

УДК 699.841

DOI [10.37153/2618-9283-2021-5-36-49](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-36-49)

Сейсмозащита и сейсмоизоляция зданий и сооружений

Сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов

Бабский Александр Евгеньевич¹, Тарасов Владимир Александрович²

¹Санкт-Петербургский филиал АО «Атомэнергопроект» – «Санкт-Петербургский проектный институт». Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский филиал АО «Атомэнергопроект» – «Санкт-Петербургский проектный институт». Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: Фундамент турбоагрегата – специальная строительная конструкция, объединяющая части турбоагрегата в единую систему и служащая для восприятия статических и динамических нагрузок. Количество проектируемых и строящихся электростанций в районах с высоким уровнем сейсмичности велико.

Сейсмоизоляция – эффективнейший способ достижения сейсмостойкости зданий и сооружений, находящегося в них оборудования. Достижения сейсмостойкости фундамента турбоагрегата электростанции путём применения разнообразных конструктивных решений и систем сейсмоизоляции является актуальным вопросом.

Динамические расчеты проводятся в программном комплексе Nastran [6] методом прямого интегрирования уравнений движения с применением метода конечных элементов. Основными критериями сейсмостойкости виброизолированного фундамента турбоагрегата приняты величины максимальных сейсмических ускорений в осевом направлении на отметке установки турбоагрегата, а также величины максимальных сейсмических деформаций изоляторов виброизолированного фундамента.

В ходе исследования выполнены вычислительные эксперименты, результаты которых позволяют оценить влияние на сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов различного частотного состава сейсмического воздействия, использования виброизоляторов различной жёсткости, учёта частотной зависимости характеристик вязких демпферов и использования различных методов расчёта и расчётных схем.

Ключевые слова: виброизолированный фундамент турбоагрегата, спектры ответа, сейсмостойкость, землетрясение, сейсмоизоляция, динамика сооружений, сейсмический расчет

Для цитирования: Бабский А.Е., Тарасов В.А. Сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 5. С. 36-49. DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-36-49](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-36-49)

@ Бабский А.Е., Тарасов В.А., 2021

Seismic safety and seismic isolation of buildings

Seismic stability of vibration-insulated turbine foundations

Aleksandr E. Babsky¹, Vladimir A. Tarasov²

¹ JSC Atomenergoproekt St. Petersburg Branch – St. Petersburg Design Institute.
Saint Petersburg, Russian Federation

² JSC Atomenergoproekt St. Petersburg Branch – St. Petersburg Design Institute
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract: The turbogenerator set foundation is a special building structure that unites parts of the turbine and generator unit into a single system and it is used for static and dynamic loads accommodation. The number of designed and constructed power plants in high seismic level areas is large.

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.

Dynamic calculations were performed in Nastran software using time history analysis and the finite element method. The main criteria for the seismic resistance of a vibration-insulated turbine foundation are the values of the maximum seismic accelerations in the axial direction at the level of the turbine installation and the values of vibration-insulated foundation maximum seismic deformations of vibration isolators.

The results of computational experiments during investigations allow to estimate the effect of the following factors on seismic resistance of vibration isolated turboset foundations:

- different frequency composition of seismic impact;
- use of vibration isolators of different stiffness;
- accounting of frequency dependence of viscous dampers characteristics;
- use of different calculation methods and computational models.

Keywords: vibration-insulated turbogenerator set foundation, response spectra, seismic stability, earthquake, seismic isolation, structural dynamics, seismic calculation

For citation: Babsky A.E., Tarasov V.A. Seismic stability of vibration-insulated turbine foundations. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* = *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2021, no. 5, pp. 36-49. (In Russian)

DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-36-49](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-36-49)

ВВЕДЕНИЕ

Несколько проектов АЭС, актуальных на сегодняшний день, реализуются на площадках, характеризующихся высоким уровнем сейсмичности и значительными уровнями ПЗ и МРЗ. По Российским нормам [1] АЭС должна обеспечивать выработку (выдачу) электрической и тепловой энергии вплоть до уровня ПЗ включительно. В настоящее время на площадках с уровнем ПЗ больше 0.1g проектируются станции: Пакш-2, Аккую, Руппур, Эль-Дабаа. Геология многих площадок из указанных выше проектов представлена слабыми грунтами с модулем деформации 20 МПа и менее. На площадках могут присутствовать грунты, склонные к разжижению при сейсмике.

Данная работа посвящена исследованию влияния различных факторов на сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов и поиску конструктивных решений, повышающих их уровень сейсмостойкости.

Существует два метода обоснования сейсмостойкости: опытный и расчётный. Турбоагрегаты массой от 100 до 10000 т практически невозможно испытать даже на уникальных стендах. Поэтому для виброизолированных фундаментов мощных турбоагрегатов возможно использование лишь расчётного метода обоснования их сейсмостойкости. В связи с этим, актуальной задачей является определение спектров сейсмических ускорений, а также сейсмических перемещений на отметке установки турбоагрегата, а также поиск конструктивных возможностей для их снижения [2].

Принципиальная схема виброизолированного фундамента турбоагрегата в составе здания турбины представлена на рисунке 1. Турбоагрегат, соединённый с конденсаторами, устанавливается на виброизолированный фундамент. Конденсаторы снизу устанавливаются на пружинные опоры. Уровень 8 соответствует уровню установки турбоагрегата.

Для проведения вычислительных экспериментов использовалась конечноэлементная модель виброизолированного фундамента турбоагрегата в составе здания турбины со следующими параметрами:

- быстроходный турбоагрегат К-1200, мощностью 1200 МВт, 3000 об/мин, производитель АО «Силовые машины» («ЛМЗ»+«Электросила»);
- общая масса виброизолированного фундамента турбоагрегата с оборудованием составляет 8285 т;
- здание турбины имеет размеры в плане 124x73 м, массу 154400 т. Бетон строительных конструкций класса В25.

