



Double Seismic Insulation System of Turbine Unit Foundation

Tarasov, V.A.^{1*}

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

* vtarasov1000@yandex.ru

Keywords:

Seismic isolation, Seismic insulation system, Response spectrum, Seismic stability, Turbine unit foundation, Earthquake, Structural dynamics, Seismic calculation.

Abstract:

Seismic isolation is the most effective way to achieve earthquake resistance of equipment located inside buildings and structures. Achievement of seismic stability power plant turbine foundation by applying a variety of design solutions and seismic isolation systems is a significant issue. The Earth population growth and as a result, an increase in the required electric capacities are the main causes to design and build more facilities of increased responsibility (such as power plants) in areas with high-level seismic actions. Improving the reliability and safety in the design of power plants is achieved by the resistance of buildings, structures, and equipment to special types of external influences, including seismic. Ensuring the seismic resistance of building structures and technological equipment is one of the key tasks in the design of power plants in seismically active territories. A new constructive solution of the turbine building is proposed: the turbine building, which contains the turbine unit foundation, which is vibration-insulated with spring and spring-damper blocks, is completely isolated by introducing a layer of seismic isolators under the foundation plate of the building. The turbine unit foundation is twice isolated. Plenty of calculation experiments using the FEM were carried out. Three different structural schemes of the turbine unit foundation as part of the turbine building are analyzed: foundation without seismic isolation; classic vibration-insulated foundation (foundation with a standard seismic isolation system); foundation with double seismic isolation system. The dynamic behavior of the foundation with a double seismic isolation system is also analyzed at a different vertical stiffness ratio and horizontal stiffness ratio of the "bottom" layer seismic isolators. The greatest decrease in horizontal seismic accelerations in the axial direction at the turbine installation level achieves when the double seismic isolation system with slider seismic supports in the lower layer is used.

1 Introduction

Объектом исследования в данной работе является фундамент турбоагрегата, предметом исследования – сейсмоизоляция фундамента турбоагрегата.

В современных условиях развития мировой энергетики особую важность приобретают вопросы строительства электростанций на территориях с высокой сейсмической активностью. Проблема еще более усугубляется при наличии слабых грунтов (модуль деформации 20 МПа). Наличие собственной электростанции в качестве источника электроэнергии обеспечивает энергетическую безопасность отдельных регионов и государств.

Центральной задачей, выходящей на передний план, является вопрос безопасности действующих и вновь возводимых электростанций. Также важным направлением является повышение эффективности строительства электростанций за счёт совершенствования проектных решений.

Необходимо обеспечить не просто сохранность, а высокую надежность функционирования электростанций во время и после прохождения землетрясения. Это связано с тем, что после прохождения землетрясения электростанция должна выдавать энергию в пострадавшие районы: в больницы, пункты помощи и ликвидации последствий землетрясений и т.д.

Кроме того, значительная часть атомных электростанций (АЭС), проектируемые сотрудниками корпорации «Росатом»: АЭС «Эль-Дабба» (Египет), «Пакш-2» (Венгрия), «Аккую» (Турция), «Руппур» (Бангладеш) размещаются в районах с высокой сейсмичностью на нескальных грунтах. На всех этих станциях планируется от одного до нескольких блоков с турбоагрегатами от 1000 МВт до 1200 МВт.

Всё вышесказанное указывает на актуальность проблемы создания рациональной конструкции сейсмоизоляции и виброизолированного фундамента турбоагрегата.

Тем не менее, предварительный анализ научных работ, посвященных проблемам проектирования энергетических объектов на территориях с повышенной сейсмической активностью, показал, что абсолютное большинство проводимых исследований связаны с сейсмостойкостью реакторных отделений АЭС (как сооружений наивысшего уровня ответственности) а также с сейсмостойкостью технологического оборудования, чаще всего связанного с безопасностью электростанции.

Тема сейсмостойкости виброизолированных фундаментов турбоагрегатов не освещена достойно в научной литературе, хотя, по мнению автора, является не менее важной.

Вышеуказанное обстоятельство определило целесообразность проведения исследования, целью которого является определение предпочтительного варианта конструктивного решения здания турбины, обеспечивающего сейсмостойкость турбоустановки электростанций при строительстве в районе с высокой сейсмичностью.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Обзор и сравнительный анализ литературных источников в области решения задач обеспечения надежности функционирования объектов энергетики в условиях высокой сейсмической активности посредством реализации соответствующих конструктивных решений;
- Предложение инновационного решения - системы двойной сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата (постановка на сейсмоизоляторы всего здания турбины, содержащего в своём составе виброизолированный фундамент турбоагрегата);
- Выполнение расчётных сопоставлений моделей здания турбины с использованием классических конструктивных решений и инновационного варианта с двойной сейсмоизоляцией фундамента турбоагрегата;
- Анализ нескольких вариантов системы двойной сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата (разные параметры сейсмоизоляторов нижнего слоя).

На начальном этапе исследования был произведен обзор и анализ литературных источников, относящихся к тематике исследования. Первые прикладные исследования в области защиты элементов строительных конструкций от сейсмических нагрузок начались только во второй половине XX столетия благодаря появлению и развитию компьютерной техники с мощным вычислительным потенциалом. В частности, в Советском Союзе первые исследования в области сейсмической защиты элементов строительных конструкций проводились в ЦНИИСК (Kucherenko TsNIISK Research Institute, Moscow, Russian Federation) под руководством Айзенберга Я.М. [1-2].

Результаты указанных исследований явились базой для научно-методических разработок и инструментальных средств в соответствующей области исследований [3]. В конце 70-х годов 20 века началось первое массовое строительство зданий и сооружений с системами сейсмоизоляции в виде включающихся и выключающихся связей при строительстве трассы БАМ (Baikal–Amur Mainline, Russian Federation). Город железнодорожников (82 здания) был застроен сейсмоизолированными сборными железобетонными зданиями на базе крупнопанельной серии 122. Это был первый в мире опыт по применению такой системы сейсмозащиты в жилых домах [1]. Указанные обстоятельства, в частности, определили выдвижение России на лидирующие места в мире по количеству построенных сооружений с различными системами сейсмоизоляции (более 600 объектов).

Появление новых и совершенствование уже созданных научных разработок в области сейсмоизоляции строительных конструкций неразрывно связано с развитием динамических расчётов (в частности сейсмических), развитием различных способов математического моделирования в расчётах сооружений, совершенствованием теорий взаимодействия сооружение-основание, методики расчётов грунтов и многим другим.

Общие вопросы проектирования структурных элементов в составе объектов промышленного и энергетического строительства на территориях с высокой сейсмической активностью освещаются в работах Hiraki (2014), Chen (2014), Kumar, Whittaker and Constantinou (2015) [4–11].

Tarasov, V.A.

Double Seismic Insulation System of Turbine Unit Foundation;

2020; Construction of Unique Buildings and Structures; Volume 91 Article No 9101. doi: 10.18720/CUBS.91.1

Детальное описание соответствующих конструктивных решений в области обеспечения защиты элементов строительных конструкций в составе объектов промышленного и энергетического строительства представлено в работах Medel-Vera (2015), Politopoulos (2015), Sayed (2015), Firoozabad (2015), Zhou, Wong and Mahin (2016), Kostarev, and Vasilyev (2007), Chasalevris (2020), Yang (2019), Wang (2018), Anand (2018), Najafijozani (2020), Yu (2018), Jeong (2019) [12–23].

Специалистом ООО «ЦКТИ-ВИБРОСЕЙСМ», Санкт-Петербург, Россия Васильевым П.С. были сформулированы общие сведения о сейсмоизолирующих элементах с подробным описанием их типов и принципов работы. Данная информация вошла в состав СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах [34] (Russian Building Code SP 14.13330.2018 Seismic building design code), приложение В.

