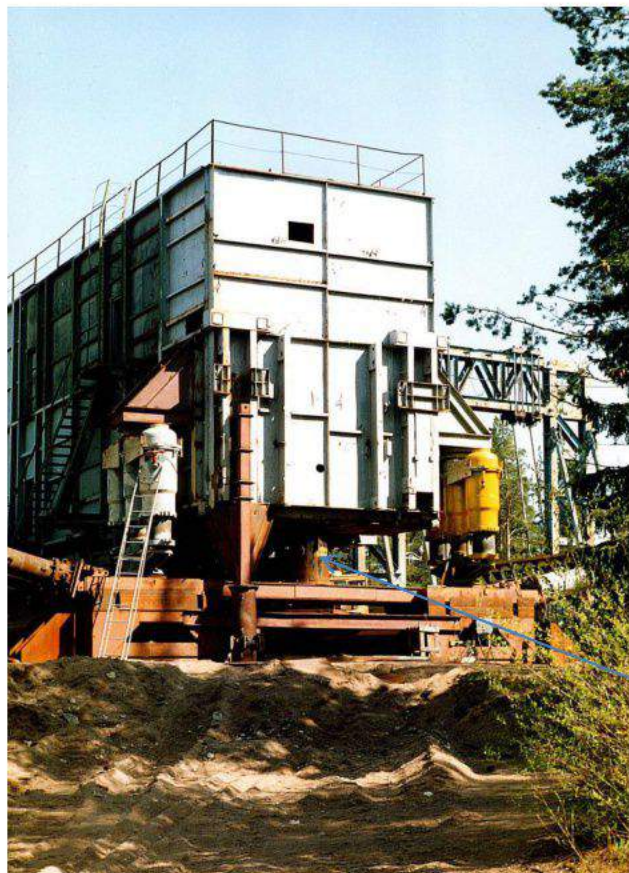
Собственные частоты СИС
 $F_h=0.2\text{Hz}$, $F_v=0.3\text{ Hz}$



- a. Общий вид
- b. Расположение изоляторов и демпферов ВД на разделенном фундаменте
- c. Система частичной СИС
- d. Изолятор с фаской для «мертвой зоны»
- e. Разрез блока изолятора
- f. Зависимость «Сила-перемещение» для изолятора

Российский опыт создания системы СИС Проект ВВЭР НП640 с 3D СИС для Кольской АЭС

Натурные испытания СИС с демпферами ВД на сейсмозрывном полигоне. Привод
стенда за счет пороховых двигателей



Общий вид Испытательного стенда с
1000 тонной моделью



Изоляторы СИС
и
Пороховые двигатели
Стенда СИС



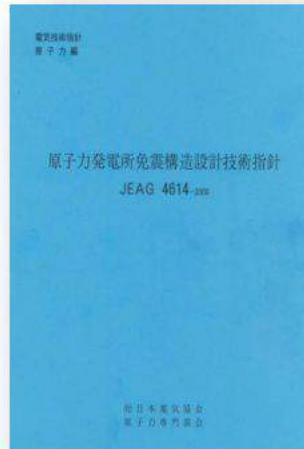
Демпфер ВД850

1. Демпферами ВД достигается более 20% критического демпфирования.
2. Демпферы играют также роль мягких упоров СИС.

Стандарты СИС для АЭС

JNES, JEAG, US NRC, IAEA Safety Report

Regulators



Industry

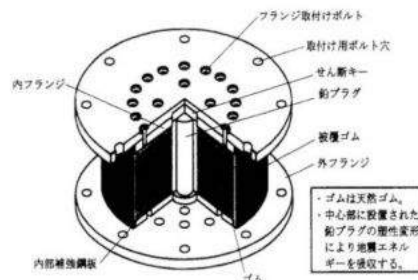


図 2.1-2 鉛入り積層ゴムの例

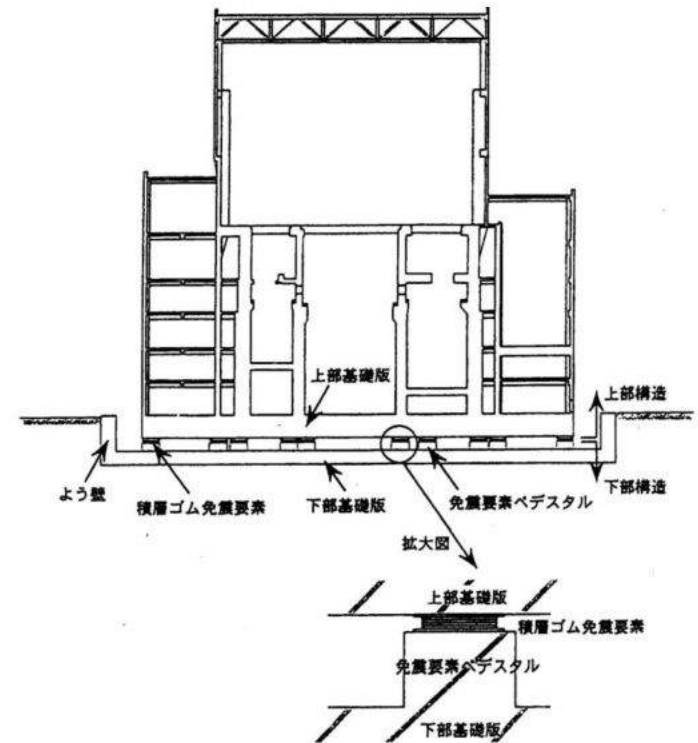


図 2.1-4 建物・構築物の名称

Новый подход к проектированию СИС для Реакторного Отделения (РО) АЭС с использованием целевой функции

Обычный подход

В проекте АЭС с СИС РО используются известные либо новые изобретенные изоляторы, имеющие определенные и неизменные характеристики жесткости и демпфирования.

Динамический анализ проводится на обобщенные (не специфические для площадки) спектры и показывает положительные и отрицательные свойства данной СИС. Анализ проводится только на горизонтальное воздействие. Вертикальное воздействие, как правило, не рассматривается вкуче с другими особым динамическими воздействиями (ураган, падение самолета, взрыв и т.д.)

Новый подход

Формулирование требуемых параметров СИС посредством целевой функции:

Целью является разработка эффективной многокомпонентной 3D СИС с приемлемыми относительными компенсационными смещениями разрезного фундамента для всех видов внешних воздействий помимо сеймики .

Путь к достижению цели:

Проект СИС основывается на оптимизационном процессе, учитывающим особенности РО и его площадки, специфические данные по сейсмике площадки АЭС (UHS/TH, PSHA) и определении, таким образом, специфических динамических характеристик жесткости и демпфирования СИС для данного РО данной АЭС.

Примечание:

Любой блок АЭС является уникальными по своим характеристикам (включая много блоковые однотипные АЭС) и требует специально для него разработанной СИС.

Методы расчетов для учета нелинейных характеристик СИС для РО АЭС при больших перемещениях

1. Метод модального суммирования **Modal TNA (МТНА)** при расчетах на произвольное воздействие, заданное, например, акселерограммами сейсмических колебаний грунта.

$$M \times \ddot{Y} + C \times \dot{Y} + K \times Y = P(t)$$

Недостаток: пренебрежение недиагональными членами матрицы демпфирования и связанные с этим погрешности расчета.

2. Метод прямого интегрирования с матрицей демпфирования Релея (**Direct TNA**).

Недостаток: Невозможность задания различного уровня демпфирования для всего спектра собственных частот.

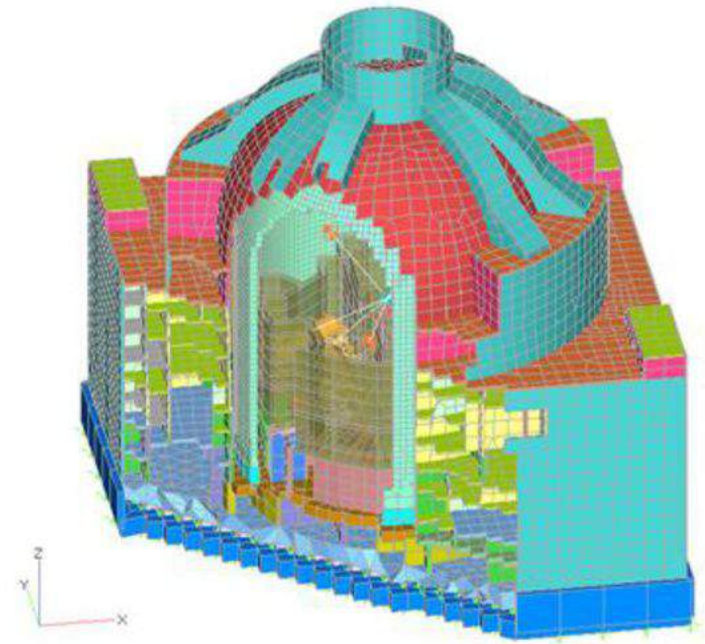
3. Метод быстрого нелинейного анализа (**Fast Nonlinear Analysis**)

$$M \times \ddot{u} + C \times \dot{u} + K \times u + R_{NL}(t) = R(t)$$

Наиболее приемлем для расчета СИС. Позволяет учитывать нелинейные свойства СИС и любых других элементов системы. Реализован в программах SAP2000, dPIPE и др.

Создание оптимизационной модели СИС для РО АЭС

Ввиду сложности и уникальности каждого блока АЭС и его РО, особенностей грунтовых условий и сейсмичности площадки, не существует какой-либо одной универсальной системы СИС годной, например, даже для всех однотипных блоков. Основные параметры СИС, такие как жесткости и демпфирование, определяющие собственные частоты и затухание системы, могут быть определены оптимизационным процессом для конкретных характеристик РО и специфического входного сейсмического воздействия.