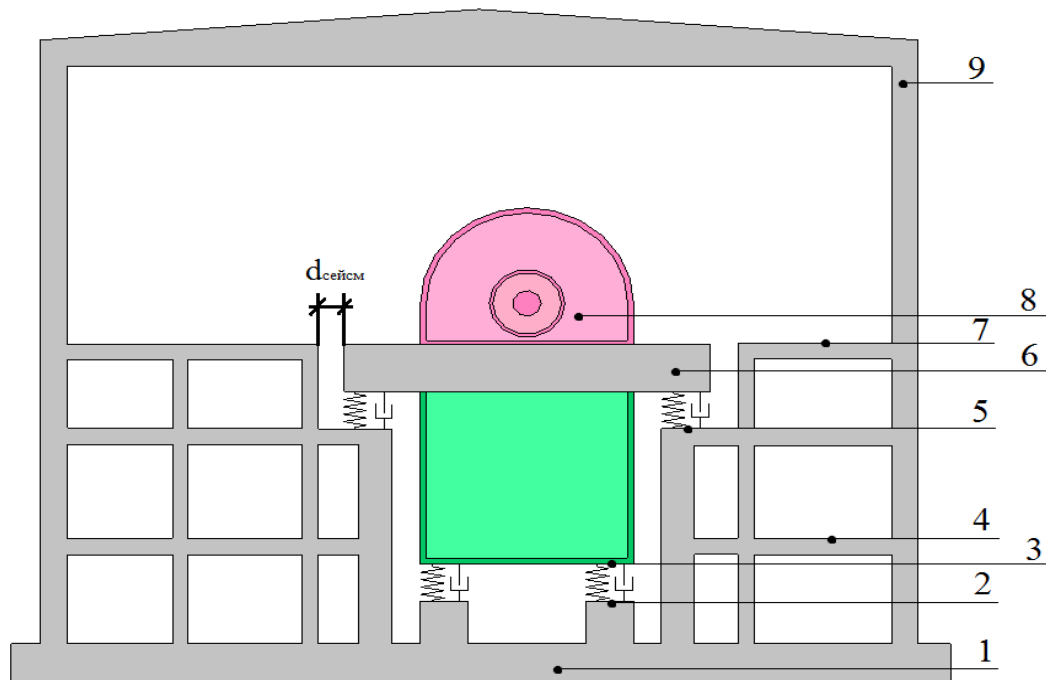


Рисунок 1 – Поперечный разрез здания турбины с виброизолированным фундаментом турбоагрегата

Figure 1 – Cross section of the turbine building with the vibration-insulated turbine foundation

Первая серия расчётов содержит вычислительные эксперименты, результаты которых характеризуют влияние учитываемой величины демпфирования в грунтах основания на сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов. Проведены расчёты полностью аналогичных расчётных схем на грунтах сильной сжимаемости с различными величинами относительного демпфирования. Для первой расчётной схемы динамические характеристики грунтов основания определены по ASCE 4-16 [9] с учётом ограничений демпфирования $\xi_z=0.35$, $\xi_x=0.15$, $\xi_\phi=0.15$, для второй – без ограничения величин демпфирования, для третьей демпфирование в основании не учитывалось.

На рисунке 2 представлены спектры отклика на оборудовании в осевом направлении, в таблице 1 представлены величины максимальных сейсмических деформаций изоляторов, а также взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания.

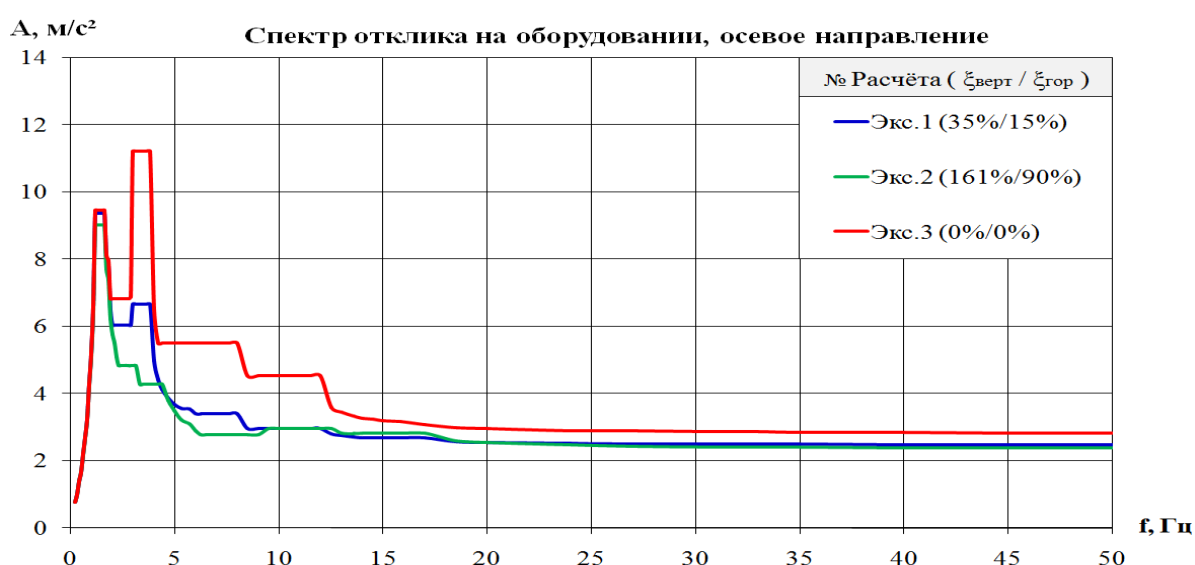


Рисунок 2 – Спектры отклика сейсмических ускорений на оборудовании в осевом направлении