Для повышения эффективности конструктивных решений и уменьшения трудоемкости процесса их разработки в работах Ismail (2018), Saitoh (2014), Calvi (2018), Warn (2012), Muravyeva and Vatin (2014), Egarkin (2015), Dražićand Vatin (2016) Рутман и Островская (2018) [24 - 31] предлагаются различные варианты методик динамических расчетов, в том числе с учетом демпфирования. Тем не менее, в соответствующих работах описаны только общие принципы учета сейсмических воздействий без учета особенностей конструкции, обусловленных, назначением объекта, соответствующим объемно-планировочным решением, применяемым технологическим оборудованием и т.д.

В предыдущих работах автора приводится подробный обзор сейсмоизолирующих элементов [32], а также подробная процедура сейсмического расчёта по линейно-спектральной теории и изменения в нормативных документах, регламентирующих сейсмические расчёты в России [33].

Таким образом, по результатам обзора и сравнительного анализа литературных источников по тематике исследования был сделан вывод об отсутствии решения вопроса сейсмостойкости виброизолированных фундаментов турбоагрегатов в мировой научной литературе, что еще раз подтверждает актуальность проводимого исследования.

2 Materials and Methods

Данная работа посвящена анализу различных вариантов сейсмоизоляции, а также выбору предпочтительного варианта достижения необходимого уровня сейсмостойкости фундамента турбоустановки.

Существует два метода определения сейсмостойкости: опытный и расчётный. Турбоагрегаты массой 100 - 10000 т практически невозможно испытать даже на уникальных стендах.

В связи с этим, актуальной задачей является определение спектров сейсмических ускорений на отметке установки агрегата, а также поиск конструктивных возможностей для их снижения. Основным методом исследования выбран метод: проведение вычислительных экспериментов.

Для проведения расчётов в качестве примера использовалось здание турбины со следующими параметрами: здание имеет прямоугольную форму в плане с размерами 63x110 м и состоит из основного помещения машзала и деаэрационной этажерки. Конструктивно здание турбины представляет собой каркасное многоэтажное здание из монолитного железобетона с переменным шагом колонн.

В здании на отдельном фундаменте располагается турбоустановка имеющая длину около 70 метров и массу 2500 т. Турбоустановка представляет собой быстроходную машину, работающую на частоте 50 Гц. Масса виброизолированного фундамента турбоагрегата вместе с оборудованием составляет около 10000 т.

В исследовании рассматривались три принципиально разные конструктивные схемы.

Схема А - без сейсмоизоляции. Данная схема характеризуется отделением фундаментной плиты под турбоустановкой от фундаментной плиты здания турбины. Упрощённо схема А представлена на рисунке 1.

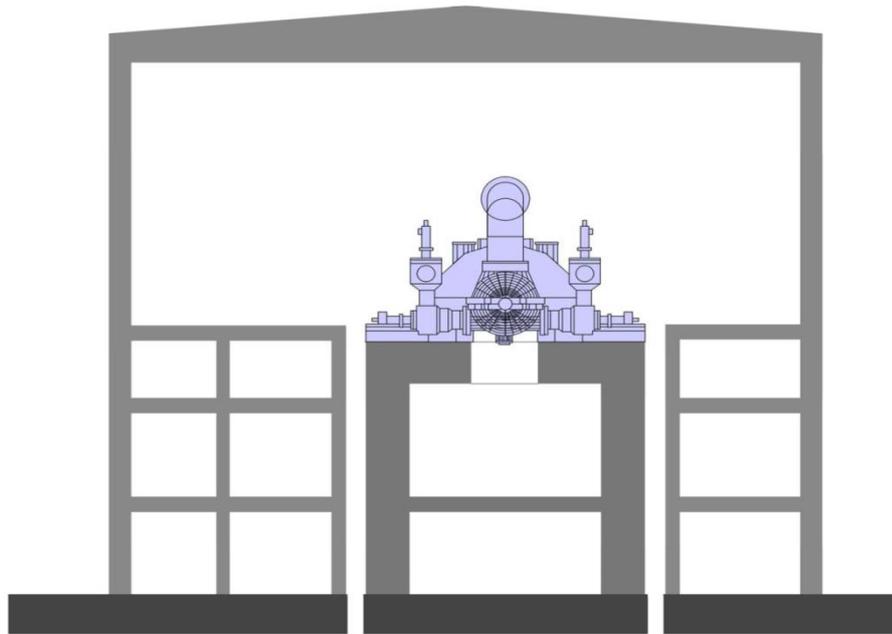


Рисунок 1. – Схема А – Безсейсмоизоляции
Figure 1. - Scheme A - Without seismic isolation

Схема В – классический вариант виброизолированного фундамента турбоагрегата.

Данная схема характеризуется тем, что здание турбины имеет одну общую фундаментную плиту, а фундамент турбоустановки изолируется пружинными опорами. Упрощённо схема В представлена на рисунке 2.

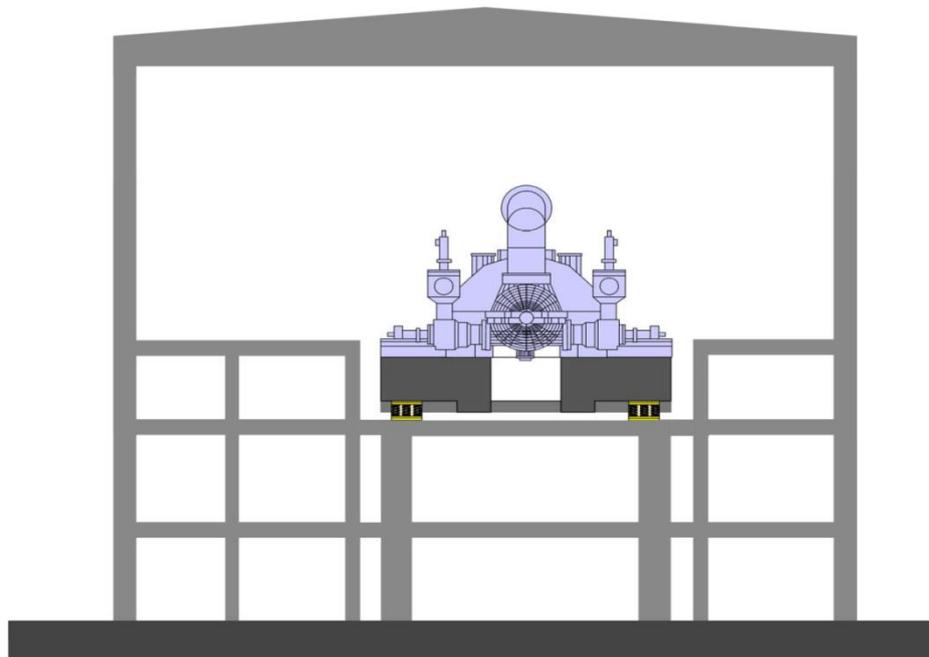


Рисунок 2. – Схема В – Классический вариант виброизолированного фундамента турбоагрегата

Figure 2. - Scheme B - The classic version of vibration-insulated turbine unit foundation

Схема С – инновационный вариант с двойной системой сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата. Данное конструктивное решение является новым, неисследованным ранее. В нём помимо изоляции фундамента турбоагрегата пружинными опорами, изолируется всё здание турбины в целом, путём введения второго слоя сейсмоизоляторов между двумя нижними фундаментными плитами здания. Упрощённо схема С представлена на рисунке 3.