Полная структурная КЭ модель блока ВВЭР-1200

Формулировка целевой функции для системы СИС

К модели РО прикладывается 3D ТН сейсмическое воздействие (три различные некоррелированные акселерограммы в трех ортогональных направлениях).

В качестве выходных параметров используются сейсмические ускорения и перемещения опор реактора и максимальные относительные смещения в наиболее нагруженных изоляторах и демпферах.

Комбинация двух критических параметров была принята как Целевая Функция СИС:

- Пиковые ускорения реакторных опор (A), и
- Максимальные смещения в изоляторах (D).

Таким образом, целевая функция была сформулирована следующим образом:

$$GF = \left(\frac{A}{Aw} \right)^2 + \left(\frac{D}{Dw} \right)^2$$

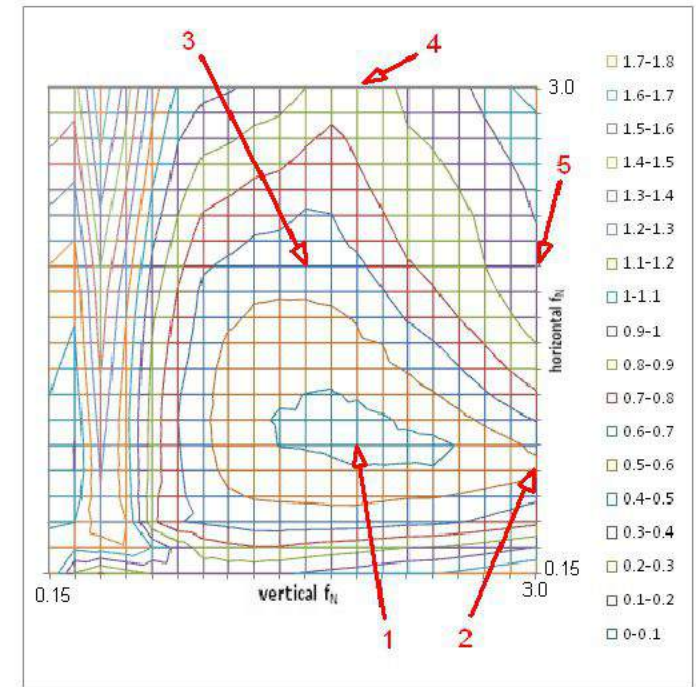
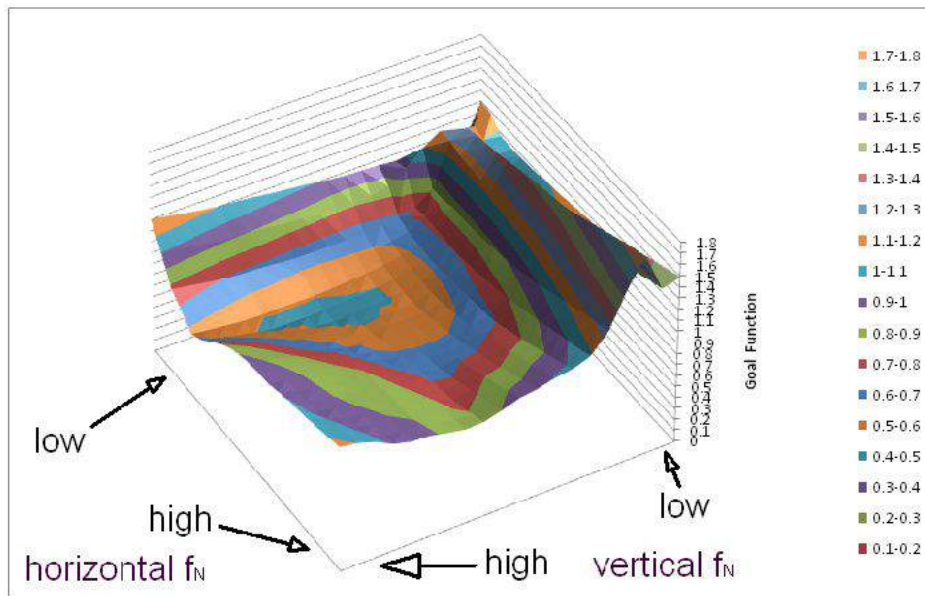
Aw и Dw в этой формуле являются весовыми коэффициентами, которые представляют собой нежелательные параметры ускорений и перемещений на выходе системы, а именно:

$Aw = 0.4g$ (нулевой эффект изоляции – ускорения не изменились),

$Dw = 100$ mm (максимальной допустимые относительные перемещения разрезного фундамента для самокомпенсации распределительных систем и трубопроводов).

Результаты оптимизационного анализа СИС РО для опор реактора

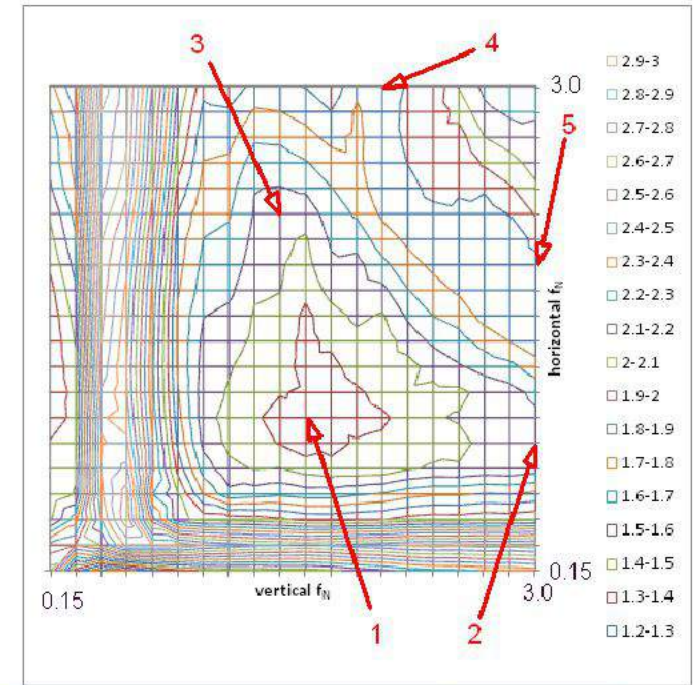
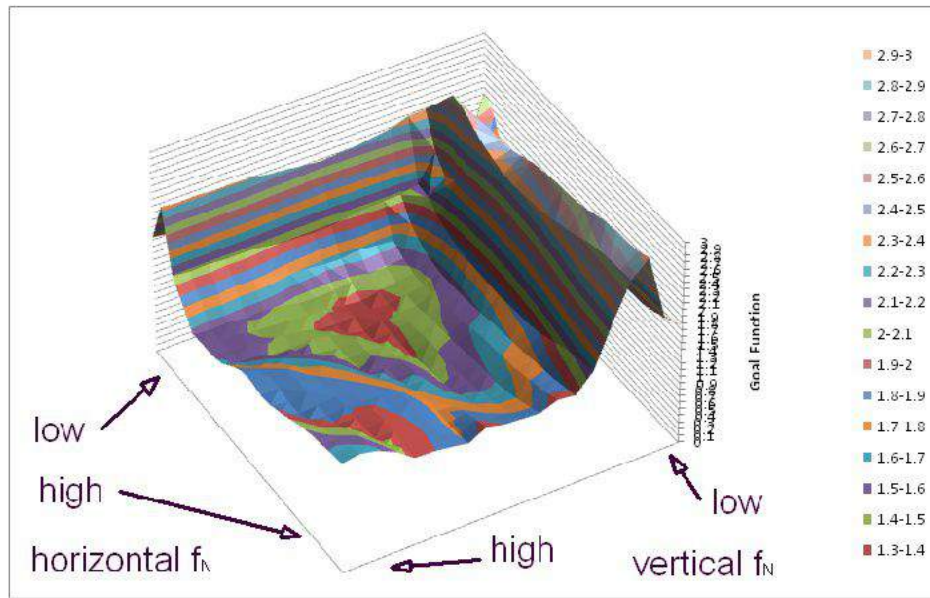
Поверхности целевой функции для 40% демпфирования



Point #	Nominal frequency, Hz		Displacement, mm			Acceleration, g			Goal function
	horizontal	vertical	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	0.90	1.95	24	22	23	0.13	0.12	0.15	0.49
2	0.75	3.00	28	27	10	0.11	0.10	0.21	0.59
3	1.95	1.65	8	7	36	0.19	0.17	0.13	0.65
4	3.00	1.95	5	4	32	0.23	0.22	0.15	0.88
5	1.95	3.00	12	12	20	0.22	0.23	0.21	0.98

