

# SEISMO

FORUM  
EURASIAN

VI Евразийский форум по  
сейсмической безопасности  
сооружений и городов



Научно-практическая конференция  
с международным участием

## 'АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОЛОГИИ, БЕЗОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ И ЗДАНИЙ, ЭКСПЕРТИЗА И ОЦЕНКА РИСКОВ'

ПАМЯТИ Ю.А. БЕРЖИНСКОГО

05 – 07 декабря 2023 года

**Инновационная система пассивной пространственной (3D)  
сейсмоизоляции СИС КСП с возможностью компенсации  
просадок грунта на вечноммерзлых и слабых почвах**

Костарев Виктор Владимирович, канд.техн.наук, ст.научн. сотрудник,  
президент фирмы «ЦКТИ-Вибросейсм», Санкт-Петербург

[www.cvs.spb.su](http://www.cvs.spb.su)



# Проблемы СП 14.13330 «СНиП II-7-81\* Строительство в сейсмических районах»

Действующий СП 14.13330.2018 (СП) является анахронизмом в современной практике проектирования и строительства сейсмостойких сооружений и не соответствует не только лучшим мировым образцам, но и современным стандартам стран СНГ и ближнего зарубежья. Недостатки СП простираются от его структуры до технической сути его разделов, содержащих сущностные ошибки, которые могут привести к серьезным ошибочным проектным решениям и коллапсу сооружений при событии проектного землетрясения. Массовых катастрофических последствий применения СП 14 удастся пока избежать только благодаря естественному запасу прочности сооружений, ограниченности зон интенсивной сейсмичности в РФ и отсутствию событий с пиковыми ускорениями грунта более 0.2g в районах массового строительства. Наиболее серьезные проблемы СП14 связаны с:

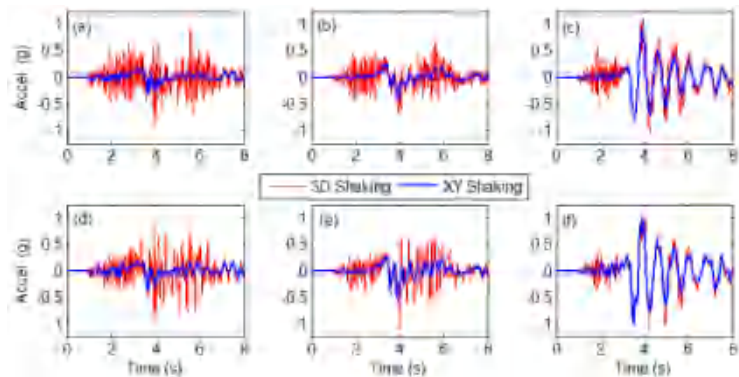
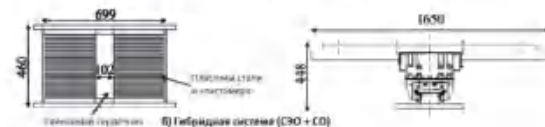
- Определением исходного проектного сейсмического воздействия. Отсутствием связи между проектными решениями, сейсмическим риском, метрики возможного ущерба людскими и материальными потерями, в частности, стоимости человеческой жизни и возможным страховым возмещением.
- Учетом грунтовых условий. Рекомендуемыми спектрами динамичности (спектрами реакции).
- Отказом от метрики интенсивности землетрясения, выраженной в ускорениях.
- Пренебрежением вертикальной составляющей сейсмического воздействия.
- Применением комбинации необоснованных эмпирических коэффициентов  $K_0$ ,  $K_1$  и  $K_{\psi}$ , определяющих сейсмическую нагрузку.
- Грубыми ошибками в определении сейсмических перемещений (до 16 раз!).
- Неучетом «пи-дельта» эффекта, который является одним из основных причин разрушения зданий при землетрясениях, особенно с гибкими этажами.

Таким образом, СП14.13330.2018 обладает существенными недостатками и требует коренной переработки.

# Поведение сейсмоизолированных зданий при Tohoku 2011 Great East Japan Earthquake. Низкая эффективность известных сейсмоизолирующих устройств (СИС). Увеличение сейсмической реакции по вертикали до 2.5 раз! (M.liba, T. Saito, 2013-2015)

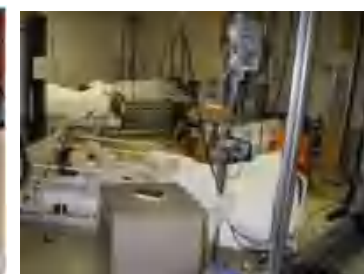
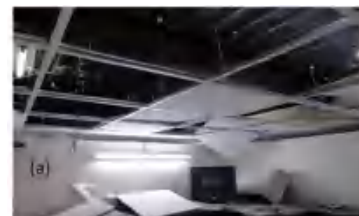
	Site	Usage	Structure Type	Floor	$\Delta$ (km)	Main isolator and damper	Location of Sensors	ACC. (cm/s <sup>2</sup> )			Disp. of SI (cm)
								X	Y	Z	
KA	Sendai	Office	SRC	B2F 9F	172	HRB	under SI	289	251	235	15.7
							above SI	121	144	374	
							top floor	142	170	524	
KB	Fukushima	Office	RC	2F	178	NRB, LRB, OD	under SI	582	758	446	24.6
							above SI	176	213	516	
							top floor	155	185	621	
KC	Fukushima	Office	RC	3F	184	Unknown	under SI	411	334	324	5.8
							above SI	184 154	226	463	
							top floor		157	581	
KD	Tsukuba	Office	PcaPc	7F	334	NRB, LRB, SD	under SI	327	233	122	6.8
							above SI	92	76	198	
							top floor	126	91	243	
KE	Tokyo	Musium	RC	B1F 3F	382	HRB	under SI	100	79	84	4.2
							above SI	76	89	87	
							top floor	100	77	90	
KF	Tokyo	Office	RC	B2F 12F	386	NRB, LRB	under SI	104	91	58	5.1
							above SI	55	41	62	
							top floor	94	82	104	
KG	Kawasaki	Residence	PcaPc	6F	401	NRB, LRB	under SI	86	104	34	5.22
							above SI	58	65	49	
							top floor	63	68	55	
KH	Odawara	Office	RC	6F	457	NRB, LRB	under SI	136	120	47	25.2
							above SI	58	134	47	
							top floor	63	67	48	