Tarasov, V.A.

Double Seismic Insulation System of Turbine Unit Foundation;

2020; Construction of Unique Buildings and Structures; Volume 91 Article No 9101. doi: 10.18720/CUBS.91.1

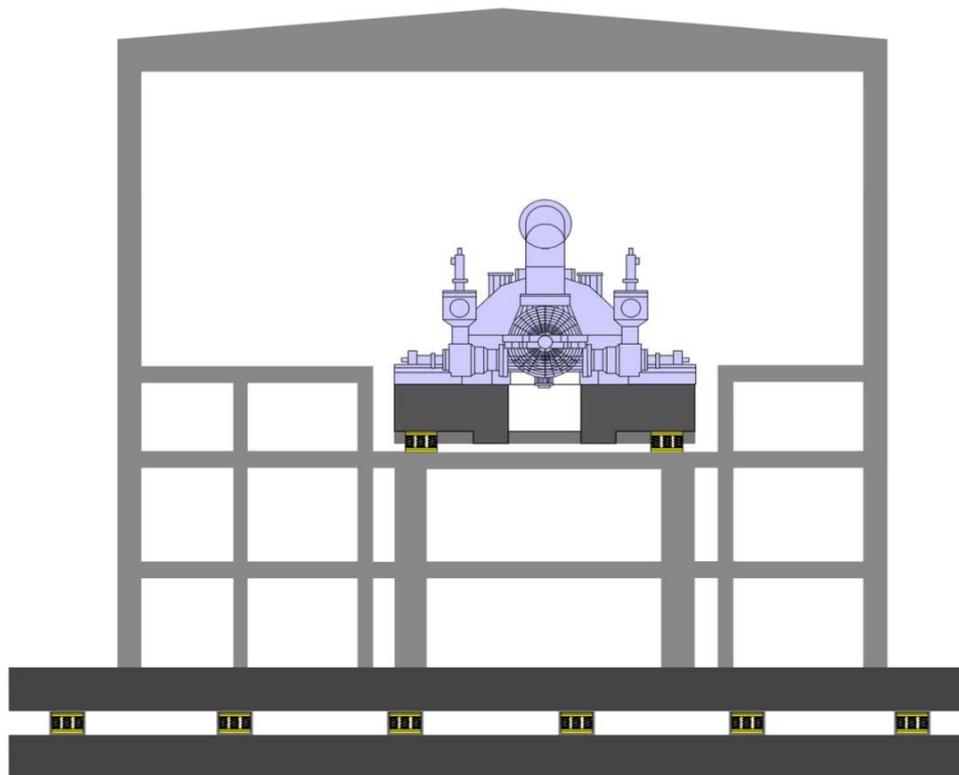


Рисунок 3. – Схема С – Двойная система сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата
Figure 3. - Scheme C - Double turbine unit foundation seismic isolation system

Для расчёта спектров в схеме А было выбрано 2 уровня: уровень фундаментной плиты и уровень установки турбоагрегата. В схеме В к уровням схемы А добавился уровень установки сейсмоизолирующих устройств (для анализа работы сейсмоизоляторов). В схеме С к уровням схемы В добавляется уровень дополнительной нижней фундаментной плиты, для анализа поведения сейсмоизоляторов нижнего слоя. На каждом уровне для осреднения результатов расчёта было взято по 3 точки.

Динамические расчёты проводились в MSC/NASTRAN- пакет программ общего назначения для решения инженерных задач методом конечных элементов в форме метода перемещений.

При проведении сейсмических расчётов в программе MSC/NASTRAN использовался метод большой массы (Large Mass Method). Идея метода состоит в том, чтобы перейти от задания кинематического воздействия в виде сейсмического ускорения $a(t)$, к заданию динамического силового воздействия вида $F(t)$.

Основным достоинством данного метода, по сравнению с заданием сейсмического ускорения $a(t)$, является отсутствие необходимости задания начальных условий (например, начальной скорости) с большой точностью. В общем случае начальная скорость неизвестна или же трудноопределима. В методе большой массы допустимо задавать нулевые начальные условия. В случае, если задать такие условия при кинематическом воздействии, а также в случае плохо сбалансированной акселерограммы, расчётная модель может иметь достаточно больше конечные перемещения, так называемый дрейф.

Все модели рассчитывались на синтезированную акселерограмму с пиковым ускорением по грунту 0.24g. Направление общей системы осей X-горизонтально по оси фундамента турбоустановки, Z вертикально вверх.

С целью обобщения выводов и результатов, полученных в работе, и в отсутствии привязки их к конкретным грунтовым условиям, вычисленные по ASCE 4-16 значения динамических жесткостей грунтов варьировались в 2 и в 5 раз.

Затухание в системе моделировалось следующим образом. Общее затухание в системе было принято 7%. Далее была применена методика Релея с занулением коэффициента α (рекомендация для низкочастотных систем с пружинной изоляцией). Общая матрица демпфирования состоит из суммы матрицы затухания Релея и матрицы затухания, полученной из

учёта сосредоточенных демпферов. Сосредоточенные демпферы под фундамента турбоагрегата моделировались двухузловыми элементами вязкого трения.

При проведении расчётов использовались модели двух типов существующих сейсмоизоляторов: пружинные сейсмоизоляторы (рисунок 4, А) и маятниковые скользящие опоры, или слайдерные опоры (рисунок 4, Б). Слайдеры имеют высокую вертикальную жёсткость $k_z=2000000$ кН/м, при относительно низкой горизонтальной $k_{x,y}=300$ кН/м. Также в модели с двойной системой сейсмоизоляции использовалось два промежуточных варианта сейсмоопор с различными вертикальными и горизонтальными жесткостными характеристиками, данные представлены в таблице 1. Подробнее о типах сейсмоизоляторов можно прочитать в статье [32] и в приложении В, СП 14.13330.2018 [34] (Russian Building Code SP 14.13330.2018 Seismic building design code).

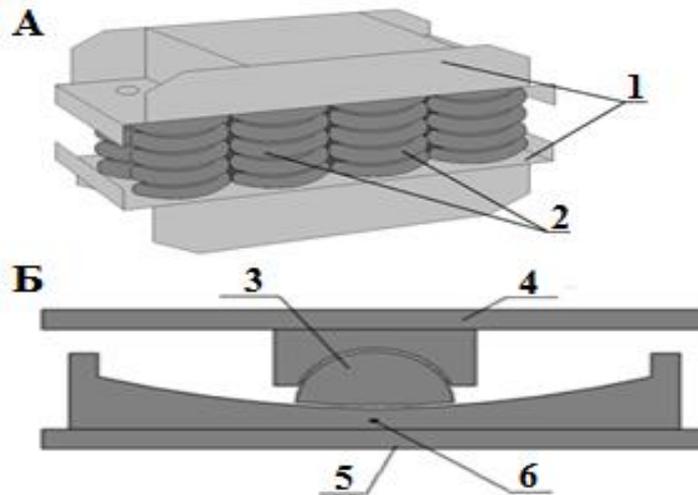


Рисунок 4. – Сейсмоизоляторы

4, А - пружинная опора (1-винтовые пружины; 2-опорные пластины, закрепляемые к субструктуре и суперструктуре);

4, Б - слайдерная опора (3-сферический шарнирный ползун; 4-верхняя стальная пластина; 5- точка поворота; 6-нижняя стальная пластина со сферической вогнутой поверхностью)

Figure 4. - Seismic isolators

4, А - spring unit (1-coil springs; 2-support plates fixed to the substructure and superstructure);

4, В - slider support (3-spherical articulated slider; 4-upper steel plate; 5-pivot point; 6-lower steel plate with a spherical concave surface)

Таблица 1. Вертикальные и горизонтальные жёсткости нижних сейсмоопор
Table 1. Vertical and horizontal stiffnesses of lower seismic isolators

Схема С	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
K_z , кН/м	20000	20000	20000	2000000
$K_{x,y}$,кН/м	3000	1000	300	300

При использовании слайдерных опор важно помнить о наличии некоторых их особенностей. Во-первых, слайдерная опора это элемент сухого трения затухание в которой зависит от множества факторов. После прохождения землетрясения изолированная слайдерами конструкция может полностью не вернуться в начальное положение. Во-вторых, жёсткость слайдерных опор нелинейно зависит от перемещения. В данной работе решалась линеаризованная задача, нелинейная работа слайдерных опор не учитывалась. Наконец, при использовании изоляторов данного типа отсутствует изоляция по вертикали (в связи с большой вертикальной жёсткостью элементов). Более того, при высоких уровнях вертикальных сейсмических ускорений возможен отрыв по изолирующему слою с последующим соударением. Слайдерные опоры не воспринимают растягивающие нагрузки.