Результаты оптимизационного анализа СИС РО для опор реактора

Поверхности целевой функции для 20% демпфирования

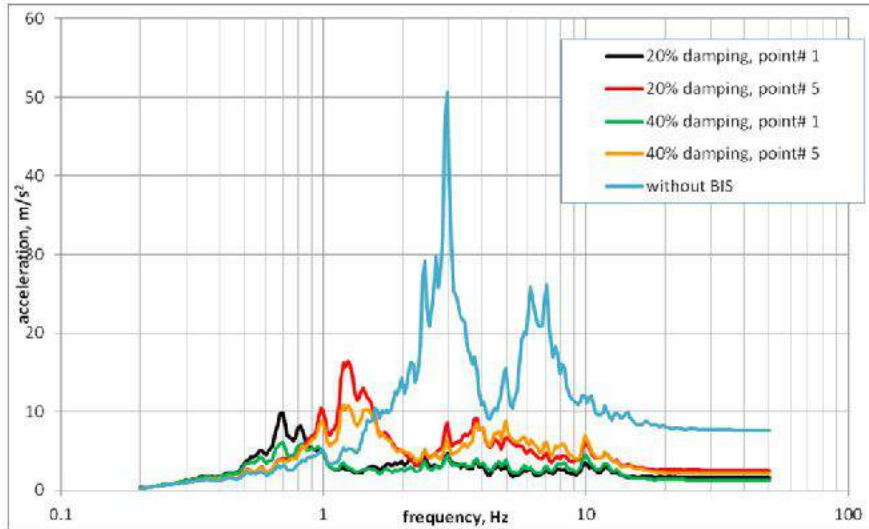


Point #	Nominal frequency, Hz		Displacement, mm			Acceleration, g			Goal function
	horizontal	vertical	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	1.05	1.65	30	25	47	0.16	0.14	0.14	0.80
2	0.90	3.00	39	39	15	0.15	0.14	0.26	1.00
3	2.25	1.50	8	8	55	0.20	0.21	0.14	0.97
4	3.00	2.10	6	5	41	0.28	0.25	0.20	1.31
5	1.95	3.00	16	14	28	0.26	0.24	0.26	1.31

Результаты оптимизационного анализа СИС РО

Спектры ISRS на опорах реактора

Горизонтальное направление



Точка # 1: $f_h \approx 1 \text{ Hz}$, $f_v \approx 2 \text{ Hz}$,

Точка # 5 : $f_h \approx 2 \text{ Hz}$, $f_v \approx 3 \text{ Hz}$.

Эффективность изоляции по горизонтальным ускорениям:

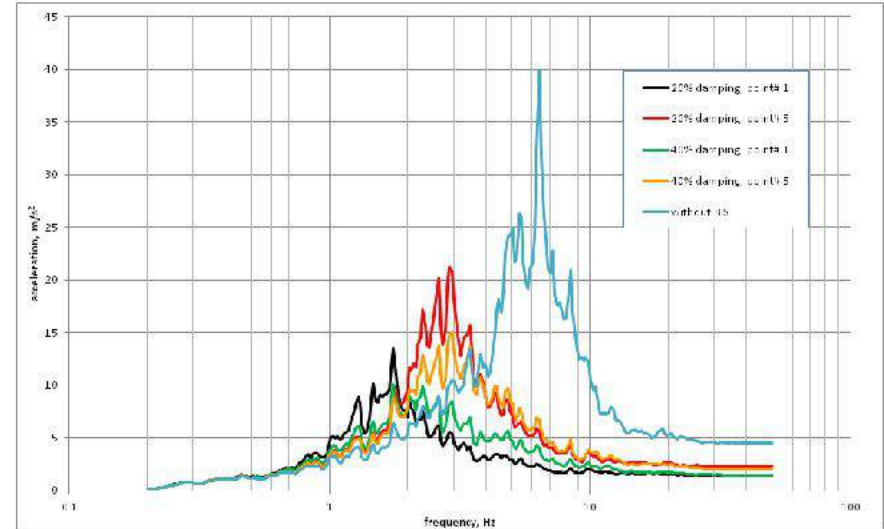
$$4.0 < A_n/A_i < 10.0$$

Максимальные горизонтальные смещения в угловых изоляторах:

$$12 \text{ mm} < D_h < 30 \text{ mm}$$

Демпфирование: 20-40%

Вертикальное направление



Точка # 1: $f_h \approx 1 \text{ Hz}$, $f_v \approx 2 \text{ Hz}$,

Точка # 5 : $f_h \approx 2 \text{ Hz}$, $f_v \approx 3 \text{ Hz}$.

Эффективность изоляции по вертикальным ускорениям:

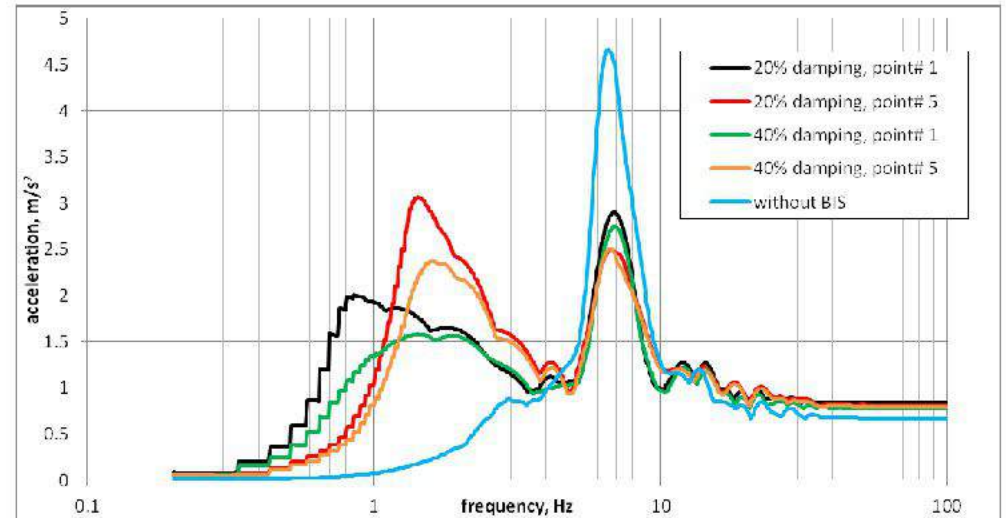
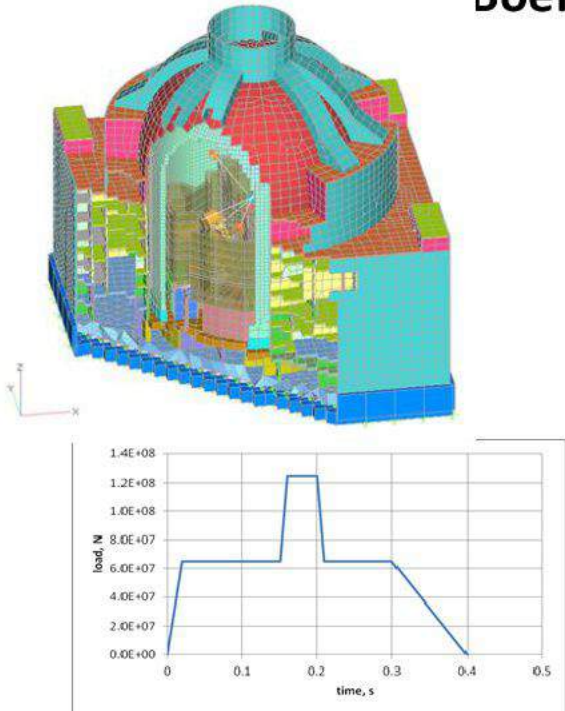
$$2.0 < A_n/A_i < 4.0$$

Максимальные вертикальные смещения в угловых изоляторах:

$$20 \text{ mm} < D_v < 47 \text{ mm}$$

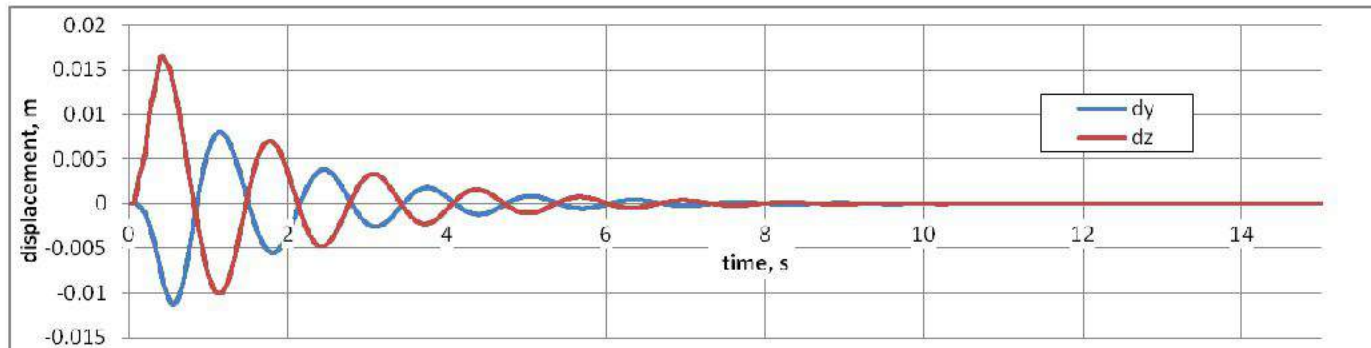
Демпфирование: 20-40%

Падение большого коммерческого самолета на РО с СИС. Boeing 747-400. M = 390 tons.



Спектр воздействия для опор реактора
Эффективность изоляции около $R_h = 1.5$

Нагрузочная функция по Риере



Перемещение РО при падении Boeing 747-400

Реакция РО с СИС на сильный ветер

Ветровая (ураганная) нагрузка

Расчеты проводились в соответствии с требованиями NUREG-0800 и ASCE/SEI 7-05.

Параметры ураганного ветра:

- Проектная скорость ветра 58 m/s (130 mi/h).
- Проектное ветровое давление на высоте 40 метров - 2100 N/m² (51.7 lb/ft²).

Анализ показал, что даже при таких экстремальных условиях перемещение (качание) РО на СИС не превышает 1.0 мм., что не влияет на безопасность РО и окружающих конструкций.