Figure 2 – Seismic accelerations response spectrum at the equipment level, in the axial direction

Таблица 1 – Максимальные сейсмические деформации изоляторов, взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания

Table 1 – Maximum seismic deformations of insulators, mutual displacements of the turbine foundation and service mark structures

	Экс.1	Экс.2	Экс.3
Виброизолятор под конденсатором	14.2	13.5	13.6
Виброизолятор под ФТА	45.7	40.6	50.8
ФТА–отметка обслуживания	47.0	41.7	54.2

Учёт завышенного демпфирования в основании приводит к неконсервативному занижению максимальных сейсмических ускорений на 5-30% и потере некоторых пиков. Деформации изоляторов занижаются на 10-15%.

В свою очередь, не учёт демпфирования в основании приводит к завышению максимальных сейсмических ускорений на 15-50% и завышению значений деформаций изоляторов на 15%. Рекомендуется учитывать демпфирования в грунтах основания, но в случае получения околокритических значений ограничивать его величину.

Второй серии вычислительных экспериментов варьировалось внешнее воздействие, а именно выполнены расчёты на сейсмические воздействия с одинаковой интенсивностью (акселерограммы нормированы на 1 м/с^2) но с различным частотным составом.

На рисунке 3 представлены спектры отклика на оборудовании в осевом направлении, в таблице 2 представлены величины максимальных сейсмических деформаций изоляторов, а также взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания.

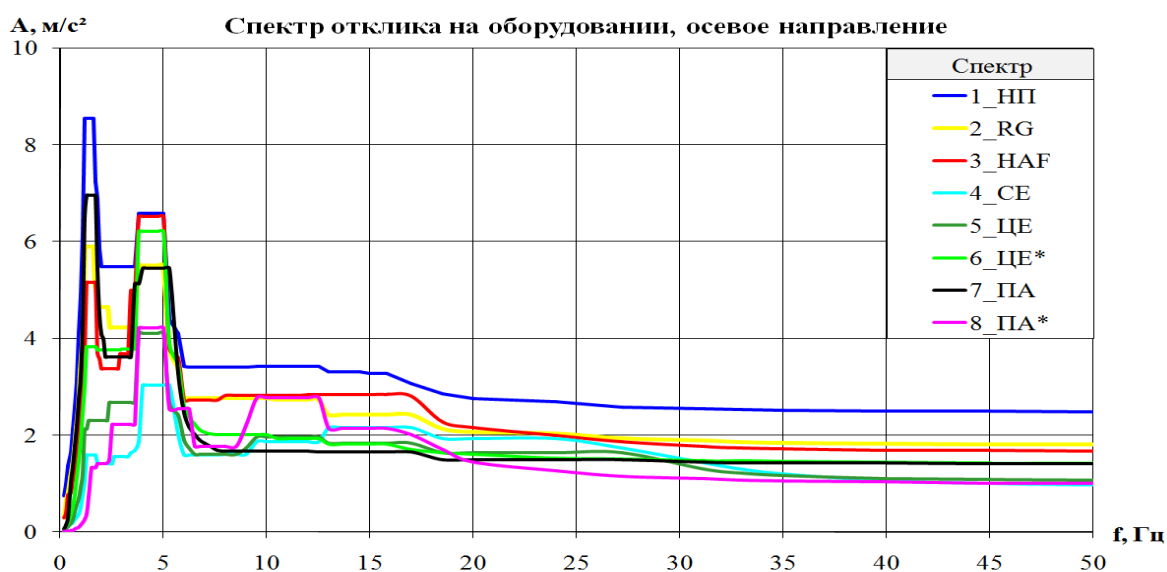


Рисунок 3 – Спектры отклика сейсмических ускорений на оборудовании в осевом направлении

Figure 3 – Seismic accelerations response spectrum at the equipment level, in the axial direction

Таблица 2 – Максимальные сейсмические деформации изоляторов, взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания

Table 2 – Maximum seismic deformations of insulators, mutual displacements of the turbine foundation and service mark structures

	1_НП	2_RG	3_HAF	4_СЕ	5_ЦЕ	6_ЦЕ*	7_ПА	8_ПА*
Виброизолятор под конденсатором	13.6	8.9	6.5	2.5	3.4	5.3	7.5	1.6
Виброизолятор под ФТА	42.5	30.6	20.6	9.5	14.7	20.4	25.9	8.7
ФТА-отметка обслуживания	46.0	33.2	24.4	11.3	17.3	24.0	29.3	11.2

Получены значения максимальных сейсмических ускорений на фундаменте турбоагрегата в осевом направлении отличающиеся более чем в 2.5 раза: от 0.9 м/с² до 2.4 м/с². Значения сейсмических деформаций изоляторов отличаются более чем в 4 раза.

Виброизолированные ФТА имеют основную форму колебаний в осевом направлении с частотой входящей в диапазон от 1 до 4 Гц. Сейсмическое воздействие с преобладающими частотами входящими в данный диапазон вызывает больший отклик системы, нежели более высокочастотное сейсмическое воздействие [5].

Третья серия вычислительных экспериментов связана с учётом изоляторов с разным соотношением горизонтальных и вертикальных жесткостей. ТН - изоляторы с соотношением горизонтальной и вертикальной жесткостей 1 к 6, ТХ - 1 к 3, ТР - 1 к 1.