Основным параметром определяющим сейсмостойкость турбоагрегата является горизонтальное ускорение в осевом направлении (по оси X расчётных моделей) на уровне установки турбины. Это связано с прочностью упорного подшипника - всю инерционную нагрузку

от валопровода при сейсмическом воздействии по оси агрегата воспринимает один упорный подшипник ротора турбоустановки.

3 Results and Discussion

Общее сравнение трёх предложенных моделей производится для грунтов со средними динамическими жесткостями. Анализ проводился по спектрам для оборудования с 5% затуханием. Для наглядности результаты расчётов сведены в таблицу 2.

Строки в таблице 2 и графики на рисунках 5-7 соответствуют шести различным расчётным моделям:

1. Модель без сейсмоизоляции («Схема А»);
2. Классический вариант виброизолированного фундамента турбоагрегата («Схема В»);
3. Модель с двойной системой сейсмоизоляции (ДСС) с жёсткостями сейсмоизоляторов нижнего слоя: вертикальной $k_z=20000$ КН/м и горизонтальной $k_{x,y}=3000$ КН/м («Схема С, вариант 1»);
4. Модель с ДСС с жёсткостями сейсмоизоляторов нижнего слоя: $k_z=20000$ КН/м и $k_{x,y}=1000$ КН/м («Схема С, вариант 2»);
5. Модель с ДСС с жёсткостями сейсмоизоляторов нижнего слоя: $k_z=20000$ КН/м и $k_{x,y}=300$ КН/м («Схема С, вариант 3»);
6. Модель ДСС с жёсткостями сейсмоизоляторов нижнего слоя: $k_z=2000000$ КН/м и $k_{x,y}=300$ КН/м («Схема С, вариант 4»);

На рисунках 5-7 представлены спектры отклика с 5% затуханием по трём осям (x , y и z) для всех анализируемых расчётных моделей, при средних динамических жесткостях грунтов основания.

Результаты расчётов модели без сейсмоизоляции (схема А) показали горизонтальные ускорения в осевом направлении на уровне фундаментной плиты 0.47g, на уровне фундамента турбоустановки 0.36g (смотри таблицу 2, рисунок 5). По сравнению с исходным воздействием произошло усиление в 1.5 раза. Для упорного подшипника турбины сейсмостойкого исполнения предельным значением горизонтального сейсмического ускорения является значение (0.2-0.3)g. Максимальное горизонтальное смещение фундамента турбоустановки относительно нижней фундаментной плиты составило 44 мм.

Анализ результатов расчёта классического виброизолированного фундамента турбоагрегата (схема В) показал усиление горизонтальных ускорений в осевом направлении по грунту с 0.24g до 0.34g, далее усиление от фундаментной плиты до отметки установки изоляторов с 0.34g до 0.51g, а далее ослабление в изолирующем слое с 0.51g до 0.33g. (смотри таблицу 2, рисунок 5) Таким образом ускорение на уровне фундамента турбоустановки составляет 0.33g, Происходит усиление ускорений по сравнению с исходным воздействием в 1.4 раза. Максимальные взаимные сейсмические горизонтальные смещения в пружинных сейсмоопорах составляют 62 мм, при этом допустимое предельное значение для опор данного типа - 65 мм.

Модель с двойной системой сейсмоизоляции (схема С) рассчитывалась с 4-мя различными вариантами соотношения вертикальной и горизонтальной жесткостей нижних сейсмоопор (от моделей пружинных изоляторов (вариант 1) до слайдеров (вариант 4)).

Наиболее благоприятный результат получен при четвёртом варианте соотношения жесткостей (нижние сейсмоизолирующие устройства моделировались с жёсткостью, соответствующей слайдерным опорам). На отметке нижней фундаментной плиты происходит усиление по грунту - значение сейсмического ускорения 0.43g. Ускорение на отметке верхней фундаментной плиты 0.11g. Происходит резкое ослабление в сейсмоизолирующем слое. На отметке фундамента турбоустановки сейсмическое ускорение в осевом направлении составляет 0.12g, происходит ослабление по сравнению с исходным воздействием в 2 раза (смотри таблицу 2, рисунок 5). По спектрам видно, что они заметно «срезаются» и пиковые значения ускорений смещаются с 10 Гц, приблизительно до 0.3-1 Гц (рисунки 5-7).

При этом взаимные горизонтальные смещения в нижних (слайдерных) опорах составляют 24 см, при допустимом для изоляторов значении 30 см, в верхних пружинных сейсмоопорах не превышают 24 мм.

Сравнивая результаты расчётов всех представленных моделей очевидно, что предпочтительным является конструктивное исполнение машзала с двойной

сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата, т.е. тот вариант, когда здание турбины в целом изолируется слайдерными опорами, а фундамент турбоустановки пружинными опорами.

Сравнивая результаты расчётов всех представленных моделей очевидно, что минимальные значения сейсмических ускорений на отметке фундамента турбоустановки достигаются при использовании двойной системы сейсмоизоляции с 4-м вариантом соотношения вертикальных и горизонтальных жесткостей сейсмоизоляторов нижнего ряда (смотри таблицу 2). Данное соотношение ($k_z = 2000000$ КН/м и $k_{x,y} = 300$ КН/м) соответствует слайдерным опорам (маятниковым скользящим опорам). В данном случае горизонтальные сейсмические ускорения в осевом направлении на отметке фундамента турбоустановки составляют 0.12g, коэффициент усиления равен 0.5.

Графики взаимных сейсмические перемещения в сейсмоизоляторах для данной модели, представленные на рисунках 8 и 9, свидетельствуют о «раскачивании» модели к концу землетрясения, однако максимальные значения сейсмических деформаций в изоляторах не превышают допустимых значений (для слайдерных опор максимальные горизонтальные перемещения составляют около 25 см, допустимое значение для опор выбранного типа ~30см), для пружинных опор максимальное горизонтальное смещение не превышает 25 мм (максимально-допустимое 32 мм).

Стоит отметить, что самый неблагоприятный вариант также вариант с двойной сейсмоизоляцией, с пружинными опорами в нижнем и верхнем слое. В данном случае обе изолированные части имеют близкую друг к другу собственную частоту- около 1 Гц, т.е. система попала в зону совпадения резонансов верхней и нижней сейсмоизолированных частей. В результате этого горизонтальное ускорение в осевом направлении на уровне фундамента турбоустановки усиливается в 1.8 раз, до 0.44g.

