



СИСТЕМА ДОБРОВОЛЬНОЙ СЕРТИФИКАЦИИ «МФЦС»

Зарегистрирована в едином реестре добровольной сертификации Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии Российской Федерации (Росстандарт РФ)
МФЦС.003RU.Я2331.04ПВК0

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель

Испытательной лаборатории

ООО «Многопрофильный

центр качества»

Мосолов П.С.



ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 2953/0823 от «28» августа 2023 г.

Место проведения испытаний:	ИЛ ООО «Многопрофильный центр качества»
Заявитель:	ООО «Вектор-Инжиниринг» Адрес: Республика Беларусь, 220033, город Минск, пр-т Партизанский, 8/2-5
Наименование продукции:	Блочная комплектная трансформаторная подстанция БКТП мощностью от 250 до 2500 кВА на номинальное напряжение 6-10/0,4кВ
Изготовитель:	ООО «Вектор-Инжиниринг» Адрес: Республика Беларусь, 220033, город Минск, пр-т Партизанский, 8/2-5
Цель испытаний	подтверждение на соответствие требованиям ГОСТ 30546.1-98 «Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета их сложных конструкций в части сейсмостойкости», ГОСТ 30546.2-98 «Испытания на сейсмостойкость машин, приборов и других технических изделий», ГОСТ 30546.3-98 «Методы определения сейсмостойкости машин, приборов и других технических изделий, установленных на месте эксплуатации, при их аттестации или сертификации на сейсмическую безопасность».
Методы испытаний:	ГОСТ 30546.1-98 «Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета их сложных конструкций в части сейсмостойкости», ГОСТ 30546.2-98 «Испытания на сейсмостойкость машин, приборов и других технических изделий», ГОСТ 30546.3-98 «Методы определения сейсмостойкости машин, приборов и других технических изделий, установленных на месте эксплуатации, при их аттестации или сертификации на сейсмическую безопасность».

Результаты испытаний приведены на 15 страницах

Настоящий протокол испытаний распространяется только на образцы, подвергнутые испытаниям

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Испытание на сейсмическое воздействие на блочную комплектную трансформаторную подстанцию БКТП мощностью от 250 до 2500 кВА на номинальное напряжение 6-10/0,4кВ (далее – «изделие»). Расчет выполнен на основании технической документации, ГОСТ 30546.1-98 «Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета их сложных конструкций в части сейсмостойкости», ГОСТ 30546.2-98 «Испытания на сейсмостойкость машин, приборов и других технических изделий», ГОСТ 30546.3-98 «Методы определения сейсмостойкости машин, приборов и других технических изделий, установленных на месте эксплуатации, при их аттестации или сертификации на сейсмическую безопасность».

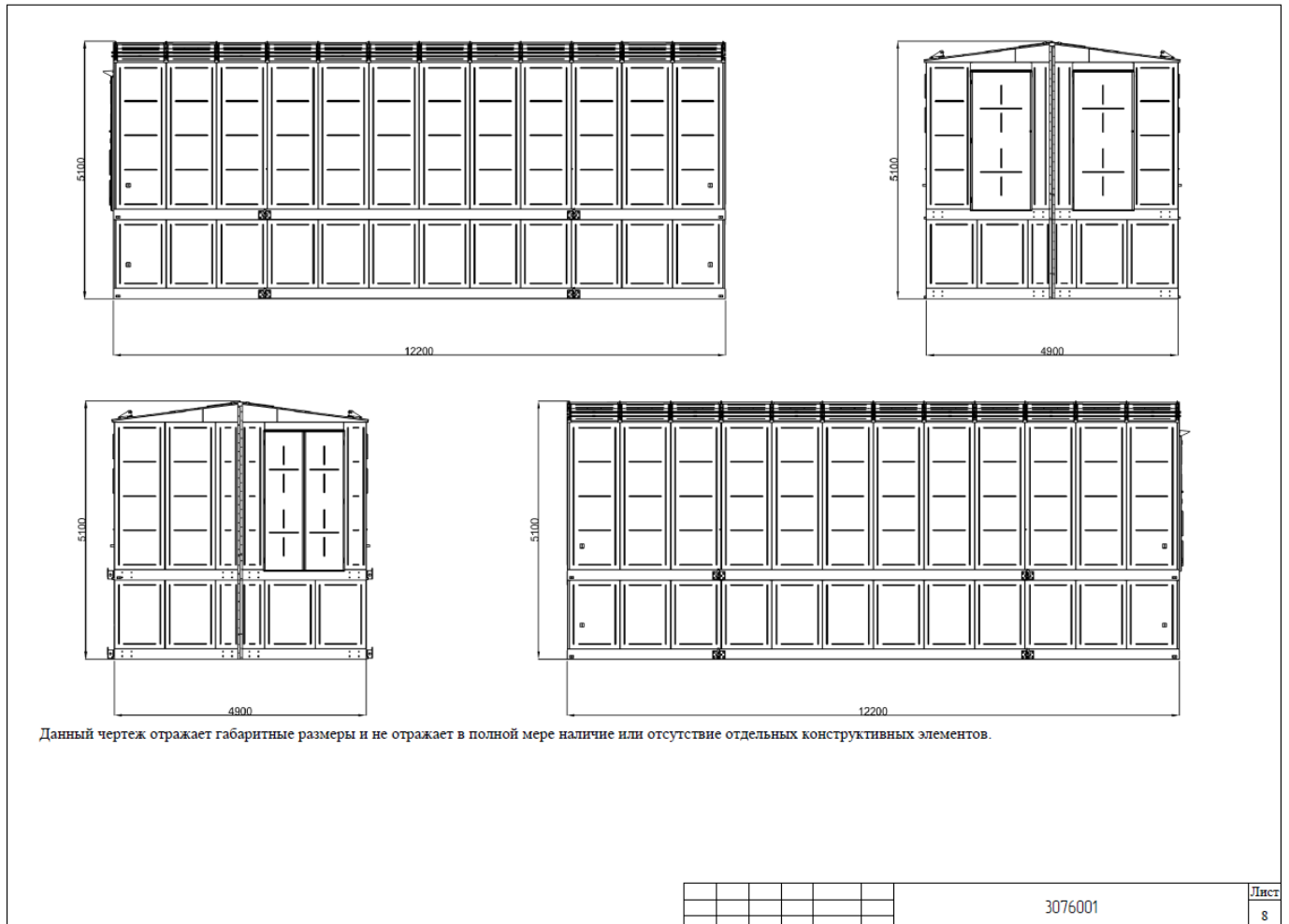


Рис. 1. Общий вид.

2 НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ИЗДЕЛИЕ

На основании технической документации рис. 1, была построена модель рис.3.

В качестве статических и динамических нагрузок были приняты следующие типы нагрузок:

1. собственный вес с коэффициентом 1.05;
2. сейсмическое воздействие в 9 баллов по шкале MSK-64 на высоте 70 метров над нулевой отметкой.

3 МЕТОДИКА РАСЧЕТА

ANSYS — универсальная программная система конечно-элементного (МКЭ) анализа. ANSYS аттестован в ГОСАТОМНАДЗОРЕ России (Регистрационный номер ПС в ЦОЭП при РНЦ КИ №490 от 10.09.2002); (Регистрационный номер паспорта аттестации ПС №145 от 31.10.2002), а также выдано свидетельство РААСН о верификации ANSYS № 02/ANSYS/2009.

Расчет, выполняемый программой ANSYS, основан на классических инженерных представлениях и концепциях. При помощи численных методов эти концепции могут быть сформулированы в виде матричных уравнений, которые наиболее пригодны для конечно-элементных приложений. Настоящий расчёт является консультационным.