На рисунке 4 представлены спектры отклика на оборудовании в осевом направлении, в таблице 3 представлены величины максимальных сейсмических деформаций изоляторов, а также взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания.

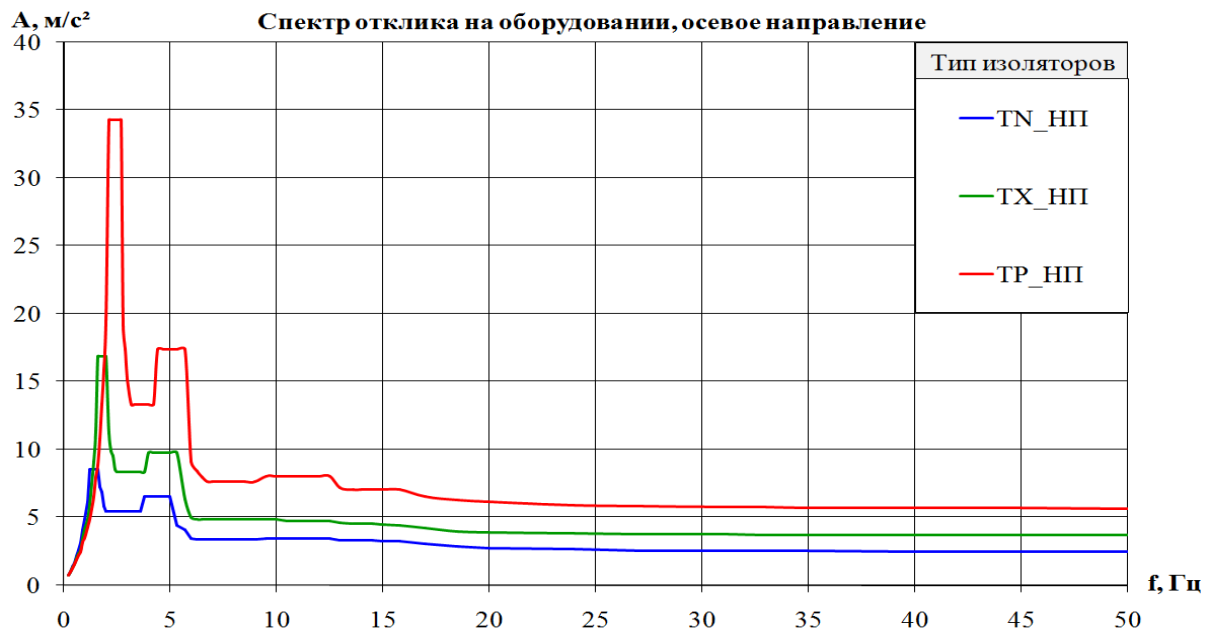


Рисунок 4 - Спектры отклика сейсмических ускорений на оборудовании в осевом направлении

Figure 4 – Seismic accelerations response spectrum at the equipment level, in the axial direction

Таблица 3 – Максимальные сейсмические деформации изоляторов, взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания

Table 3 – Maximum seismic deformations of insulators, mutual displacements of the turbine foundation and service mark structures

	Экс.1	Экс.2	Экс.3
Виброизолятор под конденсатором	13.6	12.5	15.6
Виброизолятор под ФТА	42.5	34.0	25.5
ФТА-отметка обслуживания	46.0	41.1	37.3

Увеличение суммарной горизонтальной жёсткости изоляторов приводит к росту частоты основной формы колебаний в осевом направлении: с 1.3 Гц на «мягких» изоляторах ТН до 1.7 Гц при «средних» изоляторах ТХ и до 2.2 Гц при «жёстких» изоляторах ТР. Это приводит к росту максимальных сейсмических ускорений в 1.5-2 раза. Величина сейсмических деформаций изоляторов под ФТА снижается на 20-40%. Для достижения сейсмостойкости виброизолированного ФТА по параметру максимального ускорения в осевом направлении на турбоагрегате необходимо использовать «мягкие» изоляторы с соотношением горизонтальной и вертикальной жесткостей входящих в диапазон от 1 к 5 до 1 к 6. Сейсмические перемещения следует уменьшать не увеличением жёсткости изоляторов, а увеличением затухания, путём добавления в систему дополнительных демпфирующих устройств [3-4].

Четвёртая серия вычислительных экспериментов связана с проведением сейсмических расчётов виброизолированных фундаментов отдельно и в составе здания турбины. На рисунке 5 представлена схема и конечноэлементная модель фундамента турбоагрегата без моделирования конденсаторов, на рисунке 6 - с моделированием конденсаторов, на рисунке 7 - конечноэлементная модель фундамента турбоагрегата в составе здания турбины.

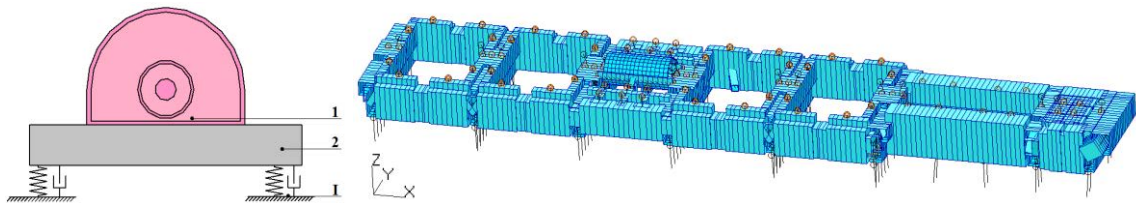


Рисунок 5 - Схема и конечноэлементная модель фундамента турбоагрегата без моделирования конденсаторов

Figure 5 – Scheme and finite element model of the turbine foundation without condensers modeling