Натурные испытания зданий с СИС на самой мощной в мире сейсмоплатформе E-Defence, Japan. Подтверждение низкой эффективности LRB и TPB. При добавлении вертикальной компоненты 3D сейсмического воздействия здания с СИС не имели преимуществ перед жестко опертым вариантом. Наблюдались сходные повреждения не структурных элементов и оборудования (K. Ryan, S.Furukawa, 2012)



Реакция жестко опертого и изолированного зданий при 2D и 3D воздействии (слева).

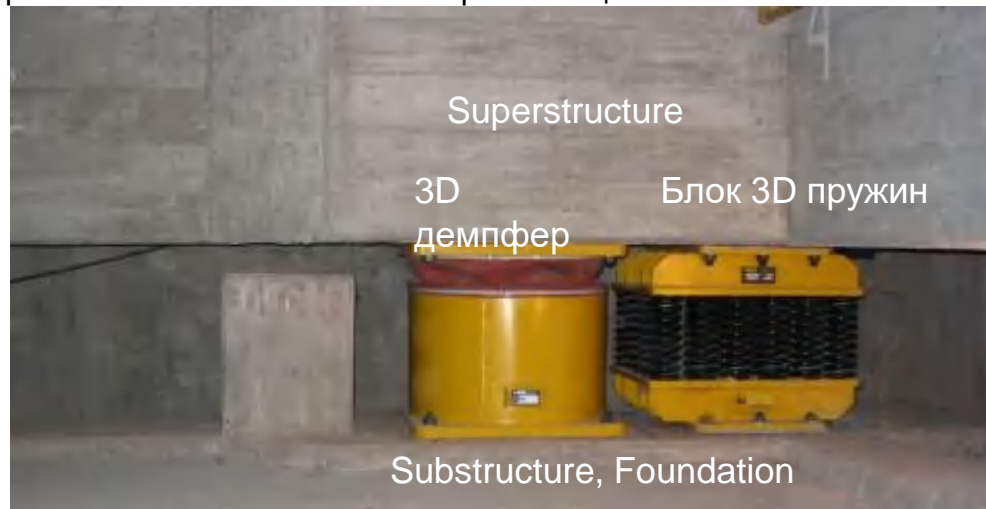
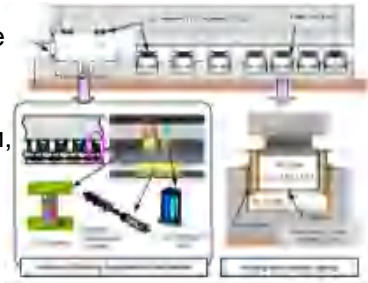
Повреждения в изолированном здании (справа)



# Разработка эффективной пассивной пространственной 3D СИС является насущной задачей современного сейсмостойкого строительства. СИС КСП (BCS) – практическое решение проблемы

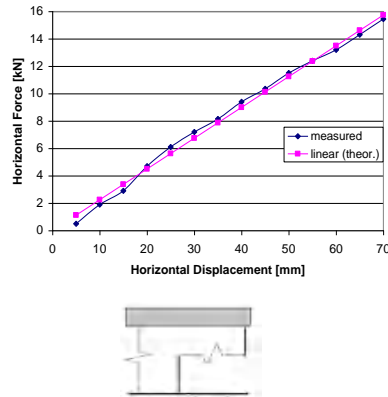
Система **3D СИС КСП - BCS** (Контроль сейсмических перемещений, Base Control System) эффективное решение проблемы пространственной сейсмоизоляции. Является совместной разработкой фирм ЦВС (Вибросейсм), Санкт-Петербург и GERB, GmbH, Berlin. СИС КСП состоит из параллельно установленных 3D блоков витых пружин и 3D высоковязких демпферов. СИС КСП обеспечивает требуемую жесткость (частоты) СИС отдельно в горизонтальном и вертикальном направлениях с контролируемым демпфированием, повышающим эффективность СИС и сокращающем относительные смещения СИС, что очень важно для распределительных систем (umbilical displacements) изолированного здания. СИС КСП позволяет также обеспечивать равномерную загрузку элементов СИС, компенсировать просадки зданий на слабых грунтах и на грунтах в районах вечной мерзлоты и поддерживать вертикальную позицию сооружения. В настоящее время обеспечена полное импортозамещение.

Предыдущие мало успешные попытки создания 3D СИС. Сложность конструкции, применение активных систем, низкая надёжность. В ряде случаев необходимость обеспечения внешней энергией (AC/DC).