Совокупность дискретных областей (элементов), связанных между собой в конечном числе точек (узлов), представляет собой математическую модель системы, поведение которой нужно анализировать. Основными неизвестными являются степени свободы узлов конечно-элементной модели. К степеням свободы относятся перемещения, повороты, температуры, давления, скорости, потенциалы электрических или магнитных полей; их конкретное содержание определяется типом элемента, который связан с данным узлом. В соответствии со степенями свободы для каждого элемента модели формируются матрицы масс, жесткости (или теплопроводности) и сопротивления (или удельной теплоемкости). Эти матрицы приводят к системам совместных уравнений, которые обрабатываются так называемыми “решателями”.

Для материалов с линейными свойствами напряжения связаны с деформациями соотношением:

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\}, \quad (1)$$

где $\{\sigma\} = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{xz}]^T$ - вектор напряжений (как выходная величина помечается меткой S);

[D] – матрица упругости (описывается уравнениями (18) ... (23), обратная матрица записывается в виде (4) и (5);

$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon_{th}\}$ - выходной массив;

$\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{xz} \ \varepsilon_{yz}]^T$ - вектор полной (суммарной) деформации;

$\{\varepsilon_{th}\}$ – вектор температурной деформации (определяется соотношением (3)).

Компоненты вектора напряжений показаны на Рис. 2. Для используемых в программе ANSYS напряжений и деформаций принято следующее правило знаков: величины, относящиеся к растяжению, являются положительными, к сжатию - отрицательными.

Компоненты сдвига считаются положительными, если их направления совпадают с направлениями соответствующих координатных осей. Деформации сдвига представляют собой инженерные деформации, а не компоненты тензора.

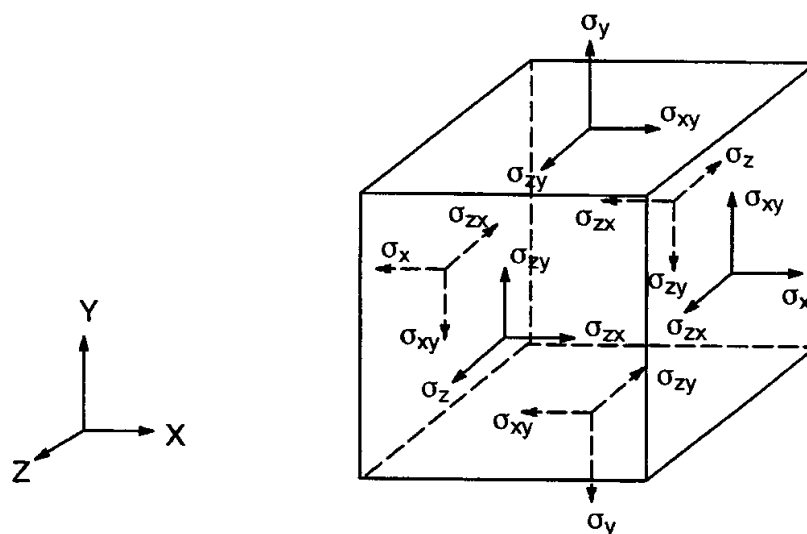


Рис. 2. Компоненты вектора напряжений

Уравнение (1) может быть обращено следующим образом:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{th}\} + [D]^{-1} \{\sigma\}. \quad (2)$$

Для трехмерного случая вектор температурных деформаций определяется в виде соотношения:

$$\{\varepsilon_{th}\} = \Delta T [\alpha_x \ \alpha_y \ \alpha_z \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad (3)$$

где α_x – коэффициент температурного расширения в направлении оси X

Матрица [D]-1, нормализованная по столбцам, имеет вид:

$$[D]-1 = \begin{vmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_y & -\nu_{xz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_x & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_x & -\nu_{zy}/E_y & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_z \end{vmatrix} \quad (4)$$

При использовании нормализация по строкам, матрица записывается следующим образом:

$$[D]-1 = \begin{vmatrix} 1/E_x & -\nu^*_{xy}/E_y & -\nu^*_{xz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu^*_{yx}/E_x & 1/E_y & -\nu^*_{yz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu^*_{zx}/E_x & -\nu^*_{zy}/E_y & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{zx} \end{vmatrix} \quad (5)$$

Для записи элементов этих матриц используются обозначения:

E_x – модуль Юнга в направлении оси X,

ν_{xy} – минимальный коэффициент Пуассона,

ν^*_{xy} – максимальный коэффициент Пуассона,

G_{xy} – модуль сдвига в плоскости X-Y.

Матрица [D]-1 должна быть положительно определенной. Кроме того, эта матрица должна быть симметричной, поэтому для ортотропных материалов предполагается существование соотношений:

$$\nu_{yx} / E_x = \nu_{xy} / E_y \quad (6)$$

$$\nu_{zx} / E_x = \nu_{xz} / E_z \quad (7)$$

$$\nu_{zy} / E_y = \nu_{yz} / E_z \quad (8)$$

или

$$\nu^*_{yx} / E_y = \nu^*_{xy} / E_x \quad (9)$$

$$\nu^*_{zx} / E_z = \nu^*_{xz} / E_x \quad (10)$$

$$\nu^*_{zy} / E_z = \nu^*_{yz} / E_y \quad (11)$$

Согласно приводимым выше соотношениям, величины ν_{xy} , ν_{zy} , ν_{zx} , ν^*_{yx} , ν^*_{zy} и ν^*_{zx} являются зависимыми и поэтому не задаются при вводе исходных данных.

Из равенства (2) в развернутом виде, используя выражения (3), (4), а также (6) ... (8), получаем шесть уравнений:

$$\varepsilon_x = \alpha_x \Delta T + \sigma_x / E_x - \nu_{xy} \sigma_y / E_y - \nu_{xz} \sigma_z / E_z \quad (12)$$

$$\varepsilon_y = \alpha_y \Delta T + \sigma_y / E_y - \nu_{xy} \sigma_x / E_x - \nu_{yz} \sigma_z / E_z \quad (13)$$

$$\varepsilon_z = \alpha_z \Delta T + \sigma_z / E_z - \nu_{xz} \sigma_x / E_x - \nu_{yz} \sigma_y / E_y \quad (14)$$

$$\varepsilon_{xy} = \sigma_{xy} / G_{xy} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{yz} = \sigma_{yz} / G_{yz} \quad (16)$$

$$\varepsilon_{xz} = \sigma_{xz} / G_{xz} \quad (17)$$

где ε_x - деформация в направлении оси X,

ε_{xy} - деформация сдвига в плоскости X-Y,

σ_x - напряжения в направлении оси X,

σ_{xy} - напряжения сдвига в плоскости X-Y;

компоненты с другими индексами получаются циклическим сдвигом (X-Y-Z).

Уравнение (1) можно переписывается в развернутом виде, используя обратную матрицу (4), что вместе с уравнениями (3), (6) ... (8) дает шесть соотношений для напряжений:

$$\sigma_x = E_x/h [1 - (\nu_{yz})^2 E_y/E_z] (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + E_x/h [\nu_{xy} + \nu_{xz}\nu_{yz} E_y/E_z] (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + E_x/h [\nu_{xz} + \nu_{yz}\nu_{xy}] (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T) \quad (18)$$

$$\sigma_y = E_y/h [\nu_{xy} + \nu_{xz}\nu_{yz} E_y/E_z] (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + E_y/h [1 - (\nu_{xz})^2 E_x/E_z] (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + E_y/h [\nu_{yz} + \nu_{xz}\nu_{xy} E_x/E_y] (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T) \quad (19)$$

$$\sigma_z = E_z/h [\nu_{xz} + \nu_{yz}\nu_{xy}] (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + E_y/h [\nu_{yz} + \nu_{xz}\nu_{xy} E_x/E_y] (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + E_z/h [1 - (\nu_{xy})^2 E_x/E_y] (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T) \quad (20)$$

$$\sigma_{xy} = G_{xy} \varepsilon_{xy} \quad (21)$$

$$\sigma_{yz} = G_{yz} \varepsilon_{yz} \quad (22)$$

$$\sigma_{xz} = G_{xz} \varepsilon_{xz}, \quad (23)$$

в которых обозначено: $h = 1 - (\nu_{xy})^2 E_x/E_y - (\nu_{yz})^2 E_y/E_z - (\nu_{xz})^2 E_x/E_z - 2 \nu_{xy} \nu_{yz} \nu_{xz} E_x/E_z$.