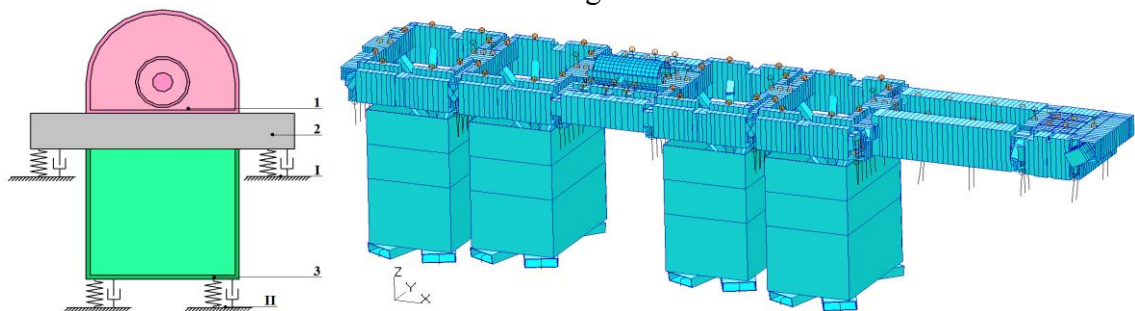


Рисунок 6 - Схема и конечноэлементная модель фундамента турбоагрегата с моделированием конденсаторов

Figure 6 – Scheme and finite element model of the turbine foundation with modeling of condensers

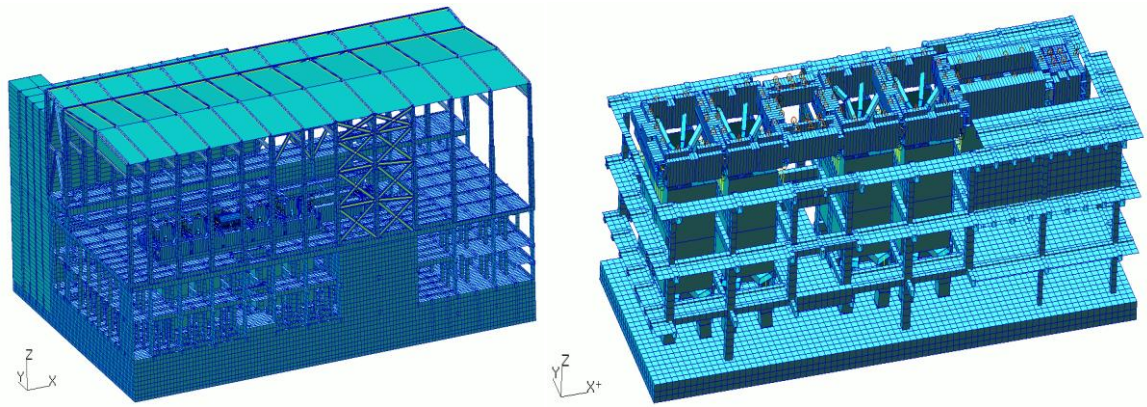


Рисунок 7 - Конечнoэлементная модель фундамента турбоагрегата в составе здания турбины

Figure 7 – Finite element model of the turbine foundation as part of the turbine building

Часто, в проектных организациях, занимающихся комплексным проектированием электростанций, в виду сложности динамических расчётов, отсутствует возможность произвести проектирование и расчёт фундамента турбоагрегата собственными силами. В этом случае для выполнения комплексного проекта и расчётов виброизолированного фундамента турбоагрегата, данные организации вынуждены обращаться к субподрядной организации. При этом организация главный подрядчик, отдающая проект фундамента турбоагрегата на субподряд обычно оставляет за собой проект и расчёт здания турбины (машинного зала). В этом случае расчётчик сталкивается с проблемой расчёта виброизолированного фундамента турбоагрегата отдельно от здания турбины.

На рисунке 8 представлены спектры отклика на оборудовании в осевом направлении, в таблице 4 представлены величины максимальных сейсмических деформаций изоляторов.

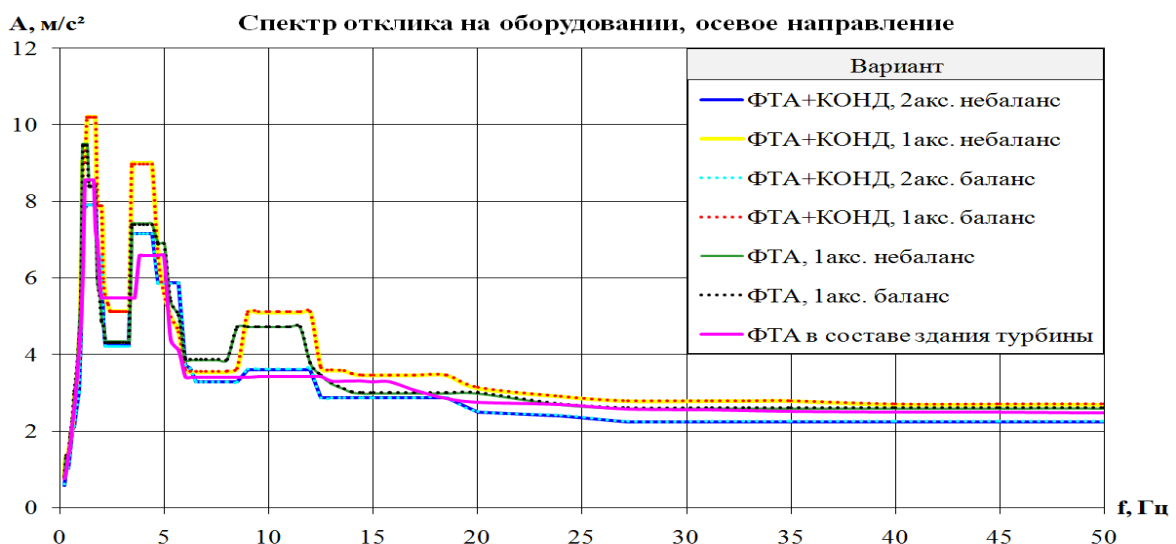


Рисунок 8 - Спектры отклика сейсмических ускорений на оборудовании в осевом направлении