# Эффективность СИС КСП (BCS).

## Натурные испытания элементов СИС КСП с построением линейных и нелинейных моделей для расчета сооружений с СИС КСП

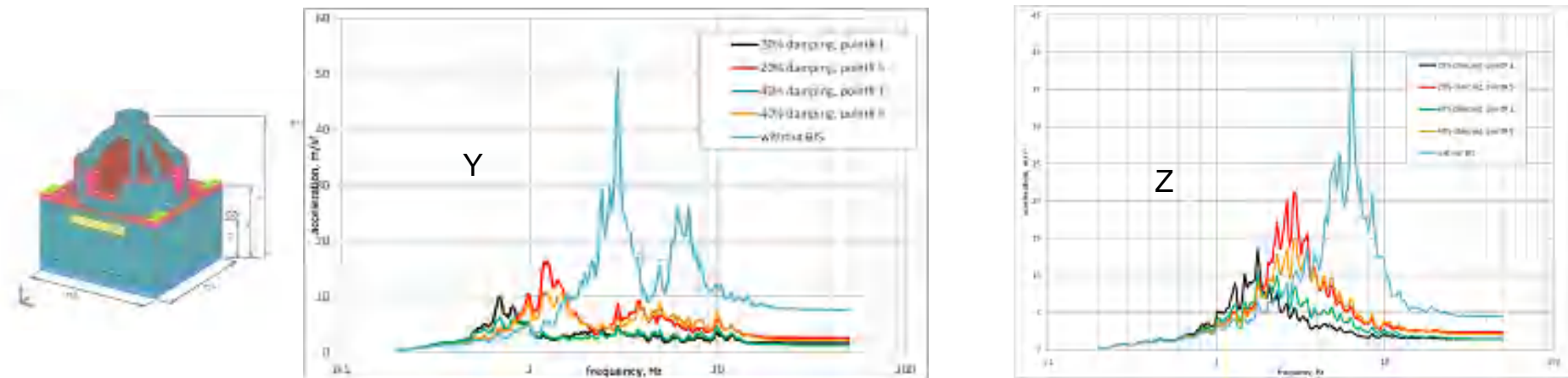


Натурные испытания витой пружины на максимальные горизонтальные и вертикальные смещения. Определение характеристик пружинного блока и построение расчетной модели анализа сооружений с СИС КСП. Пружинный блок работает линейно в большом диапазоне перемещений.

Натурные испытания пространственного 3D высоковязкого демпфера типа ВД по ТУ ЦВС на стенде фирмы GERB, Berlin и построение расчётной модели для анализа сооружений с СИС КСП.



# Расчетные исследования эффективности СИС КСП для ответственных сооружений с использованием верифицированных расчетных моделей на базе натурных испытаний



Результаты аналитического исследования ЦВС эффективности СИС КСП для здания реактора ВВЭР-1200 массой около 900 тыс. тонн. Сравнение варианта жесткого опирания здания и с применением СИС КСП.

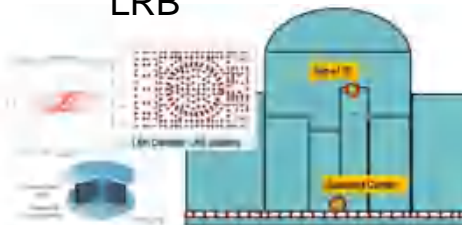
Эффективность СИС КСП в горизонтальном направлении (Y) в вертикальном направлении (Z) в зависимости от уровня демпфирования в системе. Высокая эффективность СИС КСП во всех направлениях сейсмического воздействия, что недостижимо для всех известных СИС.

# Результаты независимого сравнительного аналитического исследования (Dan Chiosel, USA, SMiRT 2017) эффективности СИС BCS, LRB и жесткого опирания здания реактора PWR с учетом волнового движения грунта SSI ACS SASSI

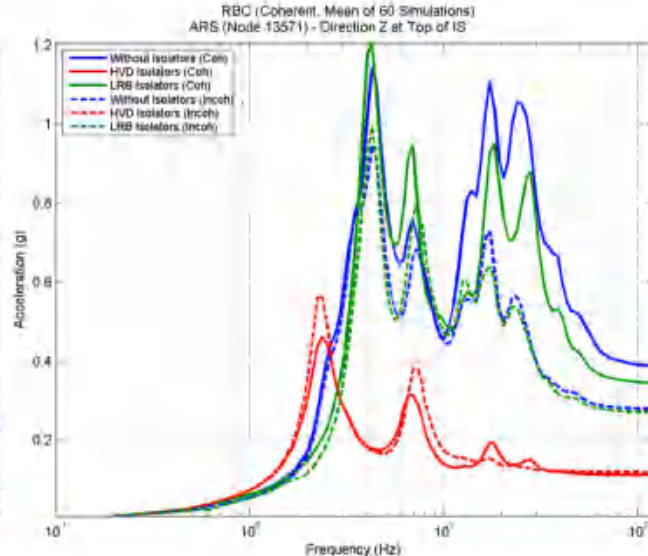
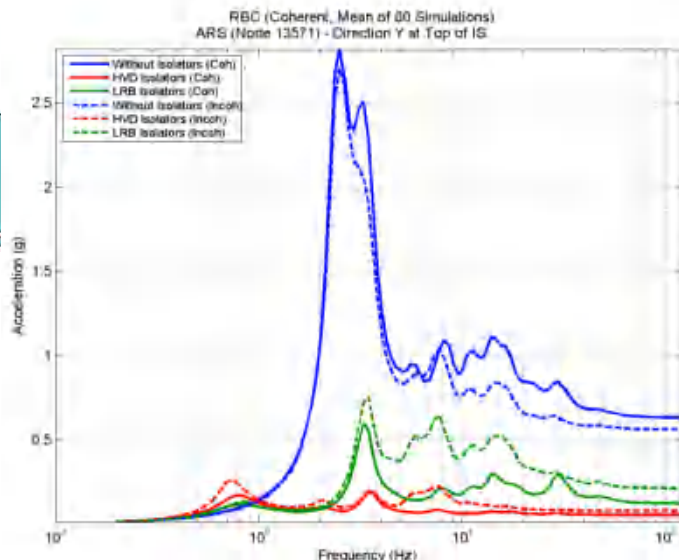
Горизонталь, спектр Y