Если модули сдвига G_{xy} , G_{yz} , G_{xz} не задаются при вводе, то их значения вычисляются следующим образом:

$$G_{xy} = (E_x E_y) / (E_x + E_y + 2 \nu_{xy} E_x) \quad (24)$$

$$G_{yz} = G_{xy} \quad (25)$$

$$G_{xz} = G_{xy} \quad (26)$$

4 РАСЧЕТ ИЗДЕЛИЯ

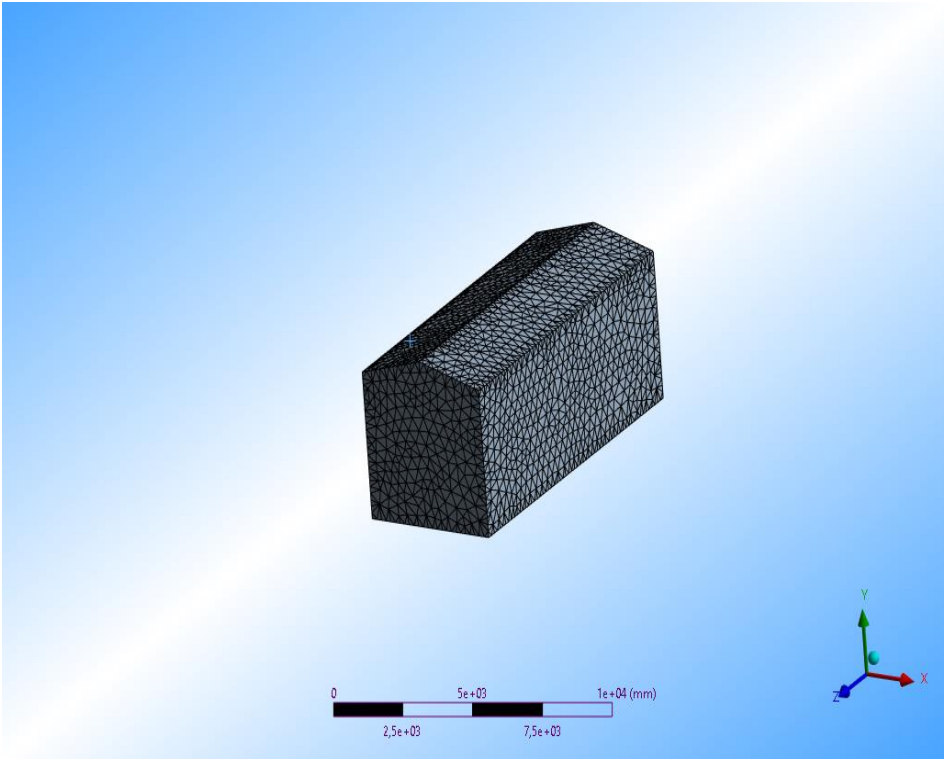


Рис. 3. Расчетная аппроксимированная модель
Определение собственных частот колебаний изделия:

№ рис.	Форма колебаний	Частота, Гц
5	1	39,5
6	2	39,8
7	3	41
8	4	45,9
9	5	46,2
10	6	47,9

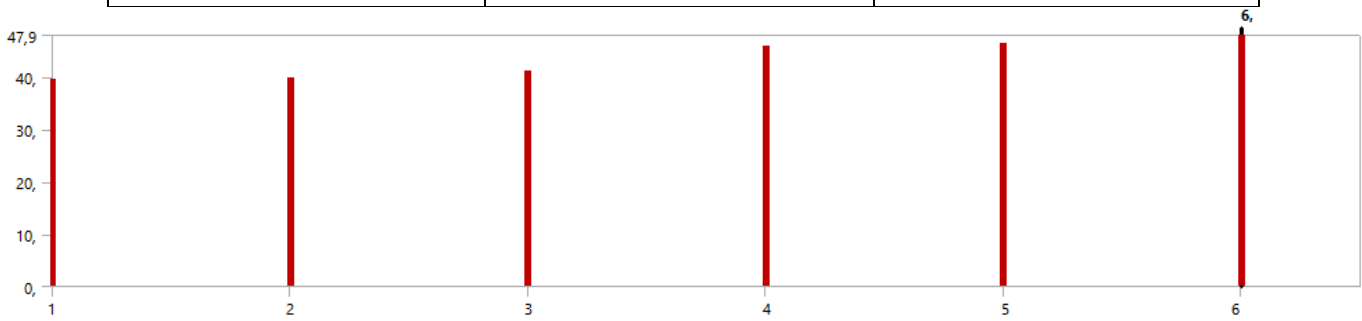


Рис. 4. Гистограмма собственных частот колебаний

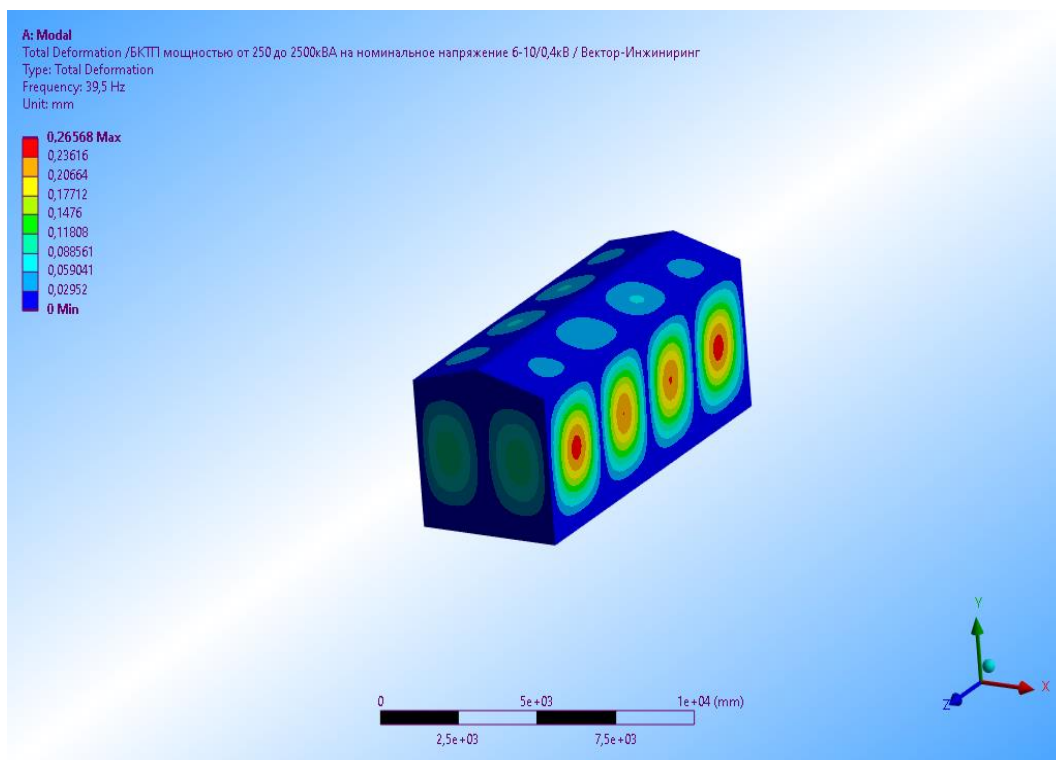


Рис. 5. Амплитуда при 1-й форме колебаний [мм]