Figure 8 – Seismic accelerations response spectrum at the equipment level, in the axial direction

Таблица 4 - Максимальные сейсмические деформации изоляторов, взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания

Table 4 – Maximum seismic deformations of insulators, mutual displacements of the turbine foundation and service mark structures

Акселерограммы	ФТА+КОНДЕНСАТОР				ФТА		ФТА в составе здания турбины
	2 н/б	1 н/б	2 б	1 б	1 н/б	1 б	
Виброизолятор под конденсатором	2018.6	13.9	509.4	13.9	-	-	13.6
Виброизолятор под ФТА	2037.0	29.8	573.3	29.1	30.2	31.0	42.5

Модель фундамента турбоагрегата без конденсаторов рассчитана на комплекты несбалансированных и сбалансированных акселерограмм, синтезированных из спектров на подпорных конструкциях. Величина ускорений практически совпадает со значением при расчёте ФТА в составе здания турбины, однако перемещения занижены более чем на 30%.

Модель фундамента турбоагрегата с конденсаторами рассчитана на комплекты несбалансированных и сбалансированных акселерограмм, синтезированных из спектров на подпорных конструкциях фундамента и конденсаторов, и на комплекты несбалансированных и сбалансированных акселерограмм, синтезированных из огибающих спектров. В первом случае ускорения занижены на 20%. И при несбалансированных акселерограммах, и при сбалансированных результаты расчёта сейсмических смещений некорректны. Происходит дрейф верхнего и нижнего уровня системы в разные стороны. Во втором случае ускорения завышены на 6%, что не критично, однако величины перемещений занижены более чем на 30%.

Пятая серия вычислительных экспериментов связана с проведением сейсмических расчётов виброизолированных фундаментов турбоагрегатов по линейно-спектральной теории и методом прямого интегрирования уравнений движения.

Сейсмические расчёты по линейно-спектральной теории были выполнены на спектры с 5% затуханием, расчёты методом прямого интегрирования уравнений движения выполнены по акселерограммам, синтезированным из спектров с 5% затуханием.

Учитывая тот факт, что при расчёте по линейно-спектральной теории не учитываются сосредоточенные демпферы, учтём затухание, вызываемое ими следующим образом: представим виброизолированный ФТА в виде колеблющейся массы, закреплённой пружиной и демпфером. Значение массы это сумма массы железобетонных конструкций фундамента, а также массы оборудования; значение жёсткости пружины по горизонтали - сумма горизонтальных жесткостей всех изоляторов, значение жёсткости пружины по вертикали - сумма вертикальных жесткостей всех изоляторов; аналогично значение горизонтального демпфирования есть сумма всех горизонтальных затуханий сосредоточенных демпферов, значение вертикального демпфирования - сумма всех вертикальных затуханий сосредоточенных демпферов. Важно, что данный подход не учитывает пространственный характер колебаний виброизолированных фундаментов турбоагрегатов, однако позволяет грубо оценить величину относительного затухания

системы, позволяющую выбрать спектр с более корректным затуханием для расчёта по линейно-спектральной теории.

Таким образом, дополнительно проведены расчёты отдельно фундамента турбоагрегата с моделированием конденсаторов и без них на сейсмические спектры с 24% затуханием по горизонтали и с 5% затуханием по вертикали. Рассчитывать фундамента в составе здания турбины на спектр с 24% затуханием не имеет никакого физического смысла.

В таблице 5 представлены результаты вычисления максимальных сейсмических смещений по линейно-спектральной теории и методом прямого интегрирования уравнений движения для отдельного фундамента турбоагрегата с конденсаторами и без конденсаторов, а также для фундамента турбоагрегата в составе здания турбины.

Таблица 5 – Максимальные сейсмические деформации изоляторов, взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания

Table 5 – Maximum seismic deformations of insulators, mutual displacements of the turbine foundation and service mark structures

Вариант моделирования	ФТА+КОНДЕНСАТОР			ФТА			ФТА в составе здания турбины	
	Прямое интегрирование	ЛСТ, 5%	ЛСТ, 24%	Прямое интегрирование	ЛСТ, 5%	ЛСТ, 24%	Прямое интегрирование	ЛСТ, 5%
Виброизолятор под конденсатором	13.9	35.7	18.1	-	-	-	13.6	24.7
Виброизолятор под ФТА	29.8	101.9	62.1	31.0	70.9	40.3	42.5	91.1

Использование линейно-спектральной теории при расчёте виброизолированного ФТА отдельно от здания турбины на спектры воздействия с 5% затуханием вызывает рост перемещений в 2 - 3 раза, в сравнении с прямым интегрированием. При использовании в расчёте спектров воздействия с 24% затуханием, соответствующим относительному затуханию в виброизолированном фундаменте турбоагрегата, величины перемещений завышены в 1.5 - 2 раза.

В то же время, при расчёте фундамента в составе здания турбины, линейно-спектральная теория даёт значения перемещений более чем в 2 раза превышающие значения перемещений при использовании метода прямого интегрирования уравнений движения. Данное обстоятельство объясняется тем, что при использовании метода прямого интегрирования, во-первых, возможно корректно учесть сосредоточенные демпферы под виброизолированным фундаментом и под конденсаторами, а во-вторых, получить величины перемещений со знаком и направлением.

