



## СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА/STRUCTURAL MECHANICS

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.72.8>

EDN: QXFKLN

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ОТ МАССИВНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПОД  
ВИБРОАКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Научная статья

Мондрус В.Л.<sup>1</sup>, Парамонов Е.Е.<sup>2</sup>, Панов М.А.<sup>3,\*</sup>, Ганджунцев М.И.<sup>4</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-5029-871X;<sup>1, 2, 3, 4</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (pnmvx[at]mail.ru)

Предложена: 28.03.2026; Принята: 07.05.2026; Опубликовано: 21.05.2026

**Аннотация**

Целью исследования является сравнительный анализ применения различных методик, описанных в научно-технической литературе, в том числе с применением численного моделирования методом конечных элементов, для определения уровней колебаний распространяющихся через грунт от массивных фундаментов при работе виброактивного оборудования. Исследование включает сопоставление результатов расчета колебаний массивного фундамента методом, основанным на построении передаточных и импульсных переходных функций и при численном моделировании в расчетном комплексе ANSYS с применением явной схемы интегрирования уравнений движения. По итогам работы были построены результирующие графики затухания сейсмических волн в грунте и сформулированы выводы о применимости рассмотренных подходов.

**Ключевые слова:** массивные фундаменты, сейсмические волны, виброактивное оборудование, импульсная переходная функция, передаточная функция, численное моделирование, МКЭ.

## THE SPREAD OF SEISMIC WAVES FROM MASSIVE FOUNDATIONS SUPPORTING VIBRATING EQUIPMENT

Research article

Mondrus V.L.<sup>1</sup>, Paramonov Y.Y.<sup>2</sup>, Panov M.A.<sup>3,\*</sup>, Gandzhuntsev M.I.<sup>4</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-5029-871X;<sup>1, 2, 3, 4</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

\* Corresponding author (pnmvx[at]mail.ru)

Suggested: 28.03.2026; Accepted: 07.05.2026; Published: 21.05.2026

**Abstract**

The aim of the study is to conduct a comparative analysis of the application of various methods described in the scientific and technical literature, including the use of finite element numerical modelling, to determine the levels of vibrations spreading through the soil from massive foundations during the operation of vibrating equipment. The research includes a comparison of the results of calculating vibrations in a massive foundation using a method based on the construction of transfer and impulse response functions, and numerical modelling in the ANSYS software package using an explicit integration scheme for the equations of motion. Based on the results of the study, graphs of seismic wave attenuation in the ground were drawn up and conclusions were formulated regarding the applicability of the examined approaches.

**Keywords:** massive foundations, seismic waves, vibrating equipment, impulse response, transfer function, numerical simulation, FEM.

**Введение**

Сейсмические волны от разных промышленных источников (виброактивного оборудования) оказывают во многих случаях вредное влияние на целые предприятия, различные здания и сооружения, технологические процессы и на людей, длительно находящиеся в них [1], [2], [3].

Высокочастотные машины безопасны в отношении влияния колебаний распространяющихся через грунт на здания и сооружения, в связи с тем, что частоты собственных колебаний зданий значительно ниже собственных частот колебаний высокочастотных машин, однако колебания от низкочастотных машин могут вызывать существенные вибрации сооружений, в частности, при совпадении частот и появлении резонанса. Установки с ударным воздействием на фундамент вызывают значительные колебания самого фундамента (могут достигать 1.5 мм и более), однако в силу отсутствия периодического воздействия не могут вызвать резонанс соседних зданий и сооружений и оказывают опасные сотрясения только в непосредственной близости [1], [2].

В работе В.М. Пятецкова и О.А. Савинова [2] в табличной форме собраны основные результаты обследований различных объектов, в частности, промышленных зданий при действии на них динамических воздействий от виброактивного оборудования. Фундаменты под оборудование во всех случаях были отделены от фундаментов зданий и расположены на различных расстояниях вплоть до 20–30 метров и более друг от друга, а машины имели различного рода характер воздействий (гармонические, импульсные, случайные). В результате были отмечены различные

негативные эффекты в зданиях: деформации каркаса, неравномерные осадки, в частности, более 50 см, сквозные трещины в несущих конструкциях и перегородках с раскрытием до 1.5 см, наличие крена и т.д.

Поэтому изучение действия сейсмических волн от промышленных источников, в том числе при групповой установке, на сооружения, развитие различных методик по оценке уровней колебаний распространяющихся через грунт и разработка способов уменьшения или уничтожения вредного влияния сейсмических волн, имеют большое практическое значение.

### Методы и принципы исследования

Существуют различные методики для определения уровней колебаний распространяющихся через грунт от фундаментов промышленных машин, однако наиболее универсальным методом является численный расчет методом конечных элементов (МКЭ), так как позволяет моделировать нелинейные свойства грунтов с учетом неоднородности реального напластования.