Вертикаль, спектр Z

LRB



СИС КСП



Расчетная модель (слева) и результаты сравнительного аналитического исследования SSI Dan Chiosel для трех вариантов опирания здания реактора: (1) жесткого, (2) с применением СИС КСП и (3) с LRB - резино-металлической опорой при учете когерентного (сплошные линии) и некогерентного (прерывистые линии) волнового сейсмического воздействия.

Эффективность в горизонтальном направлении (Y), в вертикальном - (Z). Синий цвет – жесткое опирание здания. Зеленый цвет – LRB, Красный цвет – СИС КСП. Очевидное преимущество СИС КСП во всех направлениях сейсмического воздействия.

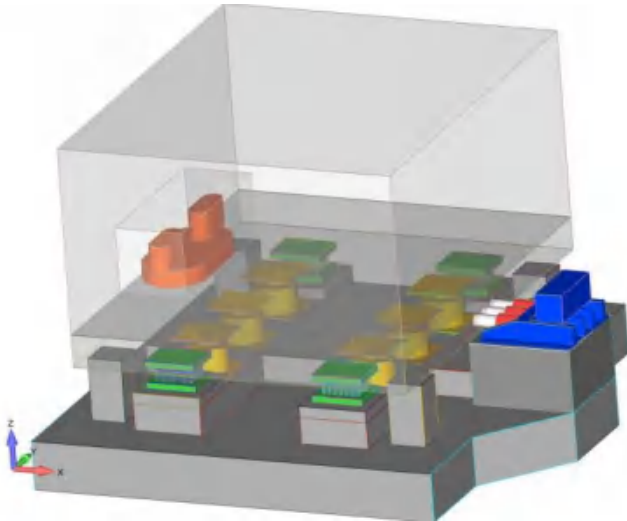


# Стендовая база ЦНИИП Минстроя, СРОСЭКСПЕРТИЗА и ЦВС для натуральных испытаний, валидации и сертификации антисейсмических опор, изоляторов и демпфирующих устройств

## Инверсионный стенд СИСТ (SIST) для натуральных испытаний сейсмоизолирующих систем (СИС)

Габаритные размеры СИСТ составляют 15 x 15 м x 15 м

Инверсионный метод испытаний означает, что почва (платформа) не перемещается (как в сеймоплатформах), а сама испытуемая Конструкция сотрясается на собственных частотах, обеспечивая элементам СИС полный диапазон нагрузок и деформаций с амплитудами, соответствующими условиям ПЗ, МРЗ и ЗПВ.

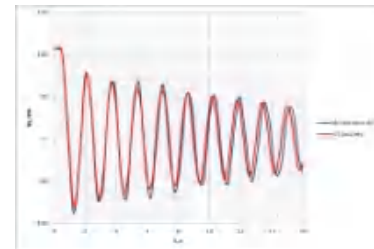


1. Модель здания с переменной массой от 400 до 3 000 т. Нагрузка на каждую испытуемую опору варьируется от 100 до 750 тонн;
2. Мощный фундамент на средних исследованных грунтовых условиях;
3. Гидравлическая система - толкатель с функцией быстрого снятия нагрузки усилием до 1050 тонн и диапазоном перемещений +/- 350 мм;
4. Механический Вибратор;
5. Испытуемые Изоляторы;
6. Испытуемые Демпферы.

# Общий вид стенда натуральных испытаний СИСТ, нагрузочное устройство мощностью 1050 тонн, Санкт-Петербург. Натурные испытания СИС КСП на запроектное сейсмическое воздействие с пиковым ускорением 0.65g



## Результаты испытаний СИС КСП



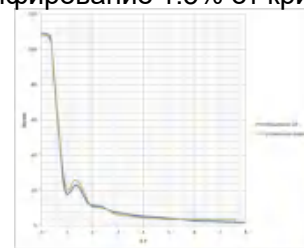
Реакция системы без демпферов,  
демпфирование 1.5% от критического



Пружинный блок 465/1200  
тонн  
Сейсмическое смещение 150



3D демпфер в рабочем состоянии



Реакция системы с демпферами  
с демпфированием , близким к  
критическому

# Примеры испытаний. Полномасштабные испытания РОЧ со свинцовым сердечником (LRB) на стенде СИСТ (2023)

Производство РПИ Курскпром, Тип 300 х 300 грузоподъемность изолятора 100 тонн.



# Стенд детальных исследований опор, сейсмических изоляторов и демпферов (СДО), ЦВС, Санкт-Петербург, РФ

Стенд СДО позволяет испытывать и получать расчетные линейные и нелинейные характеристики опор, сейсмических изоляторов и демпферов различных типов в горизонтальном и вертикальном направлениях при переменной статической и динамической нагрузках. Размеры образцов до 1200 x 1200 x 1000 мм.

Перемещения до 500 мм. Усилия 50 тонн горизонталь и 40 тонн – вертикаль.



Общий вид СДО с маслостанцией высокого давления



Компьютерная система управления СДО



Испытание 3D высоковязкого демпфера ВД по ТУ 4192....