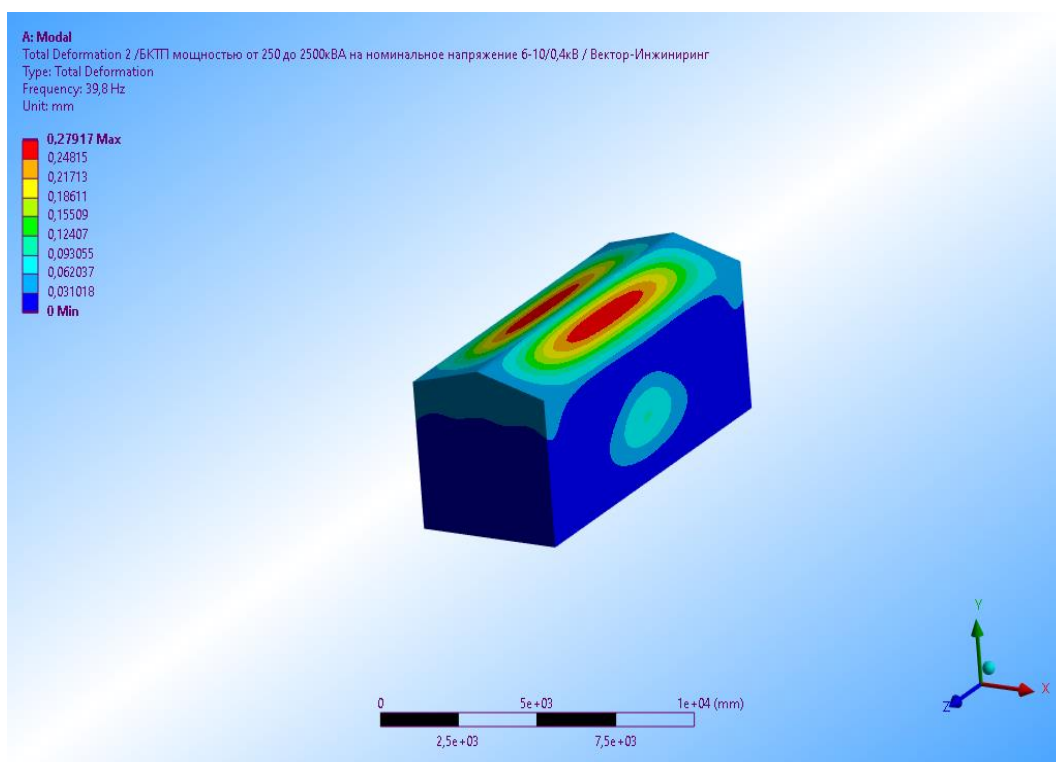


Рис. 6. Амплитуда при 2-й форме колебаний [мм]

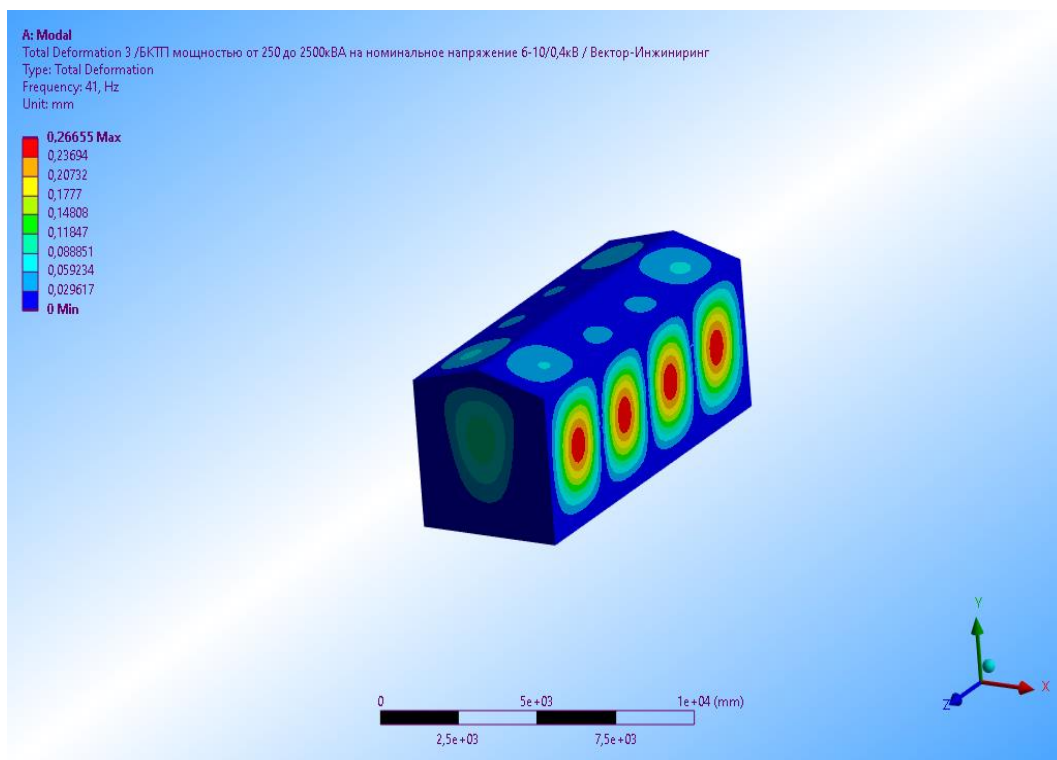


Рис. 7. Амплитуда при 3-й форме колебаний [мм]

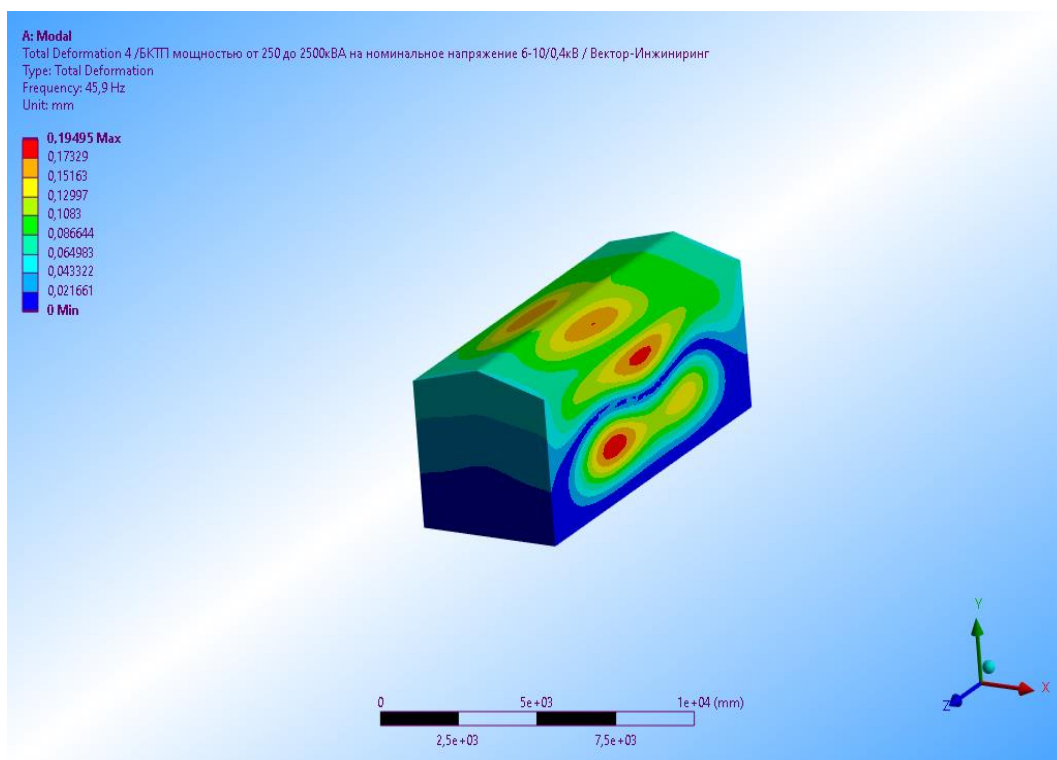


Рис. 8. Амплитуда при 4-й форме колебаний [мм]