Таблица 2. Результаты расчётов максимальных ускорений для моделей с различными СИ
Table 2. The results of calculations of maximum accelerations for models with different SI

Схема	f*, Гц	Нижней фунда ментной плите**			На фундаментной плите			Под виброизоляторами			На фундаменте турбоагрегата		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
A	1.1- 1.4	-	-	-	0.47	0.5	0.29	-	-	-	0.36	0.34	0.38
B	1.0- 1.3	-	-	-	0.34	0.38	0.24	0.52	0.5	0.25	0.33	0.28	0.33
C.1	0.7- 1.1	0.43	0.42	0.27	0.23	0.25	0.31	0.29	0.26	0.25	0.44	0.35	0.47
C.2	0.5- 0.8	0.43	0.42	0.27	0.16	0.16	0.29	0.2	0.24	0.24	0.27	0.24	0.46
C.3	0.3- 0.4	0.43	0.42	0.27	0.11	0.12	0.29	0.13	0.14	0.24	0.13	0.13	0.46
C.4	0.3- 0.4	0.43	0.42	0.27	0.11	0.11	0.28	0.12	0.13	0.26	0.12	0.13	0.31

f* - диапазон в который входят первые частоты по x и y.

нижняя фундаментная плита** - дополнительная литы введённая в расчётную модель для расчёта схемы с двойной сейсмоизоляцией.

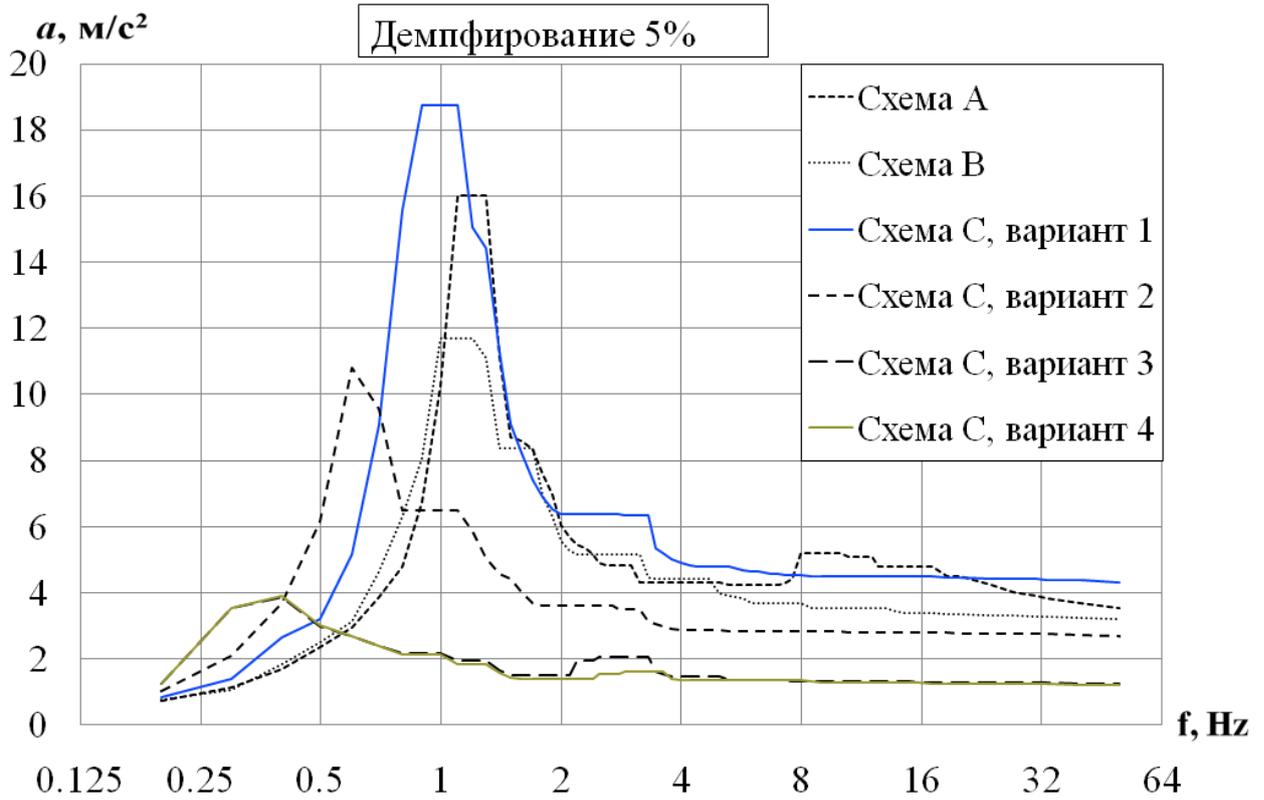


Рисунок 5. – Спектр отклика горизонтальный по оси турбоагрегата на отметке его установки
Figure 5. - The response spectrum horizontal along the axis of the turbine unit at the installation mark

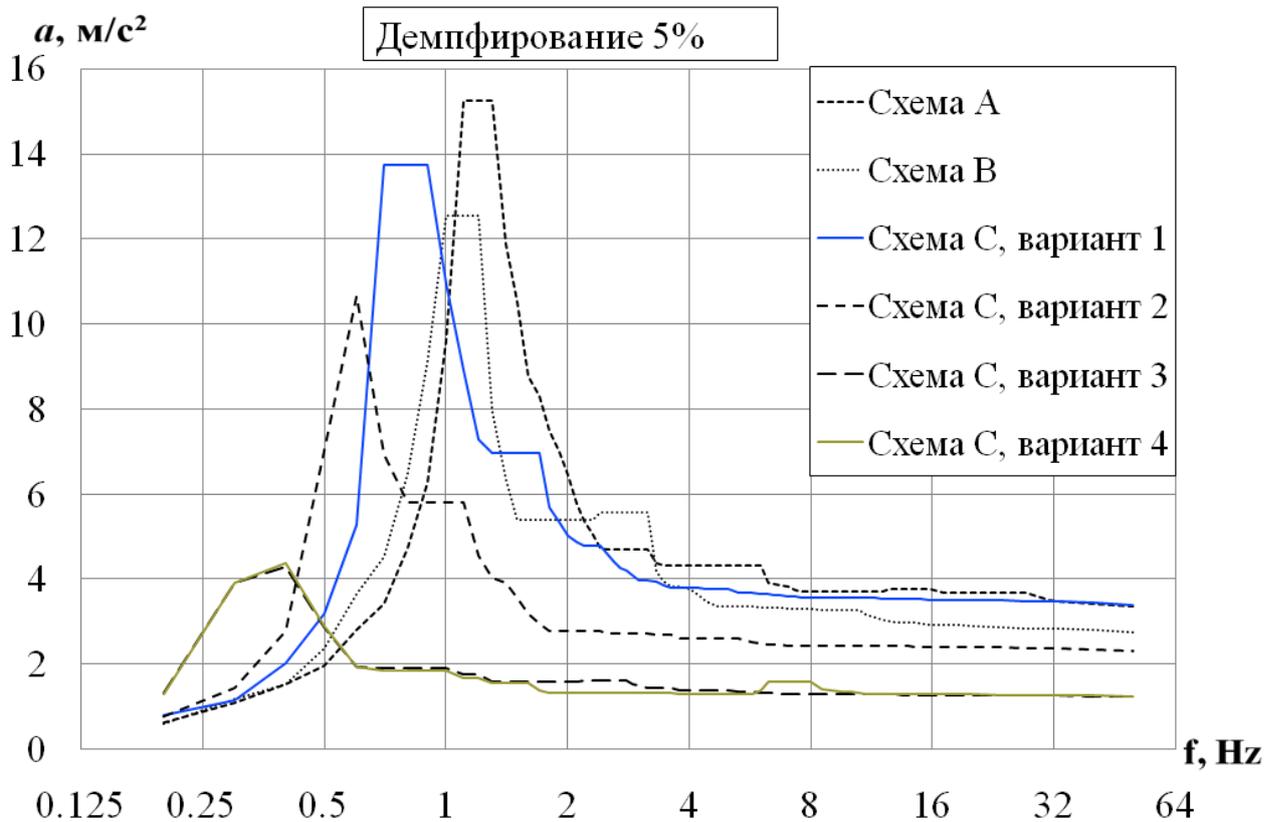


Рисунок 6. – Спектр отклика горизонтальный поперечно оси турбоагрегата на отметке его установки
Figure 6. - The horizontal response spectrum transverse to the axis of the turbine unit at the installation mark