# Примеры применения СИС КСП (BCS) демпферов ВД. Инновационное решение сейсмической защиты Иркутского аэропорта землетрясения



Два здания нового Иркутского аэропорта



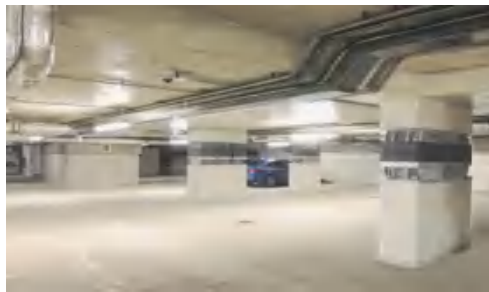
Демпферы ВД прибыли в Иркутск из Санкт-Петербурга



**Соединение демпферами ВД двух соседних зданий, имеющих различную массу, собственные частоты и формы вынужденных колебаний**



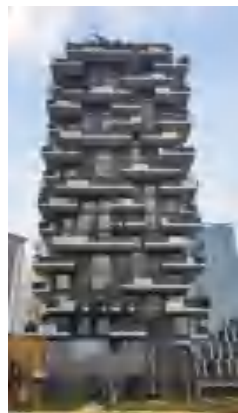
# Примеры применения СИС КСП (BCS) в мире для вибрационной, сейсмической и звуковой изоляции зданий, сооружений и оборудования



Kings Cross Building Isolation, London



Shanghai Symphony Orchestra Vibration and Seismic Isolation



Hing Scrapper Building Isolation  
Porta Nuova, Milano, Italy



Hongkong Lyric Theatre Complex Isolation



# Примеры применения СИС КСП (BCS) в мире для вибро и сейсмоизоляции ответственного оборудования



Вибро и сейсмоизоляция мощных турбоагрегатов



Вибро и сейсмризоляция  
дизель-генератора

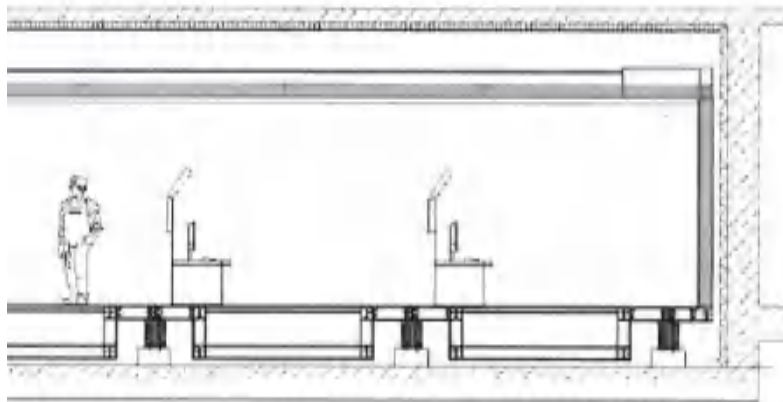
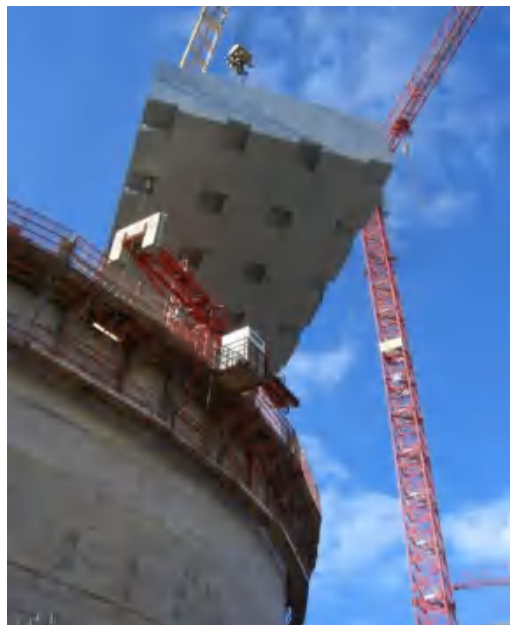


Сейсмоизоляция солнечной  
электростанции на PGA 1.0 g



Сейсмоизоляция  
мощного  
трансформатора

# Система сейсмоизоляции и виброизоляции – «плавающий пол» систем АЭС на основе применения блоков пружин и демпферов СИС КСП



АЭС Окилоота III EPR 1600, Финляндия

Система защиты БЩУ АЭС от сейсмики, вибрации, шума и ударных воздействий от падения самолета массой 400 тонн

## Система сейсмоизоляции и виброизоляции систем АЭС на основе применения блоков пружин и демпферов



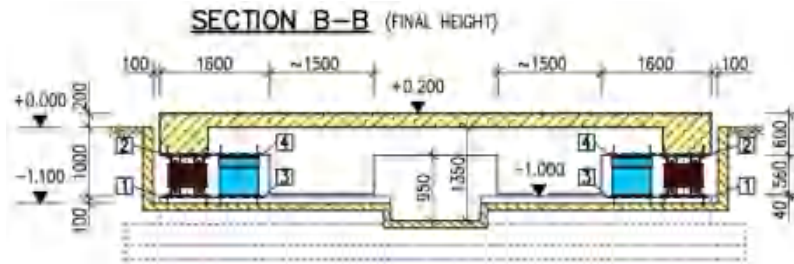
АЭС Госген, Швейцария.