Выводы по оптимизационному анализу СИС

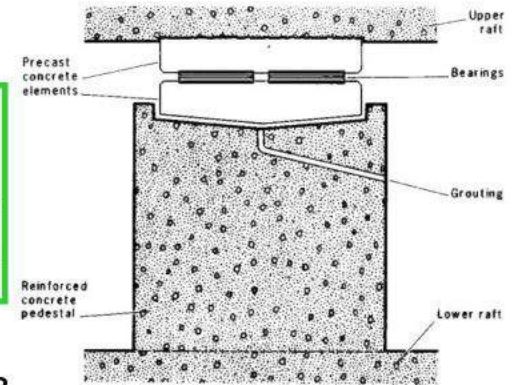
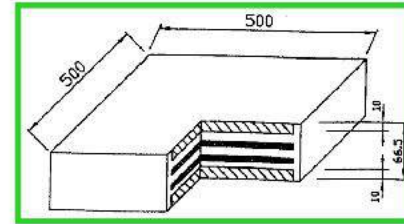
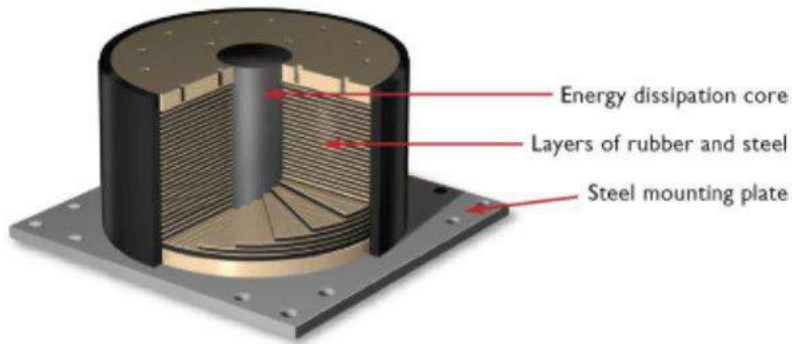
Для данной РО установки ВВЭР-1200 и его грунтовых условий , а также особенностей сейсмического воздействия на площадке АЭС с интенсивностью PGA 0.4g, наиболее предпочтительной представляется система СИС со следующими оптимальными характеристиками:

- Номинальная частота в горизонтальном направлении **$f_h = 0.7-0.9$ Hz;**
- Номинальная частота в вертикальном направлении **$f_v = 2.5-2.8$ Hz;**
- Демпфирование в системе должно быть не меньше 20% от критического.

В этом случае обеспечивается:

- Высокая изоляционная способность СИС в пределах
 $5.0 < R_h < 10.0$ и $2.0 < R_v < 4.0$;
- Приемлемые (суммарные x-y-z вектор) относительные перемещения в угловых изоляторах, не требующие серьезного перепроектирования распределительных систем
 $40 \text{ mm} < D < 60 \text{ mm}$.

Доступные на рынке элементы СИС



Опора АЭС Круаз,
Франция



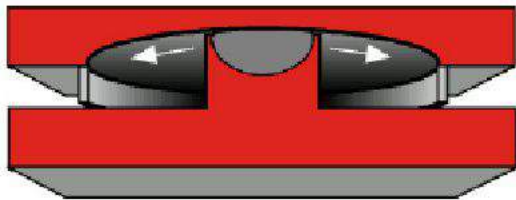
LRB Резино-металлическая опора
(Япония, Корея, Китай)



Опора с витыми
Пружинами
Россия-Германия



Многокомпонентный
Демпфер ВД по ТУ
Россия-Германия



Качающийся подшипник (FPS),
США

Основные требования, предъявляемые к элементам СИС (по материалам IAEA, JNES, US NRC)

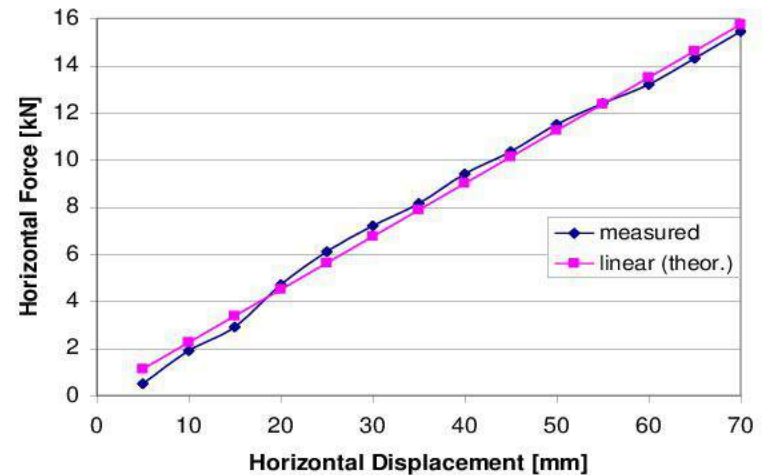
- СИС должна состоять только из пассивных (не активных) элементов, обеспечивающих необходимые собственные частоты изолируемой структуры в горизонтальном и вертикальном направлениях для достижения заданных параметров изоляции (+).
- Обладать высокой демпфирующей способностью, не менее 20%. (+).
- Долговременной стабильностью характеристик под воздействием всех возможных эксплуатационных факторов (температура, влажность, радиация, воздействие повреждающих элементов, пожар, затопление, экстремальный ветер, другие внешние воздействия, включая падение самолета, взрывы, противоправные действия и т.д.). (+)
- Надежность при всех сейсмических воздействиях от МРЗ до запроектных. (+)
- Возможностью быстрого и легкого обслуживания и замены устройств СИС. (+).
- Сохранение общей несущей способности СИС и фундаментов и исключение их чрезмерных прогибов при потере одного или нескольких изолирующих устройств. (+)
- Способностью компенсировать наклоны РО и просадки грунта. (+)
- Равномерно распределять усилия по разрезному фундаменту. (+)
- Иметь в наличии экспериментальные результаты по характеристикам натуральных образцов. (+)
- СИС должна иметь способность к быстрому пассивному восстановлению своего начального центрального положения и характеристик для противодействия возможным афтершокам (+)

По совокупности всех предъявляемых к СИС требованиям, им, в наилучшей степени, соответствуют пружинные опоры и демпферы ВД

Типичный изоляционный элемент ГЕРБ с витыми пружинами

Характеристики и преимущества

- Одинаковые статические и динамические характеристики;
- Большая податливость в горизонтальном и вертикальном направлениях, определяемые константами;
- Линейная зависимость «Сила-Перемещение»;
- Перемещения до 300 мм;
- Несущая нагрузка одной опоры, до 456-1140 тонн;
- Равномерное распределение нагрузки в разрезном фундаменте;
- Возможность центровки РО;
- Простое обслуживание и замена элементов,.



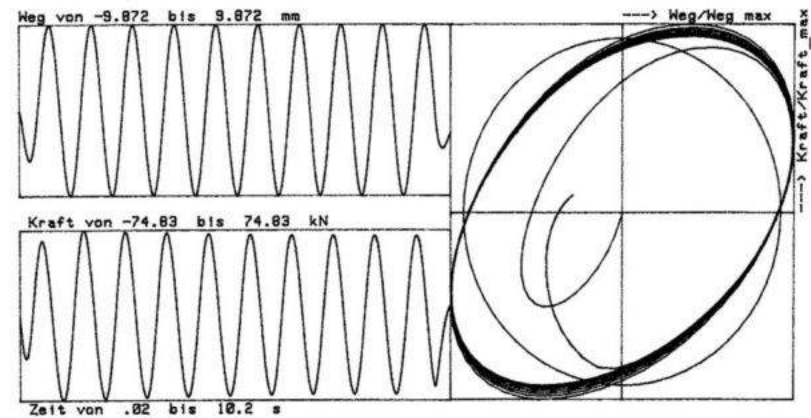
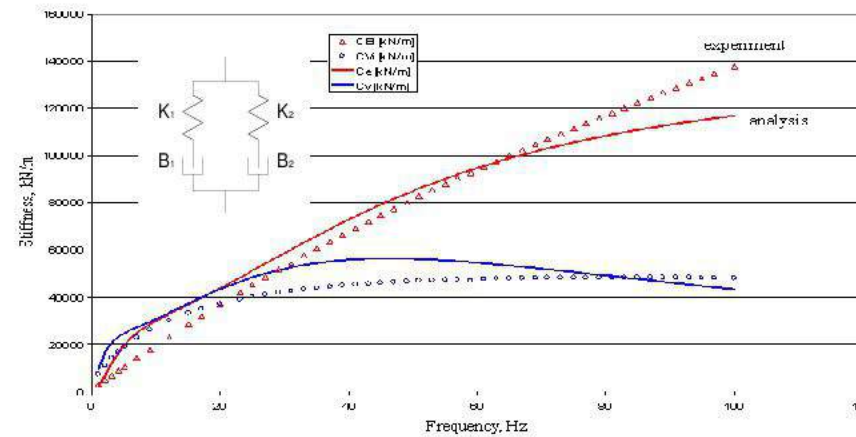
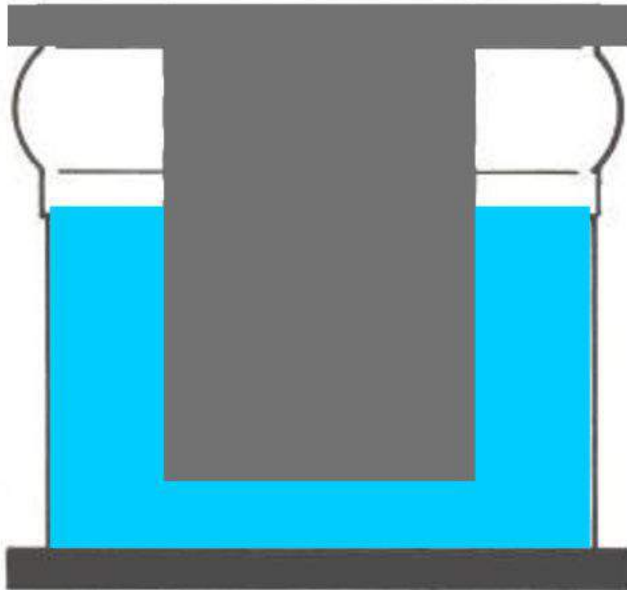
Натурные испытания пружины для СИС АЭС
особо большой грузоподъемности для запроектных условий