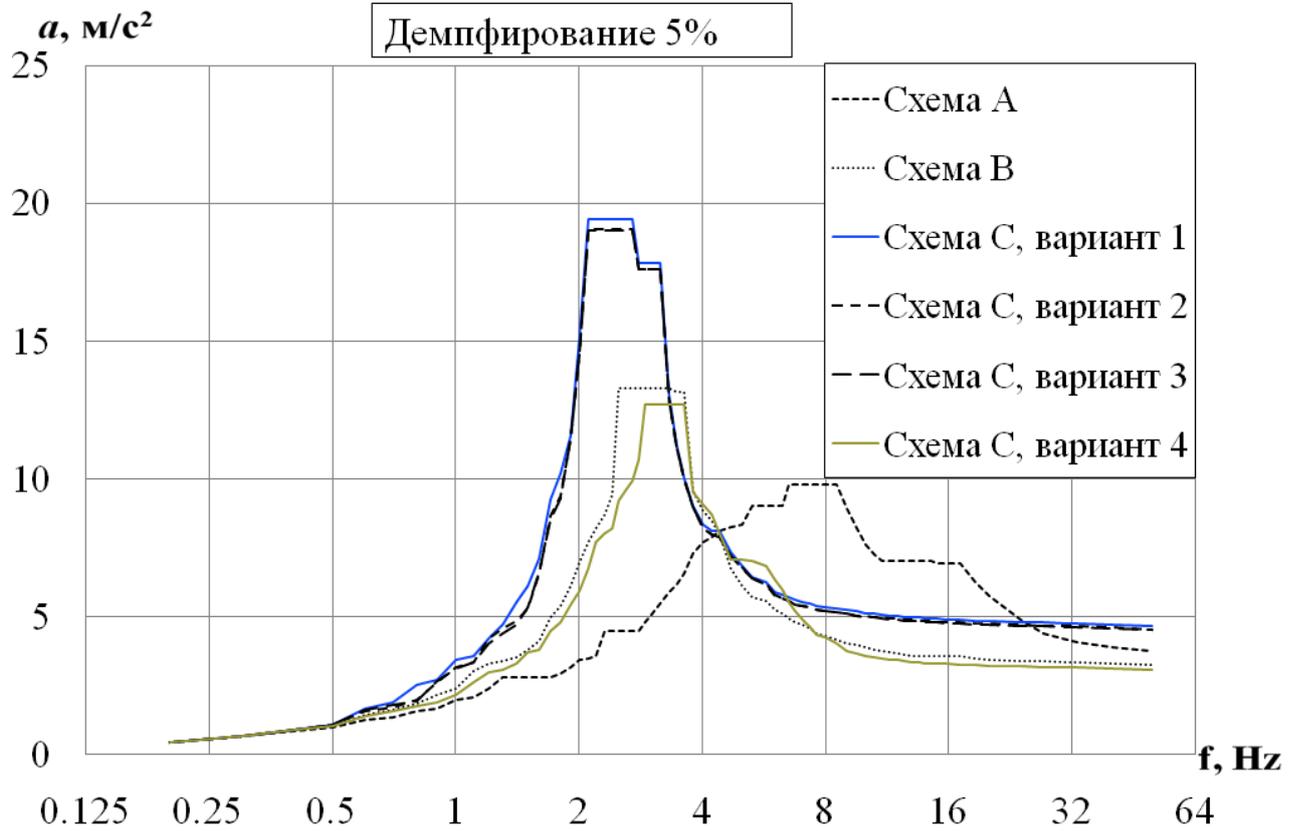


Рисунок 7. – Спектр отклика вертикальный на отметке установки турбоагрегата
Figure 7. - The response spectrum is vertical at the installation mark of the turbine unit

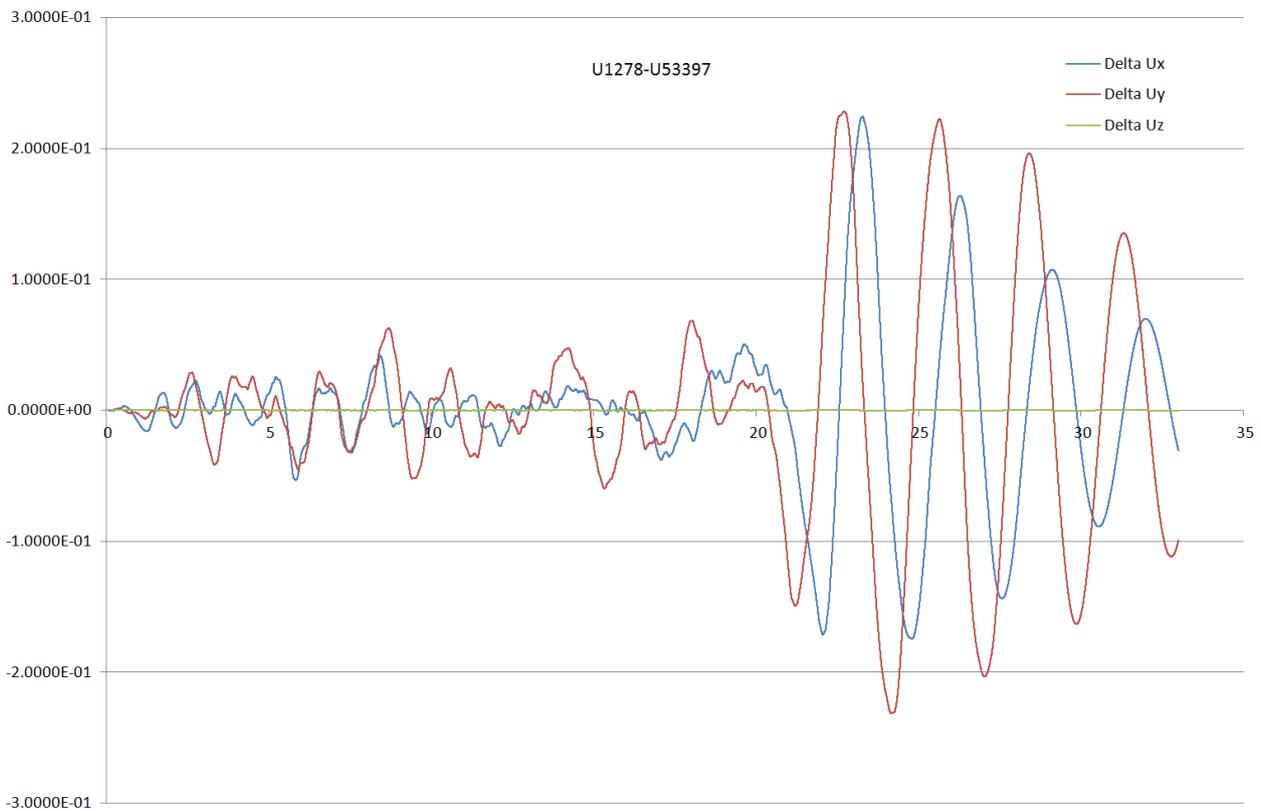


Рисунок 8 – Взаимные сейсмические перемещения для узлов №1278 и № 53397 (нижний сейсмоизолятор)
Figure 8 - Mutual seismic movements for nodes No. 1278 and No. 53397 (lower seismic isolator)