Защита бассейна выдержки отработанного топлива массой 5800 тонн от сейсмики 0.55g, и удара от падения самолета массой 400 тонн

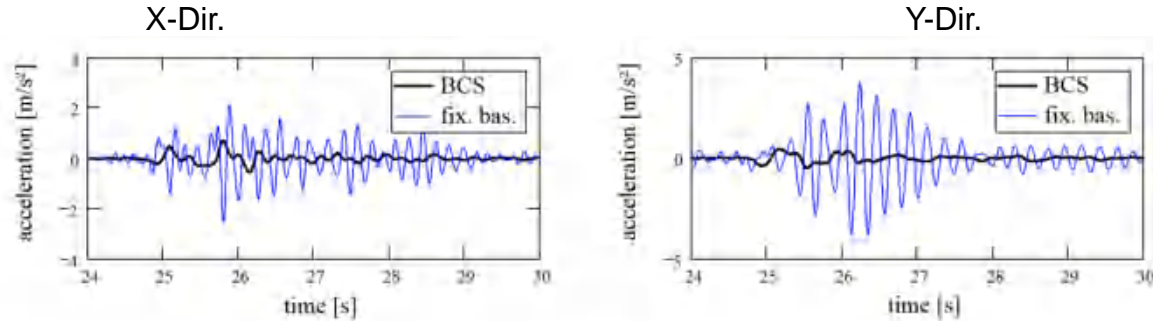
# Доказательство эффективности СИС КСП при реальном землетрясении.

**Применение BCS/SIS для двух аналогичных зданиях Университета Мендоза, Аргентина**

(слева обычно опертое здание на фундаменте, справа с использованием СИС КСП)



# Экспериментальные результаты функционирования 3D СИС КСП (BCS) при реальном землетрясении PGA = 0.12g. Accelerations at the top of the isolated and Non-Isolated Buildings



## Сравнительные результаты снижения всех параметров 2-х зданий

Distortion in springs and dampers 3.0 mm.  
Constant acceleration distribution along  
the isolated building height.  
Comparative acceleration measurements at  
“NI” and “I” buildings’ roofs:  
 $X_{ni/i} = 0.25/0.05g$   
 $Y_{ni/i} = 0.4/0.06g$   
 $Z_{ni/i} = 0.06/0.07g$

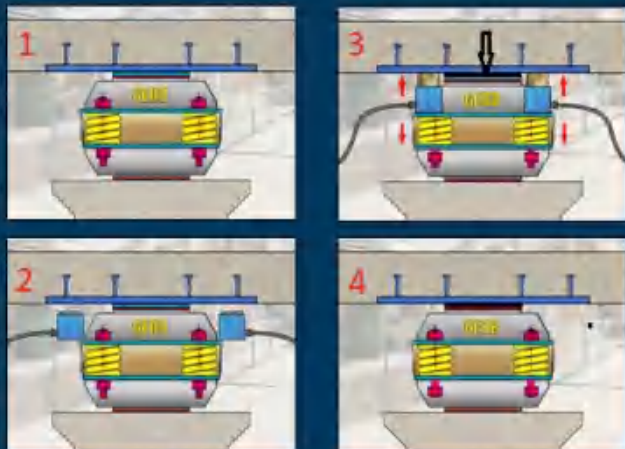
No structural damage.  
Roof 3D Acceleration reduction > 75%  
Structure:  
Axial forces reduction > 60%.  
Shear force reduction > 75%  
Bend. Moment reduction > 90%  
Story Drift reduction > 80%



# Примеры применения СИС КСП (BCS) для компенсации просадок грунта и обеспечения проектного положения сооружения, в том числе в районах вечной мерзлоты