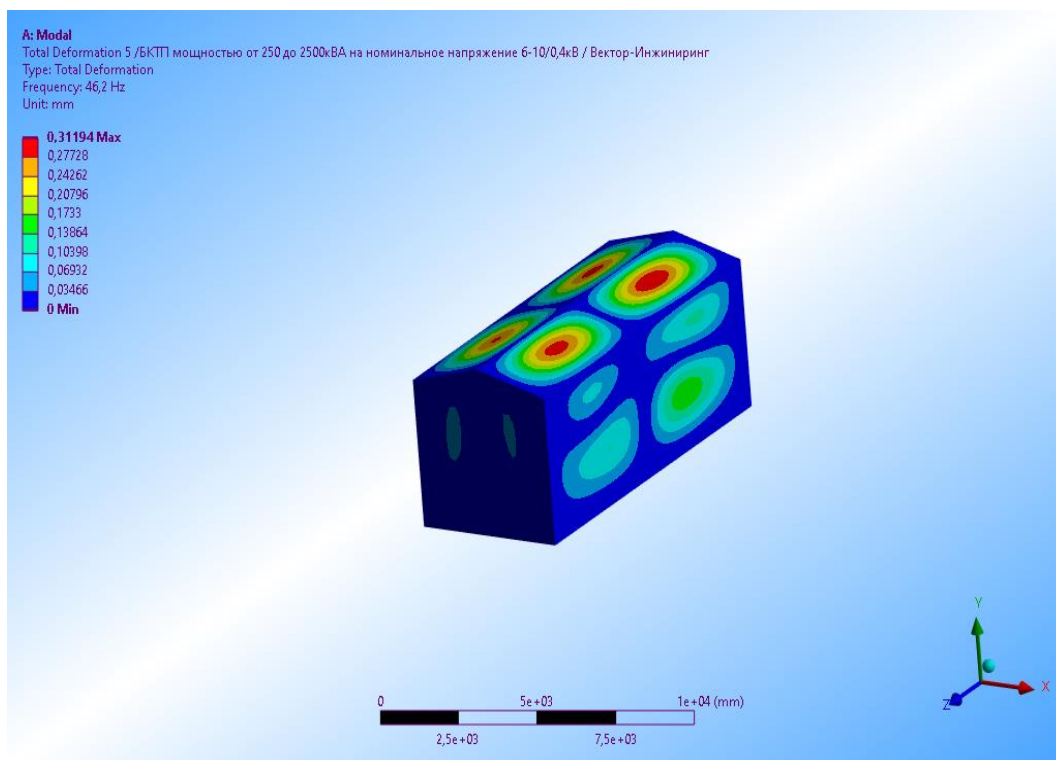


Рис. 9. Амплитуда при 5-й форме колебаний [мм]

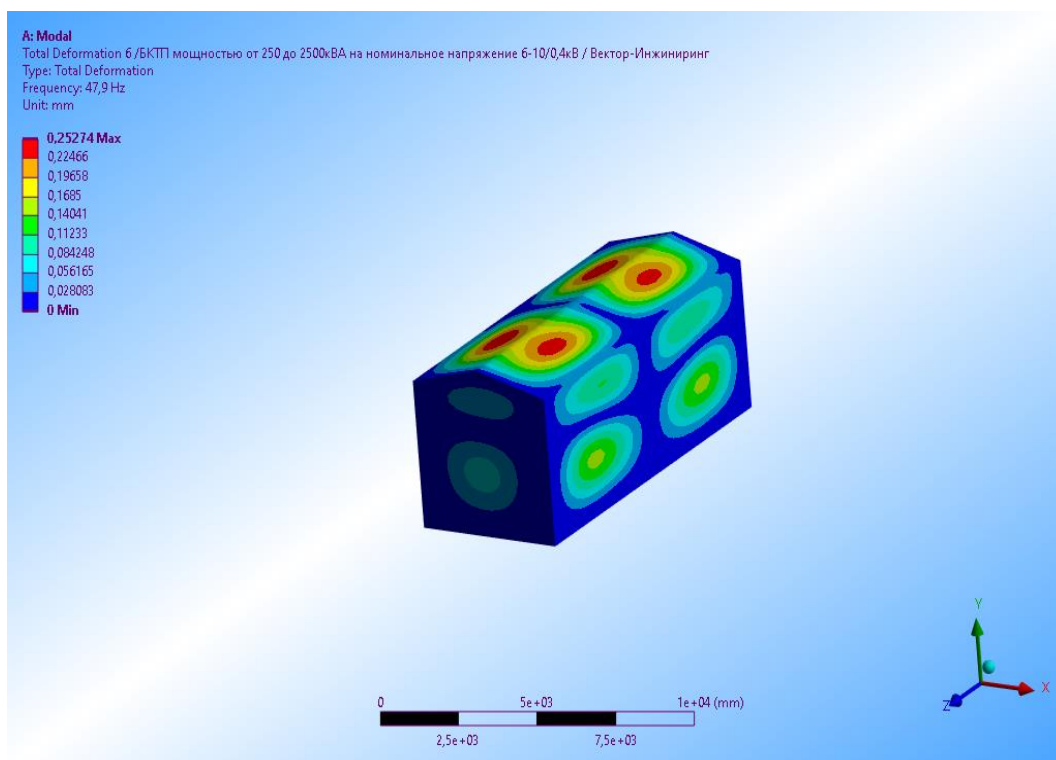


Рис. 10. Амплитуда при 6-й форме колебаний [мм]

Анализ сейсмического воздействия на изделие:

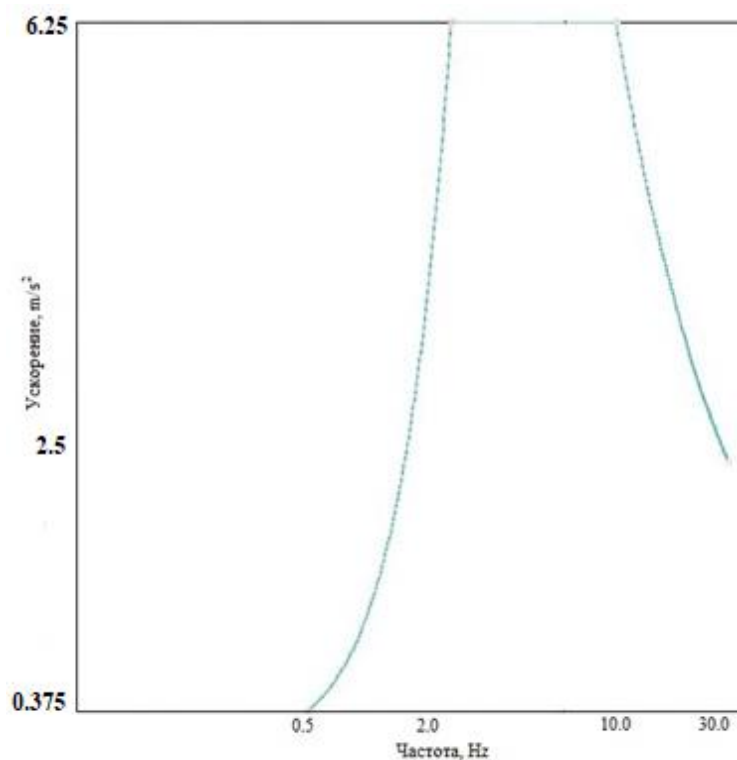


Рис. 11. График зависимости между максимальной амплитудой ускорения и частотой синусоидальной вибрации – расчетный спектр воздействия.