Таким образом, для качественного и надёжного обеспечения сейсмостойкости виброизолированных фундаментов турбоагрегатов, необходимо проводить сейсмический расчёт виброизолированных фундаментов в составе здания турбины прямым интегрированием уравнений движения.

Заключительная серия вычислительных экспериментов посвящена учёту частотной зависимости динамических характеристик вязкого демпфера.

Используемые в виброизоляции фундамента турбоагрегата вязкие демпферы не являются идеально-вязкими. Они имеют приведённую жёсткости и величину демпфирования, зависящие от частоты колебаний. Учесть данные зависимости в расчётной схеме позволяет использование 4-х параметрической модели Максвелла, состоящей из пары цепочек, последовательно соединённых упругой пружины и вязкого демпфера, модель схематично представлена на рисунке 9.

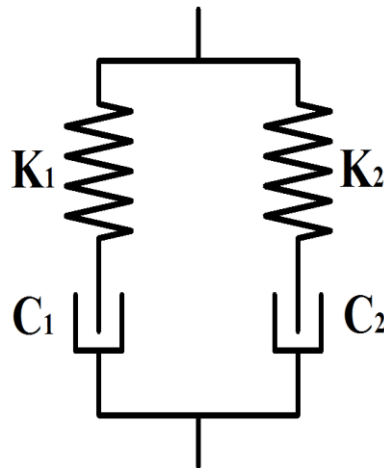


Рисунок 9 – 4-х параметрическая модель Максвелла

Figure 9 – Maxwell model

В работах [7-8] было показано, что при использовании упрощенных моделей демпфера: эквивалентной упругой модели или идеально вязкой модели, возможны ошибки как в консервативную сторону при эквивалентной упругой модели, так и в неконсервативную при идеально вязкой модели.

Проведены расчёты виброизолированного фундамента турбоагрегата с учётом и без учёта частотной зависимости динамических характеристик вязких демпферов.

На рисунке 10 представлены спектры отклика на оборудовании в осевом направлении, в таблице 6 представлены величины максимальных сейсмических деформаций изоляторов, а также взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания.

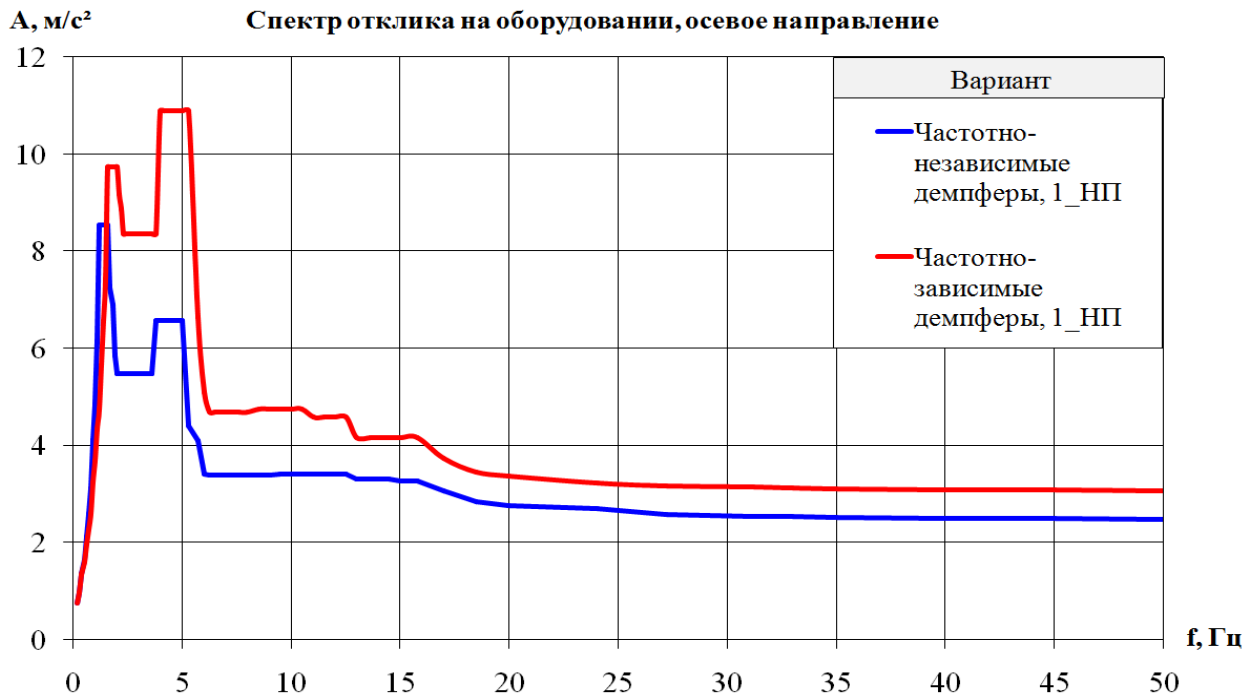


Рисунок 10 – Спектры отклика сейсмических ускорений на оборудовании в осевом направлении

Figure 10 – Seismic accelerations response spectrum at the equipment level, in the axial direction

Таблица 6 – Максимальные сейсмические деформации изоляторов, взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания

Table 6 – Maximum seismic deformations of insulators, mutual displacements of the turbine foundation and service mark structures

	Частотно независимые	Частотно-зависимые
Виброизолятор под конденсатором	13.6	7.6
Виброизолятор под ФТА	42.5	29.1
ФТА-отметка обслуживания	46.0	30.9

Учёт частотной зависимости жёсткости в демпфере, и учёт жёсткости демпфера как таковой приводит к росту частоты основной формы колебаний фундамента турбоагрегата в осевом направлении, что в свою очередь приводит к росту максимальных сейсмических ускорений на отметке установки турбоагрегата на 30-60%. В тоже время, учёт частотной зависимости затухания в демпферах снижает величину максимальных сейсмических деформаций изоляторов на 30-40%.