регулировка реакции опоры

GERB



Сжатие

GERB



Установка пластин



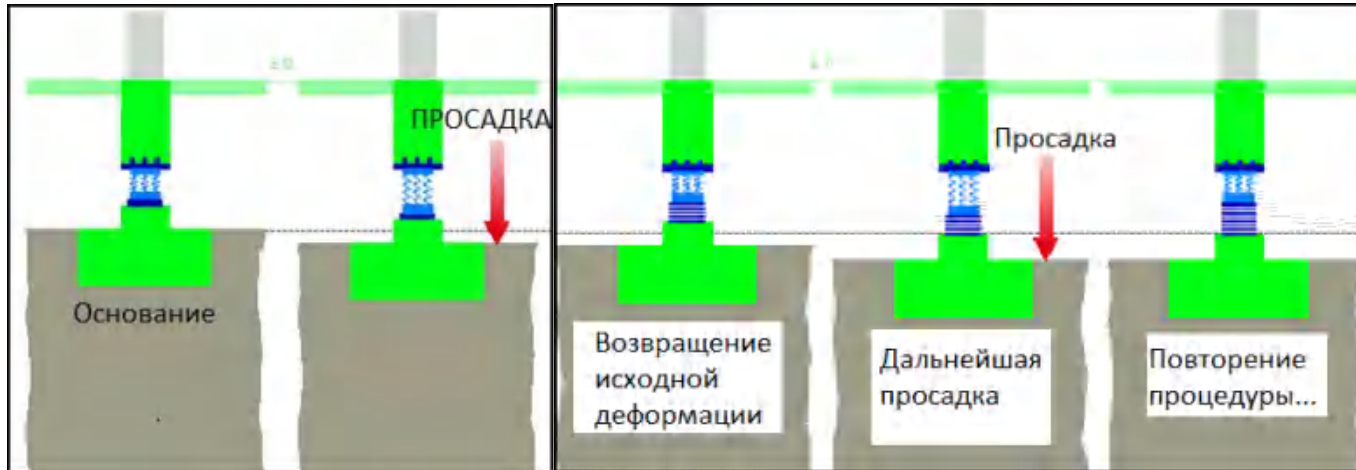


# КОНТРОЛЬ ПРОСАДОК ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

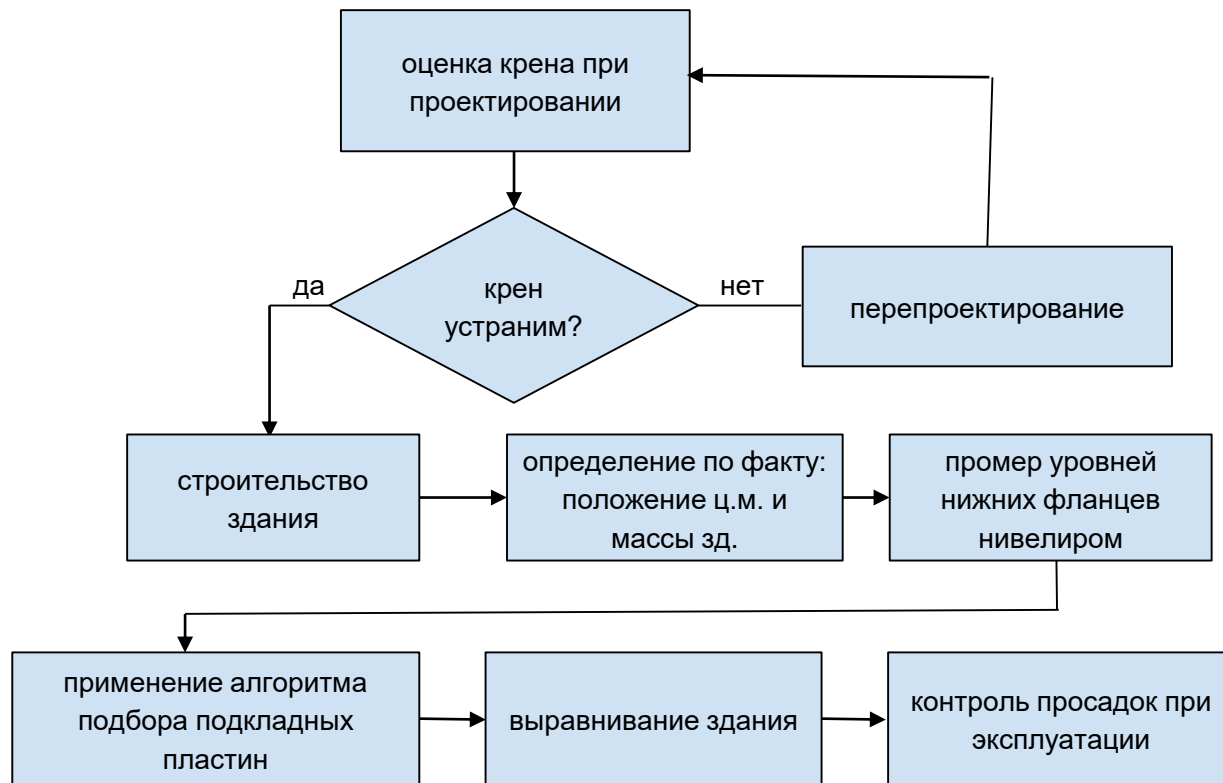
После выравнивания здания на этапе ввода в эксплуатацию дальнейший контроль за просадками может быть осуществлен:

- ☐ прямыми геодезическими измерениями уровней;
- ☐ путем контроля деформаций пружинных блоков.

При дальнейших возможных просадках одной или нескольких свай под пружинными блоками необходимо компенсировать просадки установкой пластин с толщинами, равными глубинам ухода свай.