Значение частот и ускорений для характеристических точек по рисунку 11

Частота [Hz]	Ускорение [m/s ²]
0.5	0.375
2	6.25
10	
30	
	2.5

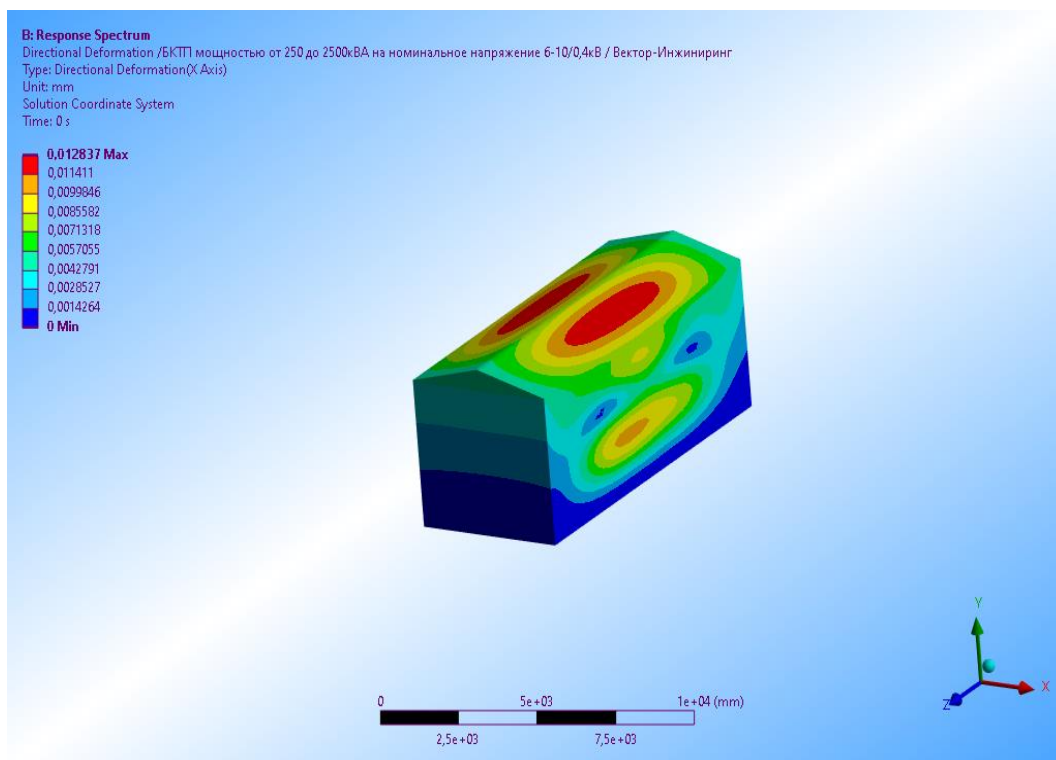


Рис. 12. Деформации по оси X [мм]

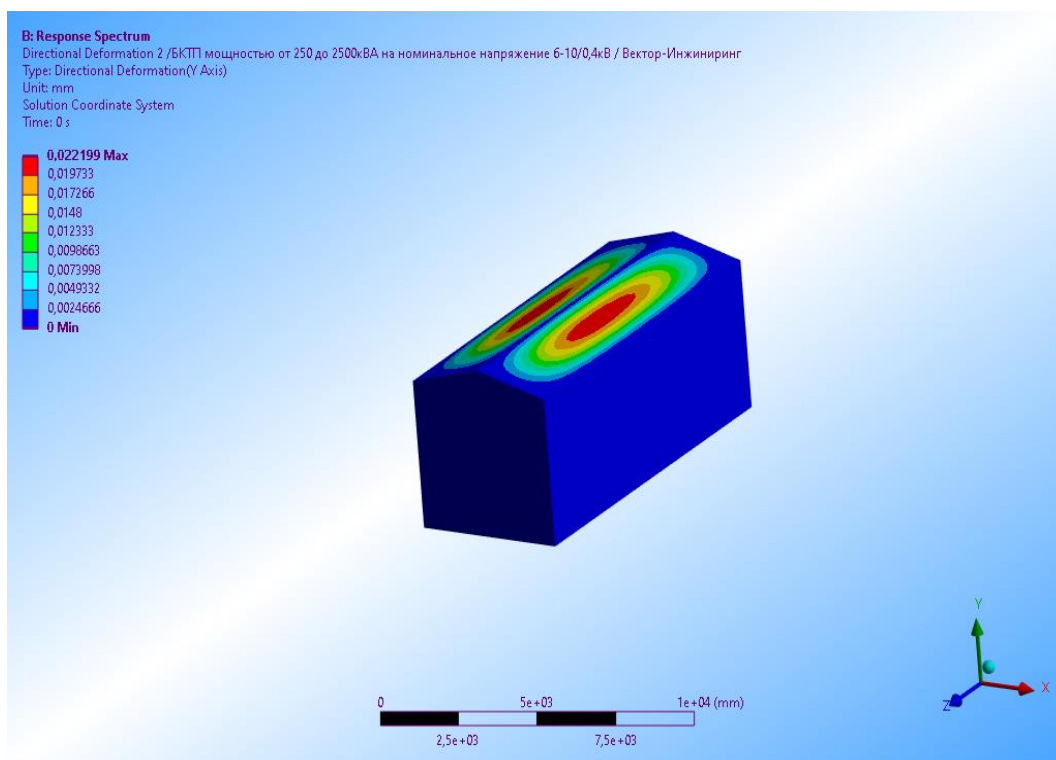


Рис. 13. Деформации по оси Y [мм]

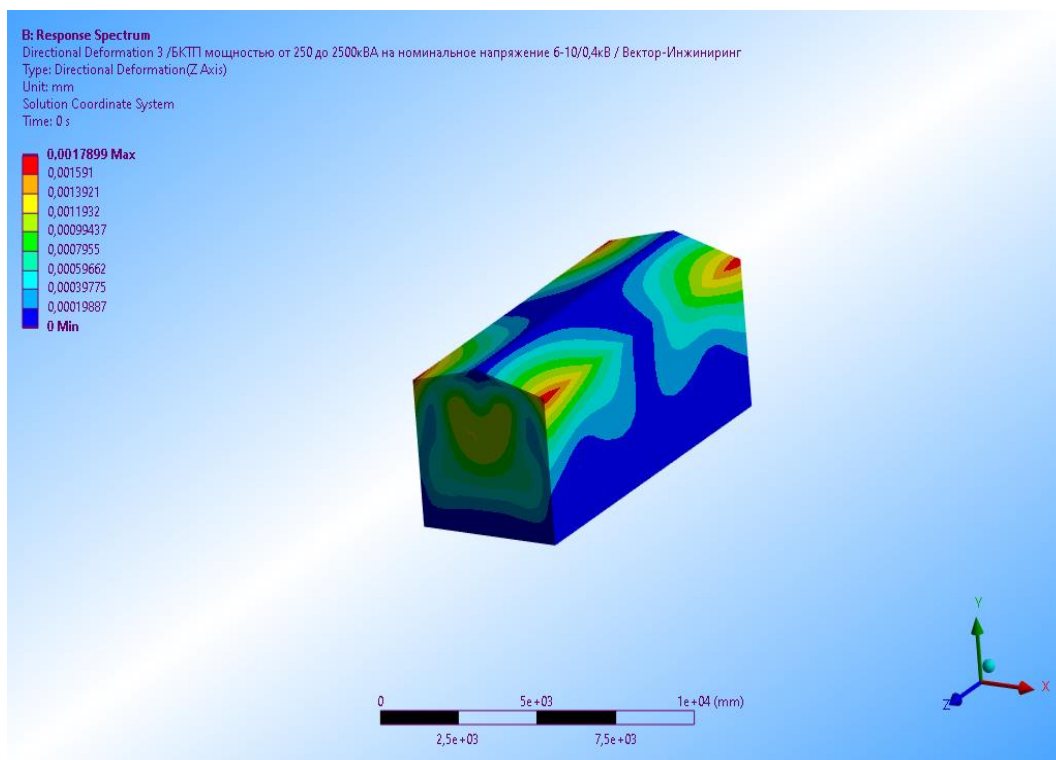


Рис. 14. Деформации по оси Z [мм]