Многокомпонентный демпфер ВД

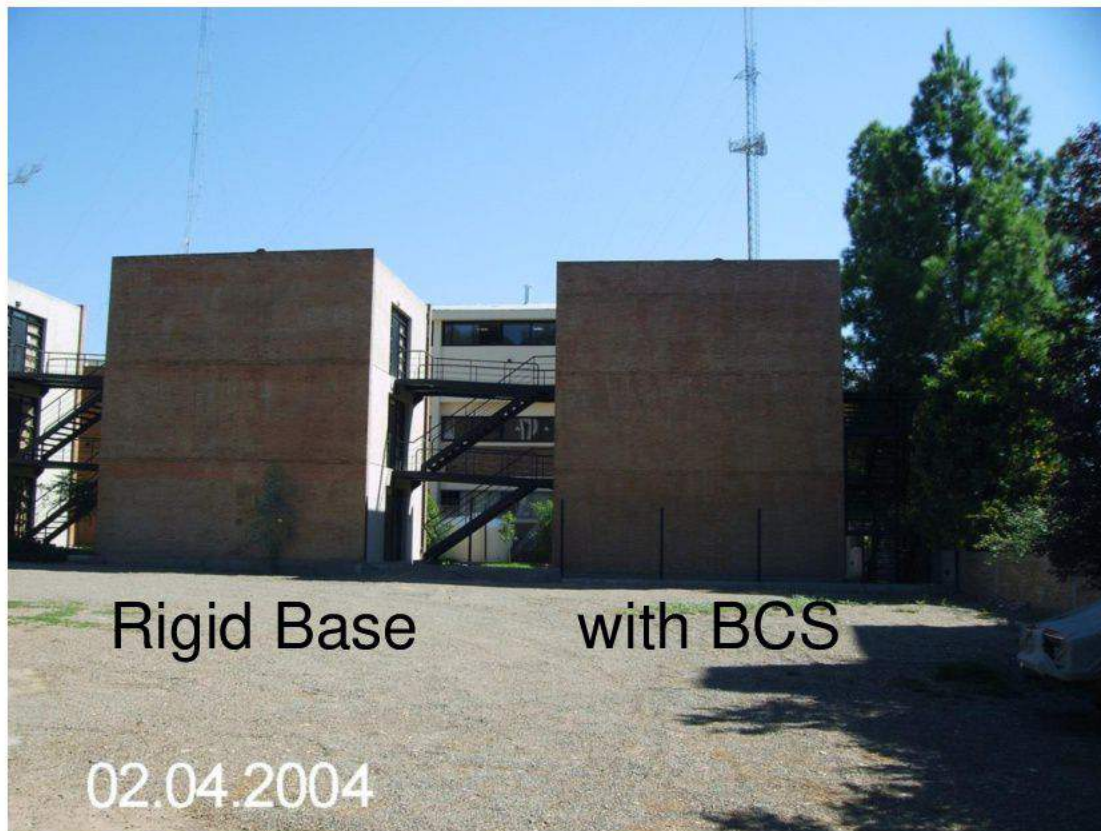
Характеристики демпфера ВД:

- Работа в 3-х степенях свободы в одном элементе;
- Высокая демпфирующая способность в диапазоне 0.0 to 50 Hz;
- Неограниченный срок службы без обслуживания.



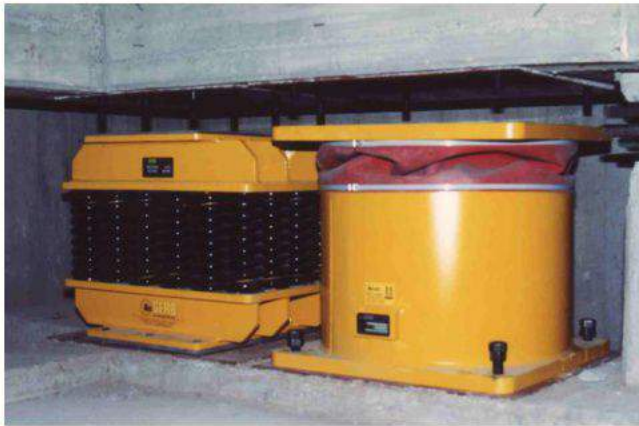
Уникальный опыт по сейсмоизоляции лабораторного здания кампуса, Университет Мендоза, Аргентина

Два абсолютно одинаковых близкорасположенных зданий, одно из которых сейсмоизолировано (BCS), а другое твердо оперто

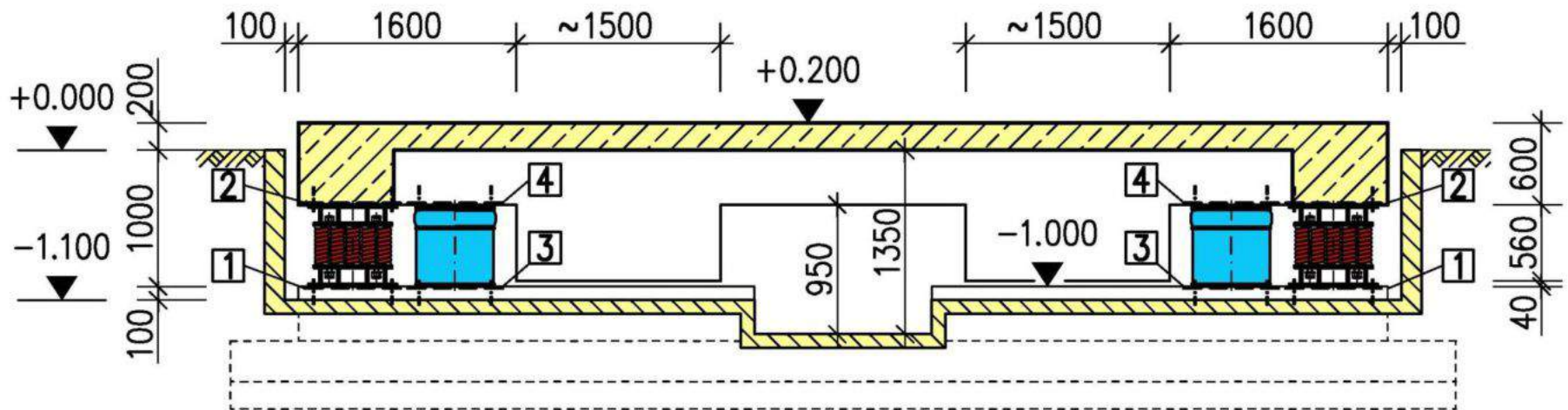


Уникальный опыт по сейсмоизоляции лабораторного здания кампуса, Университет Мендоза, Аргентина

Установка пружинных опор и демпферов на разрезном фундаменте

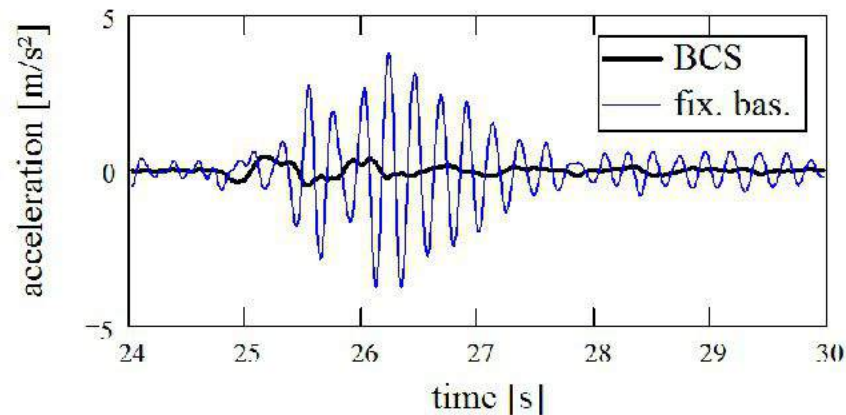
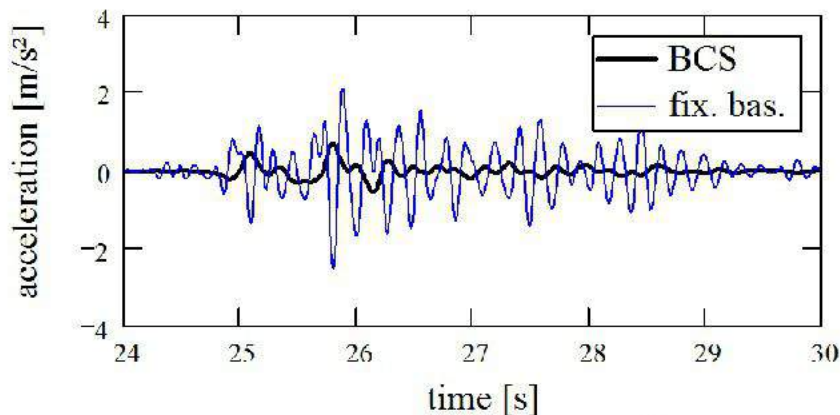


SECTION B-B (FINAL HEIGHT)



Результаты сейсмического воздействия на изолированное и не изолированное одинаковые здания

PGA = 0.12g. Запись ускорений на крыше зданий
X-Dir. Y-Dir.