Таким образом, при расчёте виброизолированных фундаментов турбоагрегатов на сейсмическое воздействие, необходим учёт частотной зависимости динамических характеристик вязкоупругих демпферов. В случае игнорирования частотной зависимости демпферов и упрощения в расчётной модели демпферов до идеально-вязких элементов возможно получение ошибочных на 20-60% результатов в неконсервативную сторону.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании и сейсмических расчётах виброизолированных фундаментов турбоагрегатов рекомендуется:

- учитывать демпфирование в грунтах основания ограничивая его величину в случае получения околокритических и закритических значений;
- на начальных этапах проектирования детально исследовать частотный состав исходного сейсмического воздействия, особое внимание обратить на диапазон частот от 1 до 4 Гц - частот основных форм колебаний виброизолированных фундаментов турбоагрегатов;
- для повышения сейсмоизолирующей эффективности виброизоляцию ФТА предусматривать из «мягких» пружинных изоляторов с соотношением горизонтальной и вертикальной жесткостей в диапазоне от 1 к 5 до 1 к 6;
- проводить сейсмические расчёты виброизолированных фундаментов в составе здания турбины методом прямого интегрирования уравнений движения
- при проведении сейсмических расчётов виброизолированных фундаментов обязательно учитывать частотные зависимости величин жёсткости и затухания в вязких демпферах.

Список литературы

1. НП-031-01 Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций, 2001.
2. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах, 2018.
3. Тарасов В.А., и др. Системы сейсмоизоляции // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. №4 (43). С. 117-140.
4. Тарасов В.А. Обеспечение сейсмостойкости виброизолированного фундамента турбоагрегата // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2020. № 1. С. 44-47.
5. Бабский А.Е., Лалин В.В., Олейников И.И., Тарасов В.А. Сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов в зависимости от частотного состава сейсмического воздействия // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. №1. С. 30-41. doi: 10.22363/1815-5235-2021-17-1-30-41
6. MSC/NASTRAN. Linear Static/Dynamic Analysis, User Guide, Version 70, the Mac Neal Schwendler Corporation, Los Angeles, California, 1998.
7. Kostarev V., Berkovski A., et. al. Application of mathematical model for high viscous damper to dynamic analysis of NPP piping // Proc. of 10th ECEE, 1994, Vienna, Austria.
8. Kostarev V.V., Vasilyev P.S., Nawrotzki P., A new approach in seismic base isolation and dynamic control of structures, Transactions of the NZSEE Annual Technical Conference and 15th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, 2017, Auckland, NZ.
9. ASCE 4-16 Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures, 2016.

References

1. NP-031-01 Normy proektirovaniya sejsmostojkih atomnyh stancij, 2001. (rus)
2. SP 14.13330.2018 Seismic building design code, 2018. (rus)
3. Tarasov V.A., and etc. Sistemy seysmoizolyatsii [Seismic isolation systems]. Construction of Unique Buildings and Structures. 2016. No43(4). Pp. 117-140. (rus)
4. Tarasov V. Ensuring seismic stability of the vibration-insulated foundation of the turbine unit. Natural and Technological Risks. Building Safety. 2020; 1: 44-47. (rus)
5. Babsky A.E., Lalin V.V., Oleinikov I.I., Tarasov V.A. Seismic stability of vibrationinsulated turbine foundations depending on the frequency composition of seismic

impact. Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2021;17(1): 30-41. (rus) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-1-30-41>

6. MSC/NASTRAN. Linear Static/Dynamic Analysis, User Guide ,Version 70, the Mac Neal Schwendler Corporation, Los Angeles, California, 1998.

7. Kostarev V., Berkovski A., et. al. Application of mathematical model for high viscous damper to dynamic analysis of NPP piping // Proc. of 10th ECEE, 1994, Vienna, Austria.

8. Kostarev V.V., Vasilyev P.S., Nawrotzki P., A new approach in seismic base isolation and dynamic control of structures, Transactions of the NZSEE Annual Technical Conference and 15th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, 2017, Auckland, NZ.

9. ASCE 4-16 Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures, 2016.

Информация об авторах/Information about authors

Бабский Александр Евгеньевич, главный специалист по динамике сооружений, строительный отдел – турбинный остров, Санкт-Петербургский филиал АО «Атомэнергопроект» – «Санкт-Петербургский проектный институт»; eLIBRARY SPIN-код: 9620-8675, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8297-1630>

Aleksandr E. Babsky, chief specialist (Structural Dynamics), Construction Department – Turbine Island, JSC Atomenergoproekt St. Petersburg Branch – St. Petersburg Design Institute; eLIBRARY SPIN-code: 9620-8675, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8297-1630>

Тарасов Владимир Александрович, инженер-проектировщик, строительный отдел – турбинный остров, Санкт-Петербургский филиал АО «Атомэнергопроект» – «Санкт-Петербургский проектный институт»; аспирант Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; eLIBRARY SPIN-код: 9264-3744, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1030-8370>.

Vladimir A. Tarasov, JSC Atomenergoproekt St. Petersburg Branch - St. Petersburg Design Institute; graduate student of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Institute of Civil Engineering, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University; eLIBRARY SPIN-code: 9264-3744, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1030-8370>