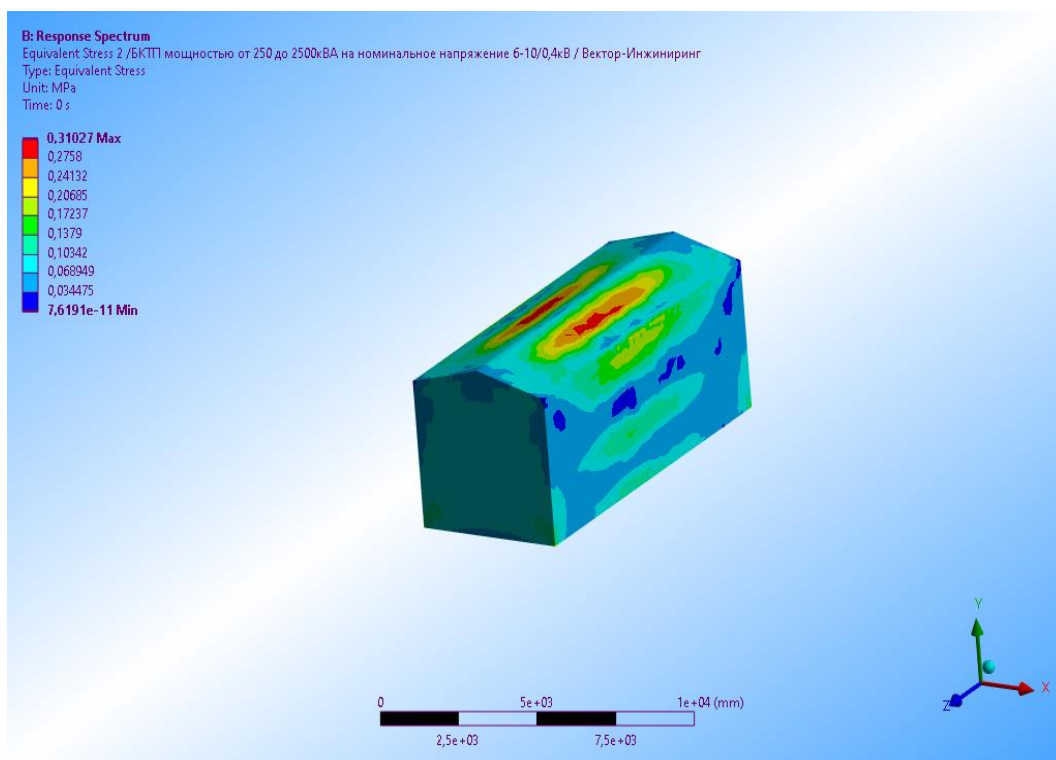


Рис. 15. Эквивалентные напряжения [МПа]

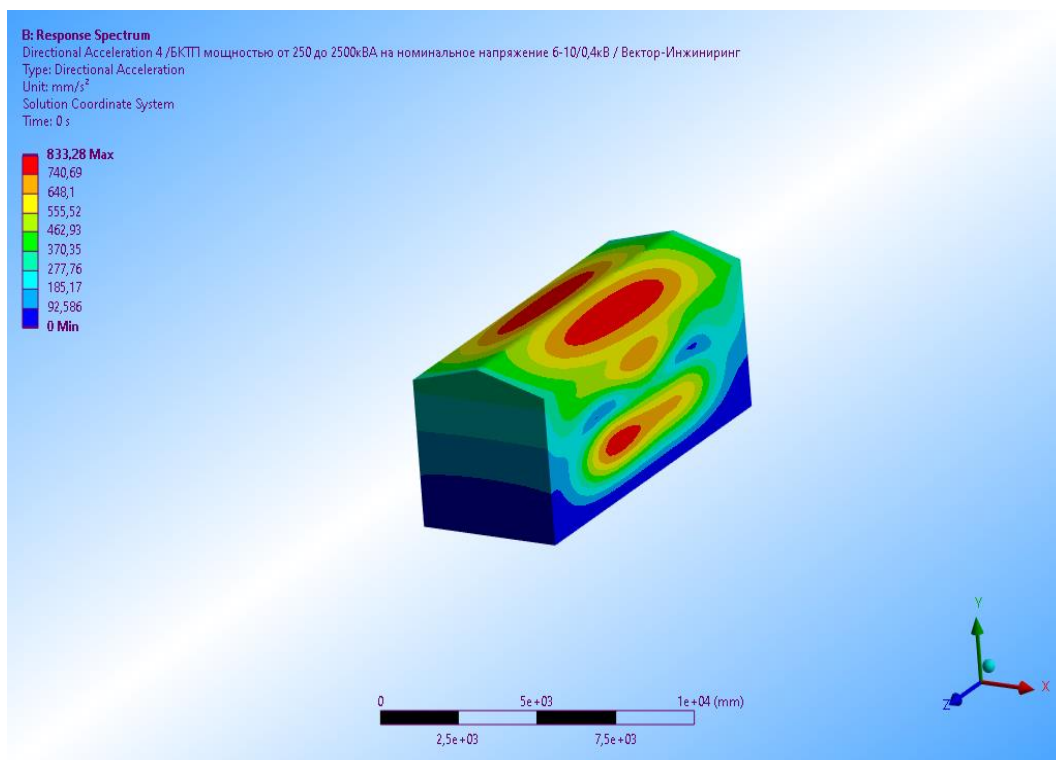


Рис. 16. Ускорения по оси X [мм/с²]