Основные результаты

Перемещение в пружинах и демпферах 3.0 mm.
Постоянное ускорение по высоте изолированного здания.

Сравнение ускорений на крыше зданий
изолированного - "NI" и не изолированного "I"
buildings' roofs:

$X_{ni/i} = 0.25/0.05g$

$Y_{ni/i} = 0.4/0.06g$

$Z_{ni/i} = 0.06/0.07g$

Отсутствие структурных разрушений.

Уменьшение общего вектора 3D
ускорений по крыше > 75%

По структуре изолированного здания:
Уменьшение осевых сил > 60%.

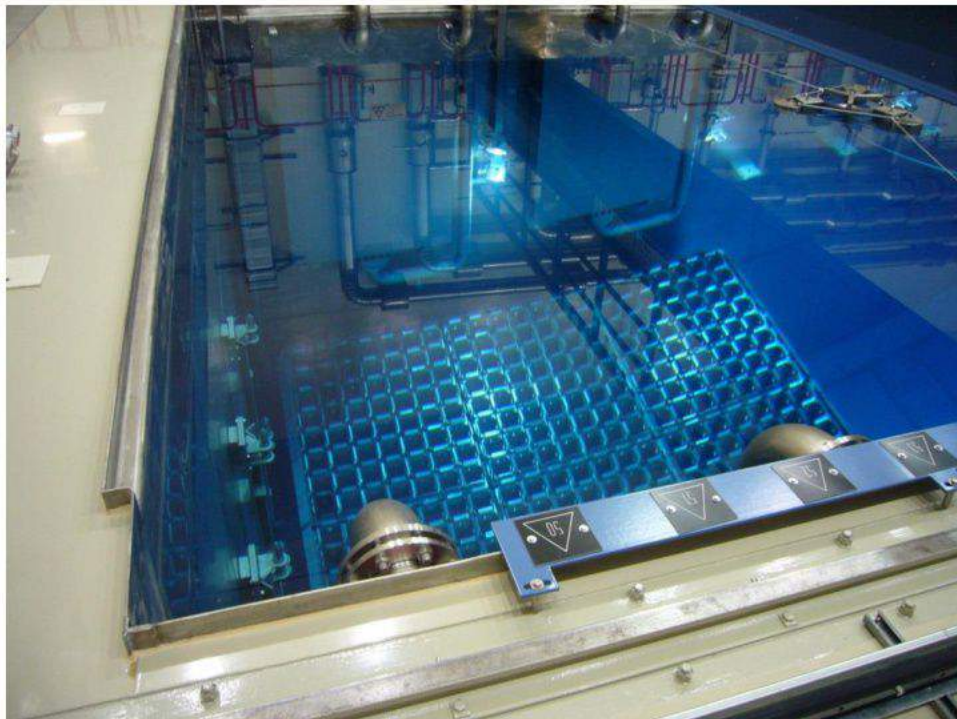
Уменьшение сдвиговых нагрузок > 75%

Уменьшение моментов в несущих
колоннах > 90%

Уменьшение относительных смещений
этажей изолированного здания > 80%

Изоляция бассейна выдержки отработанного топлива (Сейсмика + Падение самолета), NPP Gösgen, Switzerland

Общая масса изолированной системы 5 800 Тонн, ISRS PGA 0,45-0,55 g

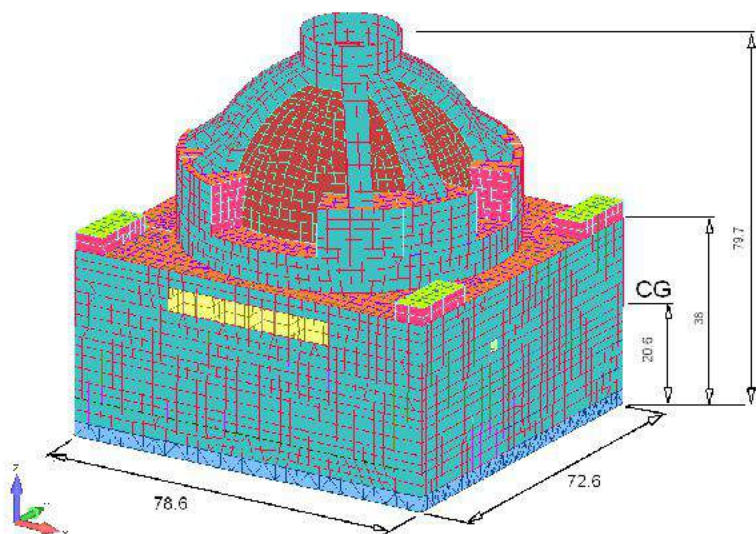


Варианты СИС для АЭС с ВВЭР 1200

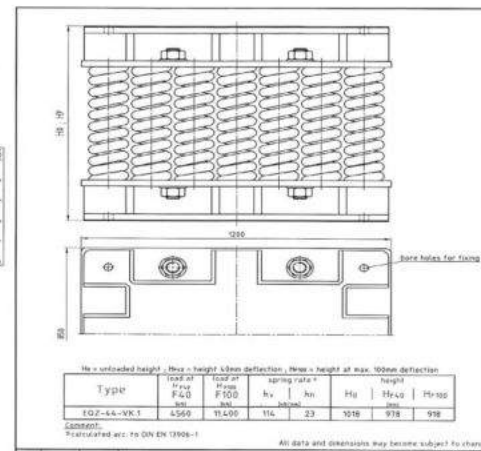
А. Пружинная опора EQZ. Статическая грузоподъемность 456 т, динамическая/сейсмическая 1140 т. Размеры в условиях нормальной эксплуатации 1200 x850x978 мм. Площадь одной пружинной опоры 1,02 м².

Б. Демпфер ВД1000. Размеры 1050x1050x978 мм. Площадь одного демпфера 1.1 м².

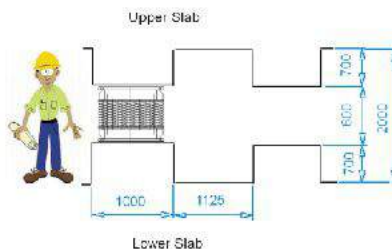
Для блока ВВЭР 1200 при Массе 230 000 т и площади фундамента около 72.6 x 78.6=5700 м² необходимо установить примерно 505 опор СИС и 400 демпферов ВД общей занимаемой площадью менее 1000 м². Например 22 x 23 пружинные опоры по каждой из сторон фундамента. Распределение опор и демпферов является предметом отдельного исследования и проектирования.



M = 230 000 tons



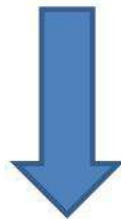
Условная горизонтальная частота системы $F_h=0.7$ Hz
Условная вертикальная частота системы $F_v=2.5$ Hz



Разработка процедуры натуральных испытаний и калибровки элементов СИС

Flow chart of SIS design

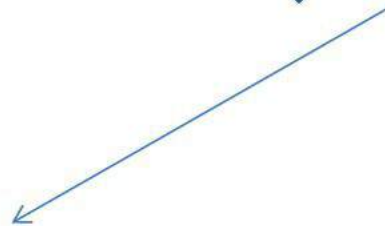
Предварительный анализ СИС. Выбор оптимального варианта



Натурные испытания прототипов элементов СИС.



Натурные испытания

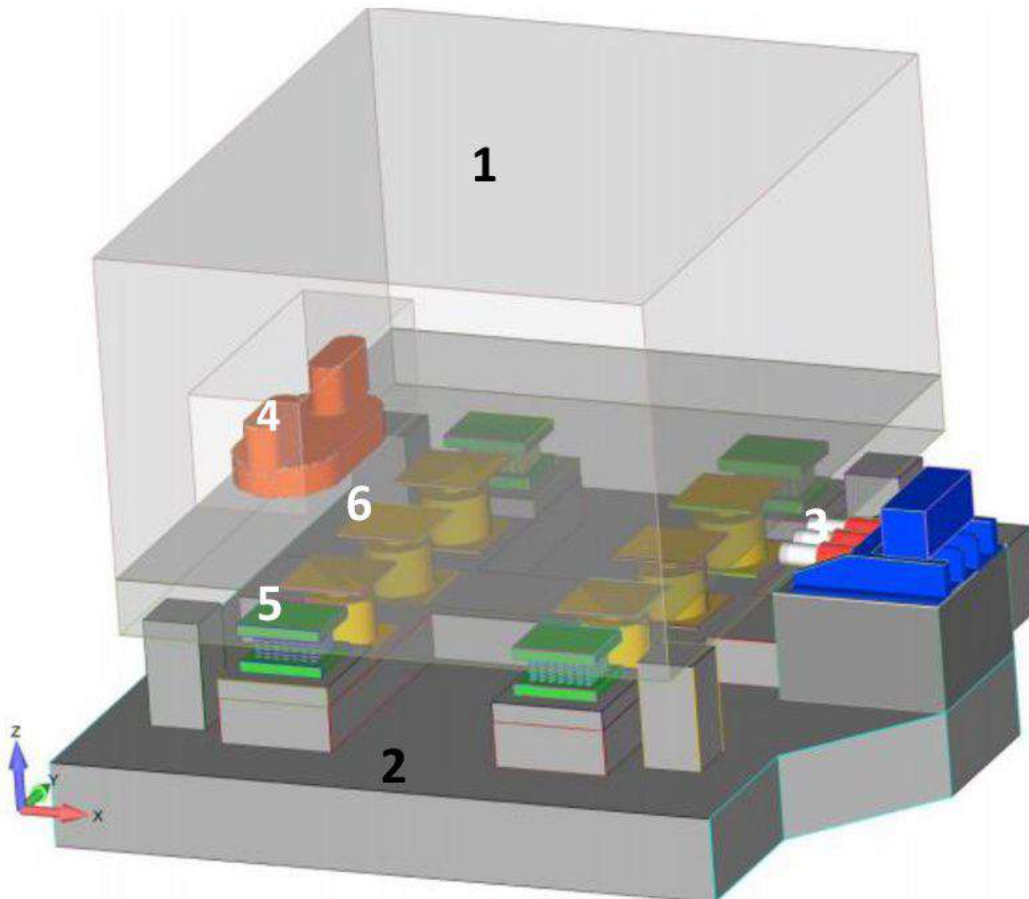


Процедура не существует либо ограничена характеристиками существующими в мире стендами G-Defence, Japan; SRMD, USA and Eurocenter, Italy