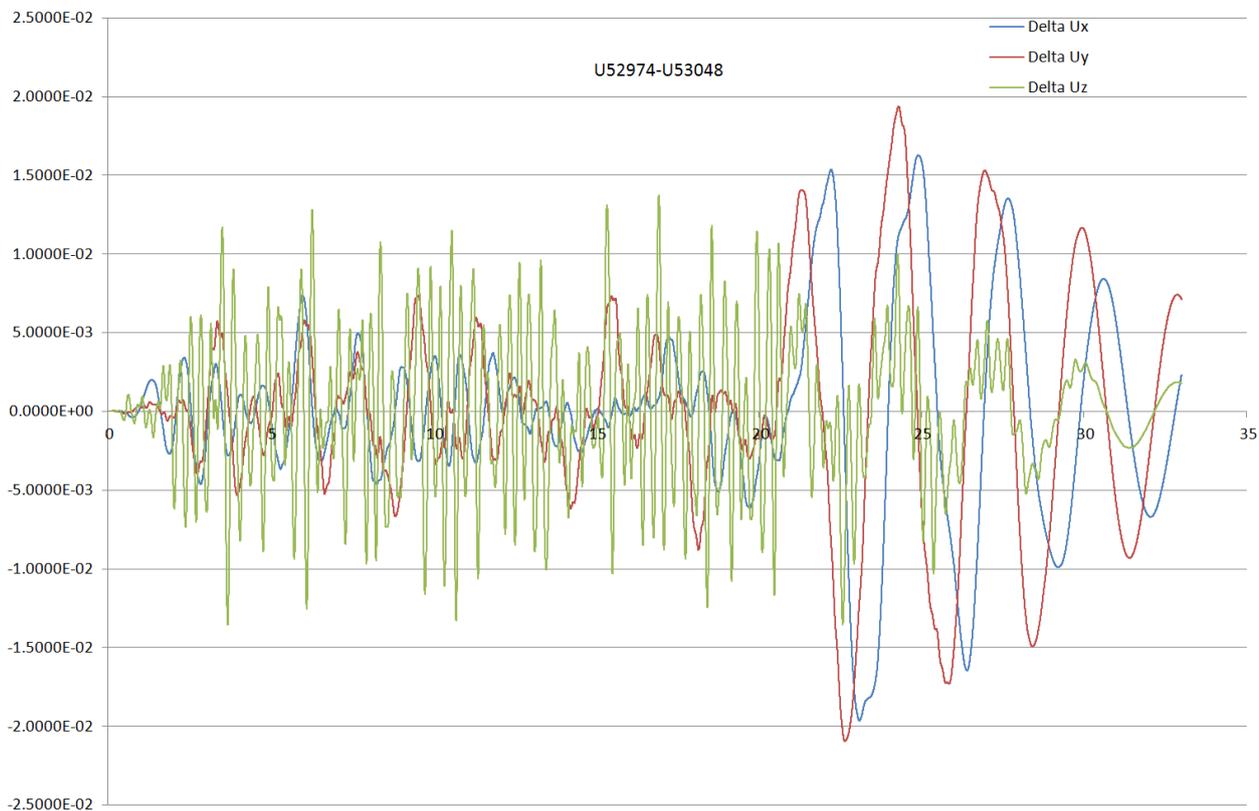


Рисунок 9 – Взаимные сейсмические перемещения для узлов №53048 и № 52974 (верхний сейсмоизолятор)

Figure 9 - Mutual seismic movements for nodes No. 53048 and No. 52974 (upper seismic isolator)

4 Conclusions

По результатам проведённого научного исследования можно сделать несколько выводов:

1. Обзор и сравнительный анализ современных литературных источников показал отсутствие в мировой научной литературе информации о решении проблемы сейсмостойкости виброизолированных фундаментов турбоагрегатов;

2. Предложено инновационное конструктивное решение здания турбины - система двойной сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата (постановка на сейсмоизоляторы всего здания турбины, содержащего в своём составе виброизолированный фундамент фундамента турбоагрегата);

3. Выполнена серия вариантных расчётов здания турбины с использованием классических конструктивных решений и инновационного варианта с двойной сейсмоизоляцией фундамента турбоагрегата с варьированием жесткостных параметров сейсмоизоляторов нижнего слоя;

4. В результате сравнительного анализа результатов расчётов здания турбины с различными системами сейсмоизоляции определён наилучший вариант по величине максимальных сейсмических ускорений на уровне фундамента турбоустановки. Им является вариант с двойной сейсмоизоляцией, с 4-м соотношением вертикальной и горизонтальной жесткостей нижних сейсмоизоляторов. Жесткостные характеристики нижних сейсмоизоляторов в данном случае соответствуют характеристикам слайдерных опор;

5. Для классической конструктивной схемы виброизолированного фундамента турбоагрегата (расчётная схема В) пиковые ускорения по горизонтальным направлениям по осям X и Y были получены соответственно 0.33g и 0.28g. При таких значительных ускорениях, во-первых, для упорного подшипника сейсмические напряжения могут превысить максимально-допустимые значения, после чего произойдёт разрушение подшипника. Во-вторых, при данных ускорениях появятся горизонтальные сейсмические силы, которые могут превысить силу трения по регулировочным пластинам, вследствие чего произойдёт проскальзывание. В этом случае необходимо использование пружинных опор с креплением анкерными болтами к железобетонным конструкциям.

6. При использовании в схеме с двойной сейсмоизоляцией одинаковых пружинных опор и на уровне фундаментной плиты, и на уровне фундамента турбоустановки (схема С, вариант 1) происходит совпадение резонансов верхней и нижней изолированной частей, в связи с близкими частотами обоих уровней. При резонансе возникают горизонтальные сейсмические ускорения 0.44g по оси X и 0.35g по оси Y. Это самый неблагоприятный вариант. Чтобы уйти от совпадения резонансов необходимо поменять частоту одного из двух уровней. Учитывая, что верхние пружинные опоры выполняют в первую очередь функцию виброизоляции, и лишь в момент землетрясения ещё и функцию сейсмоизоляторов, то повышать их вертикальную жёсткость нецелесообразно. При увеличении вертикальной жёсткости нижних сейсмоизоляторов (находящихся между фундаментными плитами машинного зала) получается более низкая частота для всего машинного зала в целом и, как следствие, снижение пиковых сейсмических ускорений на уровне фундамента турбоустановки по причине ухода от совпадения резонансов.

5 Acknowledgements

Автор статьи выражает искреннюю благодарность главному специалисту по динамике сооружений АО «АТОМПРОЕКТ» Бабскому Александру Евгеньевичу (Babskiy Aleksandr Evgenevich, JSC ATOMPPOEKT, St. Petersburg, Russian Federation) за помощь, оказанную при выполнении данной научно-исследовательской работы и при подготовке статьи.

This research work was supported by the Academic Excellence Project 5-100 proposed by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation.