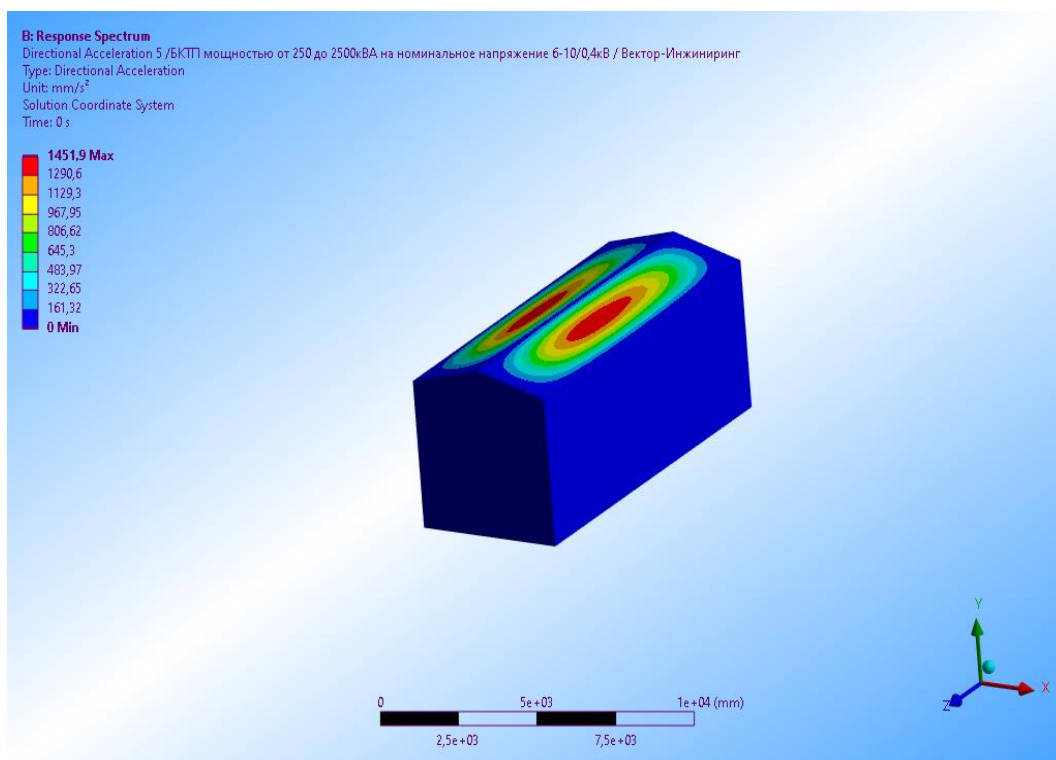


Рис. 17. Ускорения по оси Y [мм/с²]

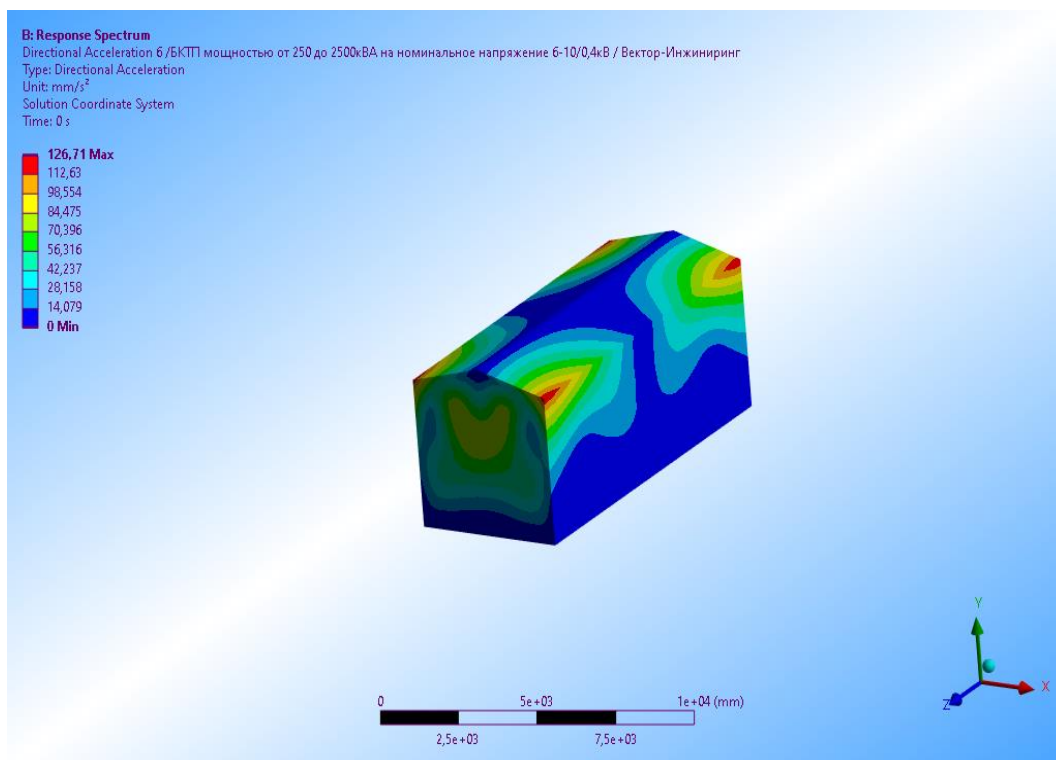


Рис. 18. Ускорения по оси Z [мм/с²]

Визуализация коэффициента запаса прочности:

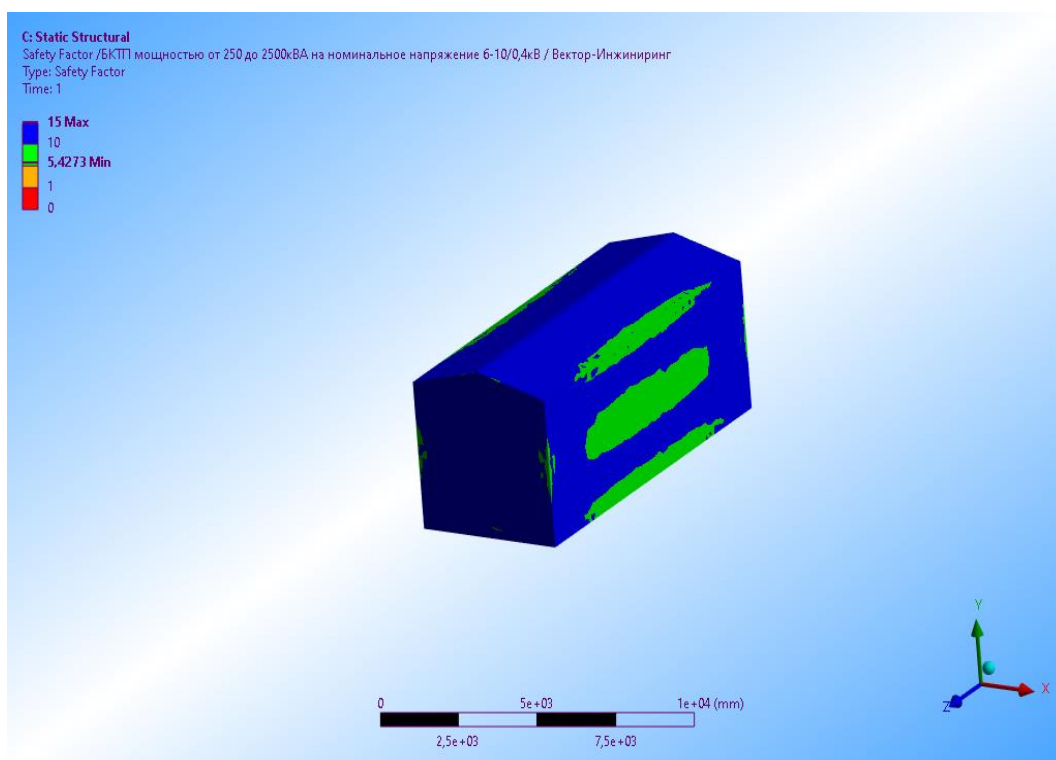


Рис. 19. Визуальный коэффициент запаса прочности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

1. Испытание на сейсмическое воздействие выполнено расчетным методом на основании ГОСТ 30546.1-98 «Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета их сложных конструкций в части сейсмостойкости», ГОСТ 30546.2-98 «Испытания на сейсмостойкость машин, приборов и других технических изделий», ГОСТ 30546.3-98 «Методы определения сейсмостойкости машин, приборов и других технических изделий, установленных на месте эксплуатации, при их аттестации или сертификации на сейсмическую безопасность».

2. В расчете представлены собственные частоты колебаний изделия, сейсмическое воздействие, визуализация коэффициента запаса прочности;

3. На основании проведенного расчёта можно сделать выводы, что прочность изделия от сейсмического воздействия в 9 баллов по шкале MSK-64 на высоте 70 метров над нулевой отметкой **обеспечена**.

Испытания провел:

Инженер по испытаниям

_____
Левин А.А.