Калиброванный и валидированный оптимальный проект СИС

Инверсионный стенд для динамических испытаний 3D пружинно-демпферной СИС



1. Переменная масса сооружения
1000 to 3000 t)

2. Средние (изученные)
грунтовые условия

3. Гидравлическая система
нагрузки с моментальной
разгрузкой

4. Мощный механический
вибратор (0 -10Hz)

5. Изоляторы

6. Демпферы

Inverse approach means that the soil (platform) is not shaking but the Structure is shaking at its natural frequencies providing to SIS elements full scope of loads and deformations with amplitudes equal to full gravity, DBE and BDBE conditions

Инверсионный стенд (SIST)

натурных испытаний СИС компании ЦВС (ЦКТИ-Вибросейсм)

Расположен в Санк-Петербурге, Россия.

Цели SIST

Испытание натурных систем сейсмической изоляции большой грузоподъемности в 3D постановке при полной весовой нагрузке и полных сейсмических смещениях.

Воспроизводство собственных частот сооружения на СИС (качение, горизонтальный и вертикальный колебания и их комбинации);

Определение реального нелинейного поведения SIS и демпфирования системы.

Подтверждение и проверка процедур и результатов анализа.

Исследование взаимодействия грунта и основания в сооружения с SIS

Функции SIST

SIST использует начальное смещение системы, обеспечиваемой гидравлической системой нагружения, с быстрым высвобождением, нагрузки, чтобы инициировать свободные колебания системы в разных режимах.

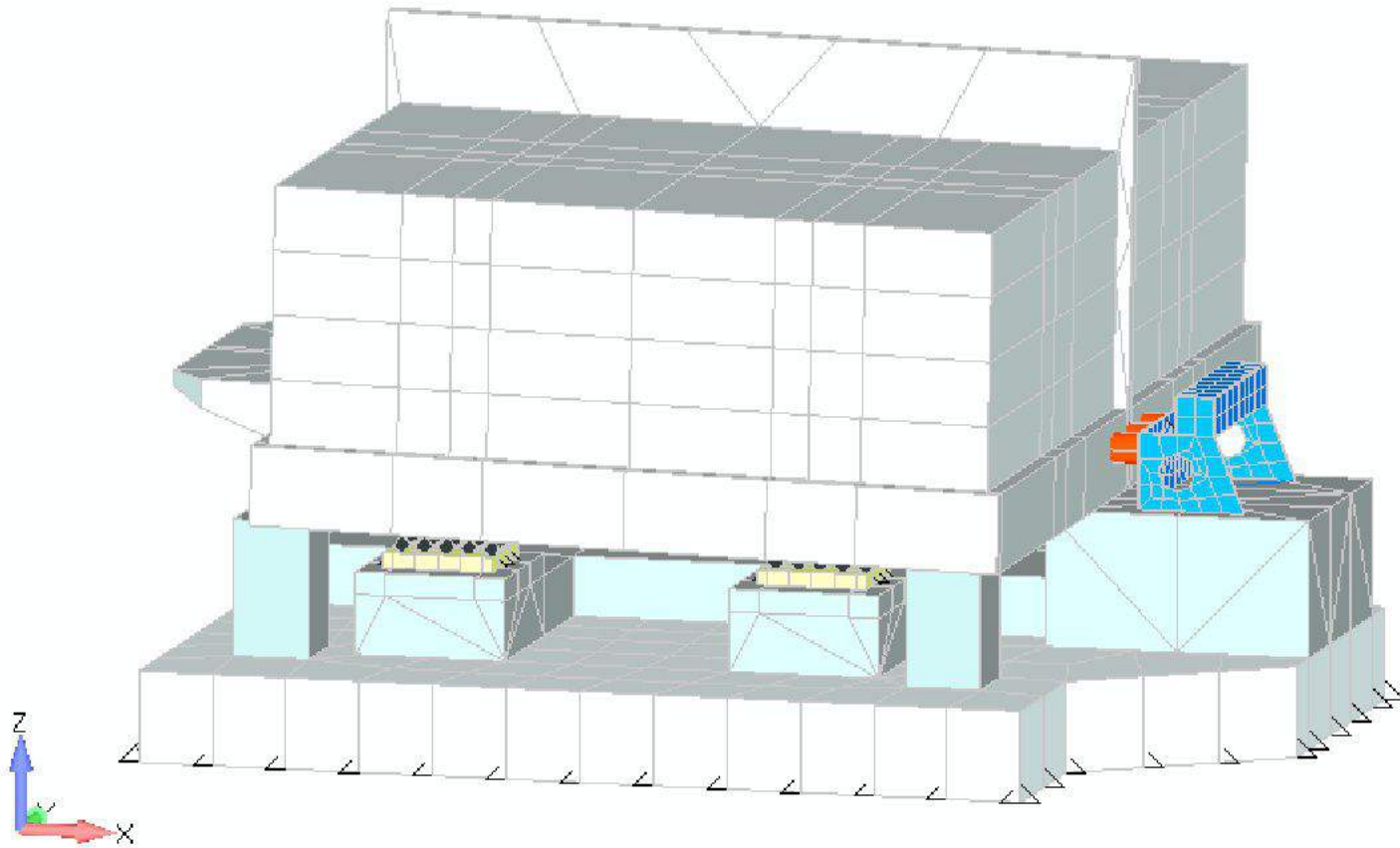
Переменная Масса модели здания: от 1 000 до 3 000 тонн.

SIST использует четыре (4) изолятора различных типов, загружаемых в диапазоне от 250 до 750 тонн гравитационной нагрузки каждый и различные типы демпферов b и амортизаторов.

Дополнительное динамическое возбуждение к SIST обеспечивается мощным механическим вибратором в диапазоне частот от 2,0 до 20,0 Гц.