References

1. Smirnov V.I. Seysmoizolyatsiya -innovatsionnaya tekhnologiya zashchity vysotnykh zdaniy ot zemletryaseny v Rossii i za rubezhom [Seismic isolation - an innovative technology for protecting high-rise buildings from earthquakes in Russia and abroad]. Sb.80 let TsNIISKim. V.A.Kucherenko. 2007. Pp. 24-32. (rus)
2. Smirnov V.I. Sovremennaya zashchita ot zemletryaseny [Modern protection against earthquakes]. High rise buildings. 2008. No 4. Pp. 110-115. (rus)
3. Ayzenberg Ya.M. i dr. Adaptivnyye sistemy seysmicheskoy zashchity sooruzheniy [Adaptive seismic protection systems for structures]. M.: Nauka. 1978. (rus)
4. Hiraki, T., Nagata, S., Kanazawa, K., Imaoka, T., Nakayama, T., Umeki, Y., Jimbo, M., Shimizu, H. Development of an evaluation method for seismic isolation systems of nuclear power facilities (Part 9), ultimate properties of full-scale lead rubber bearings based on breaking test. American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP. 2014. DOI:10.1115/PVP2014-29001.
5. Chen, J., Zhao, C., Xu, Q., Yuan, C. Seismic analysis and evaluation of the base isolation system in AP1000 NI under SSE loading. Nuclear Engineering and Design. 2014. DOI:10.1016/j.nucengdes.2014.07.030.
6. Anand, V., Satish Kumar, S.R. Seismic Soil-structure Interaction: A State-of-the-Art Review 2018. DOI:10.1016/j.istruc.2018.10.009
7. Kumar, M., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C. An advanced numerical model of elastomeric seismic isolation bearings. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2014. DOI:10.1002/eqe.2431.
8. Kumar, M., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C. Extreme earthquake response of nuclear power plants isolated using sliding bearings. Nuclear Engineering and Design. 2017. 316. Pp. 9–25. DOI:10.1016/j.nucengdes.2017.02.030.
9. Kumar, M., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C. Seismic isolation of nuclear power plants using elastomeric bearings. 2015.
10. Kumar, M., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C. Response of base-isolated nuclear structures to extreme earthquake shaking. Nuclear Engineering and Design. 2015. DOI:10.1016/j.nucengdes.2015.06.005.
11. Kumar, M. Seismic isolation of nuclear power plants using sliding isolation bearings. 2015.
12. Medel-Vera, C., Ji, T. Seismic protection technology for nuclear power plants: A systematic review 2015. DOI:10.1080/00223131.2014.980347
13. Politopoulos, I., Sergis, I., Wang, F. Floor response spectra of a partially embedded

- seismically isolated nuclear plant. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2015. DOI:10.1016/j.soildyn.2015.06.017.
14. Sayed, M.A., Go, S., Cho, S.G., Kim, D. Seismic responses of base-isolated nuclear power plant structures considering spatially varying ground motions. *Structural Engineering and Mechanics*. 2015. DOI:10.12989/sem.2015.54.1.169.
 15. Salimi Firoozabad, E., Jeon, B.G., Choi, H.S., Kim, N.S. Seismic fragility analysis of seismically isolated nuclear power plants piping system. *Nuclear Engineering and Design*. 2015. DOI:10.1016/j.nucengdes.2014.12.012.
 16. Zhou, Z., Wong, J., Mahin, S. Potentiality of Using Vertical and Three-Dimensional Isolation Systems in Nuclear Structures. *Nuclear Engineering and Technology*. 2016. DOI:10.1016/j.net.2016.03.005.
 17. Kostarev, V. V., Petrenko, A. V., Vasilyev, P.S. An advanced seismic analysis of an NPP powerful turbogenerator on an isolation pedestal. *Nuclear Engineering and Design*. 2007. DOI:10.1016/j.nucengdes.2006.10.004.
 18. Chasalevris, A. Stability and Hopf bifurcations in rotor-bearing-foundation systems of turbines and generators. *Tribology International*. 2020. DOI:10.1016/j.triboint.2019.106154.
 19. Yang, Y., Bashir, M., Li, C., Wang, J. Analysis of seismic behaviour of an offshore wind turbine with a flexible foundation. *Ocean Engineering*. 2019. DOI:10.1016/j.oceaneng.2019.02.077.
 20. Wang, P., Zhao, M., Du, X., Liu, J., Xu, C. Wind, wave and earthquake responses of offshore wind turbine on monopile foundation in clay. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018. DOI:10.1016/j.soildyn.2018.04.028.
 21. Najafijozani, M., Becker, T.C., Konstantinidis, D. Evaluating adaptive vertical seismic isolation for equipment in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*. 2020. DOI:10.1016/j.nucengdes.2019.110399.
 22. Yu, C.C., Bolisetti, C., Coleman, J.L., Kosbab, B., Whittaker, A.S. Using seismic isolation to reduce risk and capital cost of safety-related nuclear structures. *Nuclear Engineering and Design*. 2018. DOI:10.1016/j.nucengdes.2017.11.016.
 23. Jeong, Y.S., Baek, E.R., Jeon, B.G., Chang, S.J., Park, D.U. Seismic performance of emergency diesel generator for high frequency motions. *Nuclear Engineering and Technology*. 2019. DOI:10.1016/j.net.2019.03.012.
 24. Ismail, M. Seismic isolation of structures. Part I: Concept, review and a recent development. *Hormigón y Acero*. 2018. DOI:10.1016/j.hya.2017.10.002.
 25. Ismail, M. Seismic isolation of structures, Part II: A case study using the RNC isolator. *Hormigón y Acero*. 2018. DOI:10.1016/j.hya.2017.12.001.
 26. Saitoh, M. An external rotary friction device for displacement mitigation in base isolation systems. *Structural Control and Health Monitoring*. 2014. DOI:10.1002/stc.1560.
 27. Calvi, P.M., Calvi, G.M. Historical development of friction-based seismic isolation systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018. DOI:10.1016/j.soildyn.2017.12.003.
 28. Warn, G.P., Ryan, K.L. A review of seismic isolation for buildings: Historical development and research needs 2012. DOI:10.1080/00223131.2014.980347.
 29. Vatin, N.I., Ivanov, A.Y., Rutman, Y.L., Chernogorskiy, S.A., Shvetsov, K. V. Earthquake engineering optimization of structures by economic criterion. *Magazine of Civil Engineering*. 2017. DOI:10.18720/MCE.76.7.
 30. Dražić, J., Vatin, N. The Influence of Configuration on to the Seismic Resistance of a Building. *Procedia Engineering*. 2016. DOI:10.1016/j.proeng.2016.11.788.
 31. Muravyeva, L., Vatin, N. Risk assessment for a main pipeline under severe soil conditions on exposure to seismic forces. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.635-637.468.
 32. Tarasov, V., Baranovskiy, M., Redkin, A., Sokolov, E., Stepanov, A. Seismic isolation systems. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2016. 43(4). Pp. 117–140. DOI:10.18720/CUBS.43.9. URL: <https://unistroy.spbstu.ru/article/2016.43.9> (date of application: 24.07.2020).
 33. Tarasov, V., Baranovskii, M., Pavlushkina, Yu., Meleshchenkov, L., Shakirov, R., Imeskenov, T., Zagidullina, E. Comparison of the seismic calculation results according to SNiP II-7-81* 1995 and SP 14.13330.2014. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015. 28(1). Pp. 6-31. DOI: 10.18720/CUBS.28.4. URL: <https://unistroy.spbstu.ru/en/article/2015.28.4/> (date of application: 24.07.2020).

Tarasov, V.A.

Double Seismic Insulation System of Turbine Unit Foundation;

2020; *Construction of Unique Buildings and Structures*; Volume 91 Article No 9101. doi: 10.18720/CUBS.91.1

34. Russian Building Code SP 14.13330.2018 Seismic building design code, 2018 (rus)