# БЛОК-СХЕМА КОНТРОЛЯ НАД КРЕНАМИ



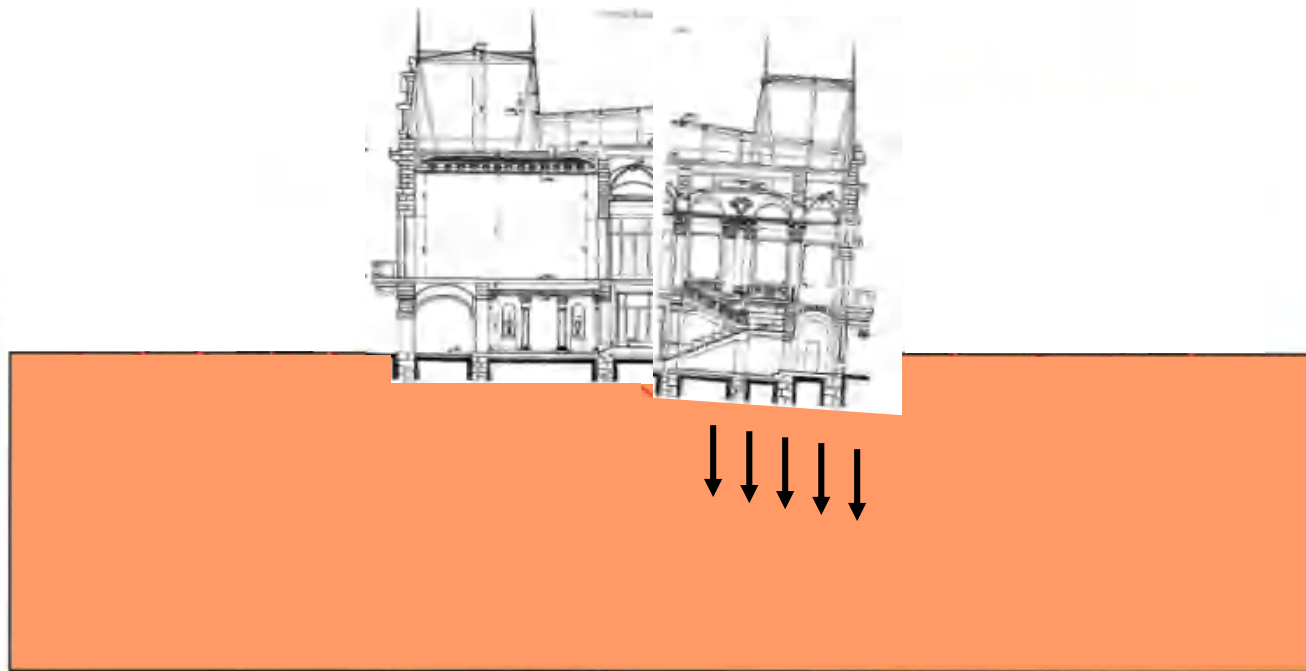


Трещинообразование и угроза разрушения здания из-за просадок грунта в старинной церкви Church St. Remigius, Bergheim, Germany. Компенсация просадок системой СИС КСП

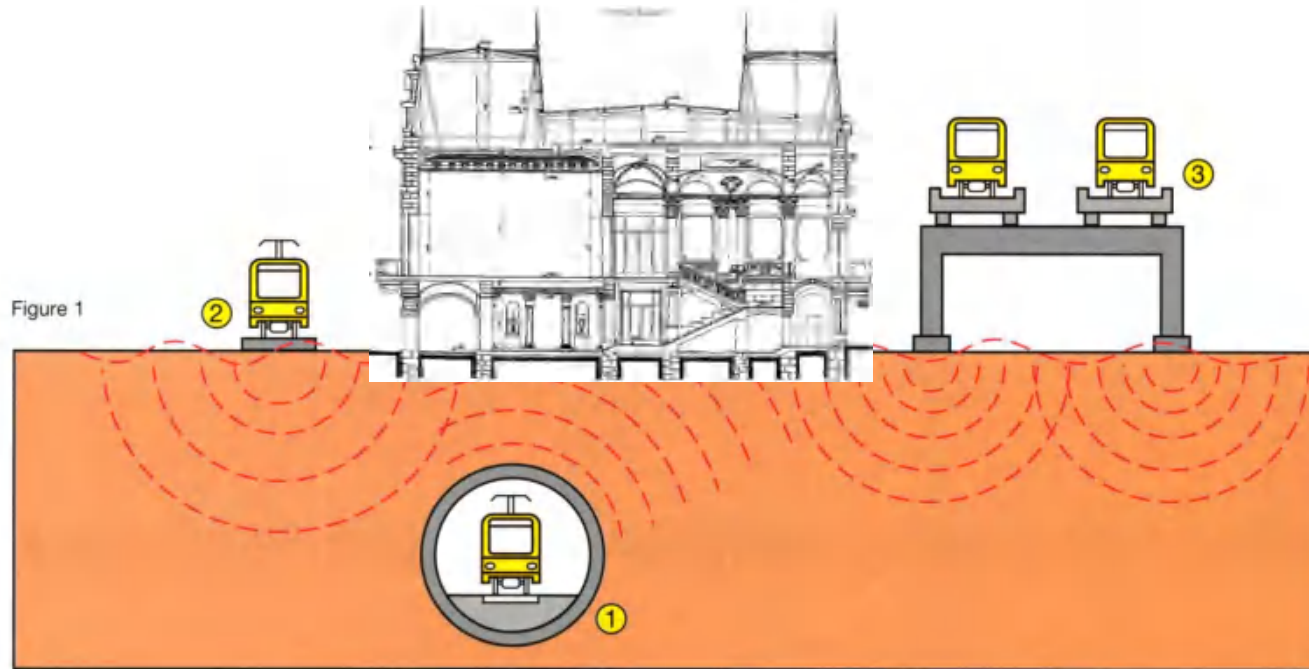


Восстановление памятника архитектуры – дворца (1832 года постройки после существенных просадок грунта)

## Изоляция от внешней вибрации и компенсация просадок грунта системой СИС КСП



# Изоляция от внешней вибрации и компенсация просадок грунта системой СИС КСП





# Видео

## Заключение

1. СП14.13330.2018 с Изменениями обладает существенными недостатками, которые могут приводить к серьезной недооценке сейсмической опасности для зданий и сооружений. Документ требует коренной переработки.
2. Анализ прошедших сильных землетрясений, натурные исследования на сейсмоплатформе E-Defence выявили недостаточную эффективность современных «горизонтальных» СИС (LRB, TPB).
3. Аналитические и натурные экспериментальные исследования, а также опыт прошедшего землетрясения установили преимущества системы пространственной сейсмоизоляции СИС КСП (BCS) перед наиболее распространёнными в мире системами СИС LRB и TPB, обеспечивая сейсмическую изоляцию во всех направлениях, включая вертикальное направление сейсмического воздействия.
4. Система контроля сейсмических перемещений СИС КСП, помимо высокой эффективности при землетрясениях, позволяет:
  - Обеспечивать вибрационную, ударную и шумовую изоляцию зданий и сооружений;
  - Компенсировать возможные просадки грунта на слабых и просадочных грунтах, а также в районах вечной мерзлоты;
  - Эффективно снижать теплопередачу от сооружения на грунт вечной мерзлоты, что предотвращает либо замедляет разморозание основания и, таким образом, повышает стабильность положения и увеличивает срок службы зданий, сооружений и объектов энергетической инфраструктуры.