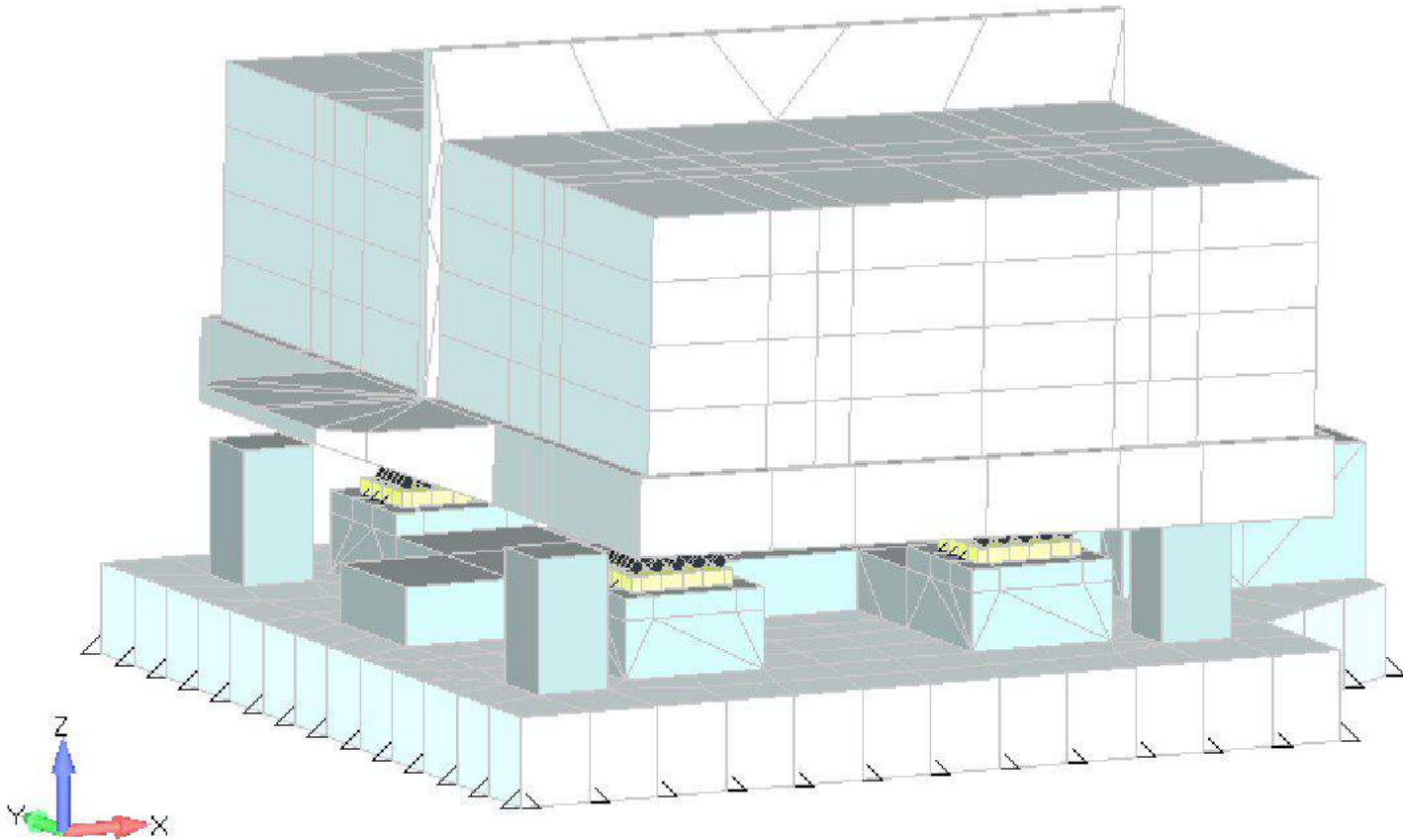
SIST First Rocking Mode of Vibration

$F_1 = 0.65 \text{ Hz}$



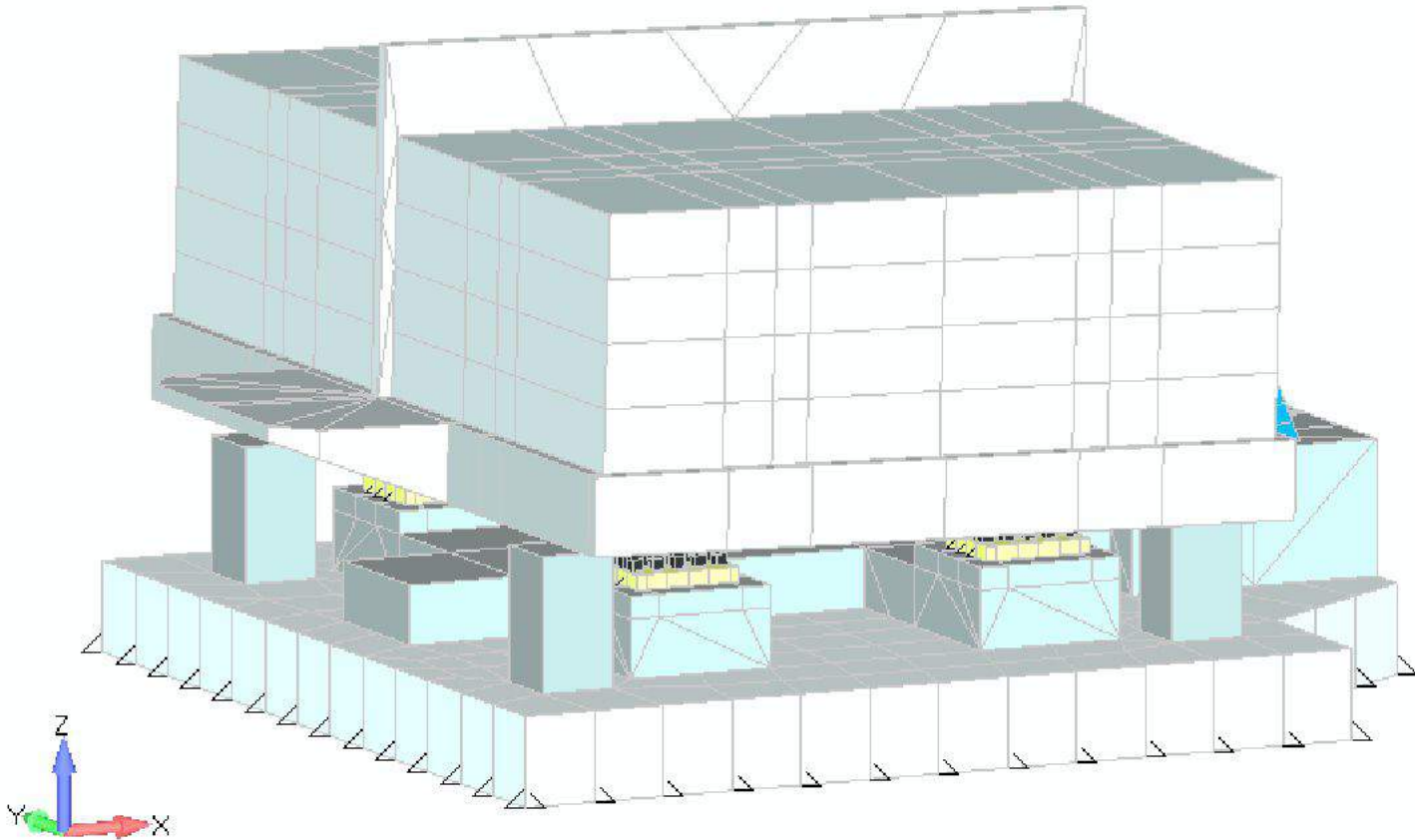
SIST First Rocking Mode of Vibration

$F_1 = 0.65 \text{ Hz}$



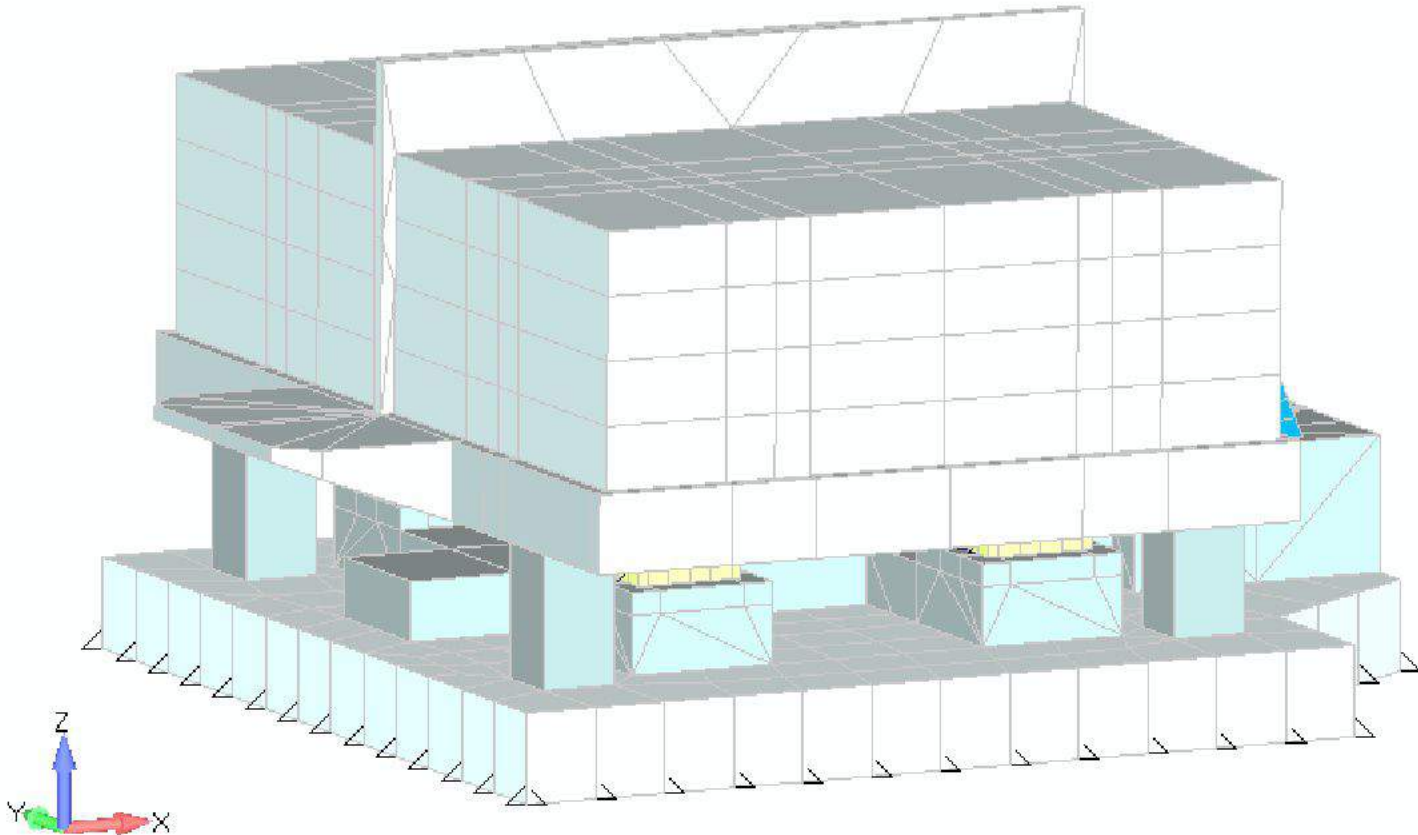
SIST Second Mode of Vibration

F1= 2.06 Hz



SIST Third Vertical Mode of Vibration

$F_1 = 2.48 \text{ Hz}$



Стенд натуральных испытаний СИСТ ЦКТИ-Вибросейсм, Санкт-Петербург, ноябрь 2017 г.



Выводы

1. Предлагаемый оптимизационный подход в определении основных характеристик систем сейсмической изоляции показал новые возможности для существенного увеличения ее эффективности, включая возможность изоляции вертикальной составляющей и резкое снижение относительных смещений разрезного фундамента изолированного здания.
2. Доказана возможность практической реализации 3D сейсмической изоляции на базе использования пружинных блоков и отдельно стоящих демпферов (система BCS).
3. Разработан, запущен и запланирован к эксплуатации в ноябре 2017 года инверсионный стенд для натуральных испытаний СИС.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!