Для оценки уровней колебаний распространяющихся от фундаментов машин с динамическими нагрузками по различным методикам предварительно необходимо произвести расчет колебаний массивного фундамента для получения амплитуд вынужденных вертикальных и горизонтальных колебаний фундамента, с целью дальнейшего применения в формулах.

Наиболее распространенными методами расчета массивных фундаментов, заглубленных в грунт являются метод основанный на построении передаточных функций (ПФ) и импульсных переходных функций (ИПФ) и формулы содержащиеся в СП 26.13330 «Фундаменты машин с динамическим нагрузками». Применяется метод основанный на построении ПФ и ИПФ.

### Основные результаты

#### 3.1. Расчет массивного фундамента методом основанным на построении ПФ и ИПФ

Общая схема расчета фундаментов, заглубленных в грунт, для наиболее общего случая возможных воздействий — под оборудование с вращающимися частями приведена в [4].

Если центр масс системы лежит на оси симметрии реакции грунтового основания, система уравнений движения распадается на вертикальные (1) и горизонтально-вращательные колебания (2). Основная расчетная схема массивного фундамента, заглубленного в грунт изображена на рисунке 1.

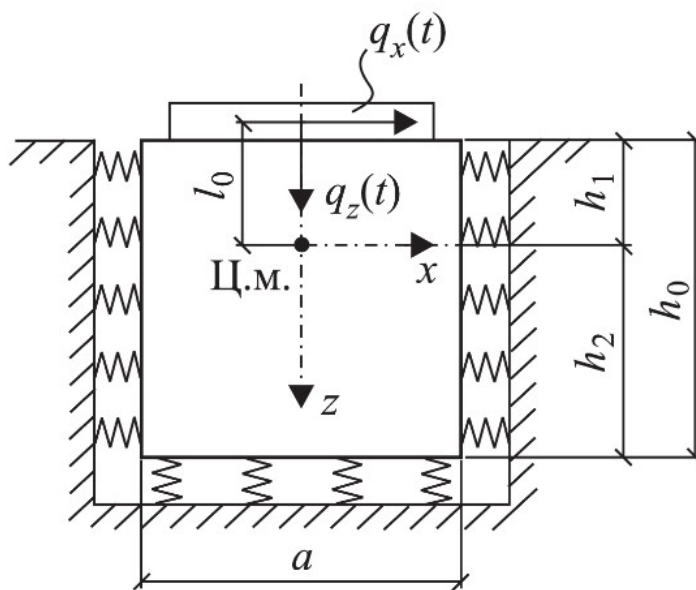


Рисунок 1 - Расчетная схема массивного фундамента, заглубленного в грунт  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.72.8.1>

Дифференциальные уравнения движения такой системы:

$$m\ddot{s}_z + K_z s_z = q_z(t) \quad (1)$$

$$\begin{cases} mp_y^2 \ddot{\vartheta}_y + K_g \vartheta_y - K_{xz} s_x = q_x(t) l_0 + M_y(t) \\ m\ddot{s}_x - K_{xz} \vartheta_y + K_x s_x = q_x(t) \end{cases} \quad (2)$$

где  $s_z$ ,  $s_x$ ,  $\vartheta_y$  — вертикальное, горизонтальное смещение центра масс и угол поворота объекта относительно оси  $oy$ ;  $m$  — общая масса фундамента и оборудования:

$$m = m_\phi + m_{об}, \quad (3)$$

где  $m_\phi$ ,  $m_{об}$  — масса фундамента и оборудования соответственно;



$K_z, K_\theta, K_{xz}, K_x$  — жесткостные характеристики системы;  
 $q_z(t), q_x(t)$  — вертикальная и горизонтальная составляющие внешней нагрузки;  
 $M_y(t)$  — дополнительный момент внешних сил относительно оси  $oy$ ;  
 $l_0$  — эксцентриситет горизонтальной составляющей нагрузки относительно центра масс;  
 $p_y$  — радиус инерции объекта относительно оси  $oy$ .  
 Жесткостные характеристики системы определяются зависимостями [4]:

$$\begin{aligned} K_z &= b (c_{za} + 2c_{z\sigma}h_0); K_x = b (c_{xa} + 2c_{x\sigma}h_0); \\ K_{x\varphi} &= b (c_{x\varphi}h_2a + c_{x\varphi\sigma}(h_2^2 - h_1^2)); \\ K_\varphi &= b \left( c_{x\varphi}h_2^2a + \frac{c_{z\varphi}a^3}{12} + \frac{2c_{x\varphi\sigma}(h_1^3 + h_2^3)}{3} + \frac{c_{z\varphi\sigma}a^2h_0}{2} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $c_z, c_{z\sigma}, c_x, c_{x\sigma}$  — коэффициенты упругого равномерного сжатия по нижней грани, сдвига по боковой грани, сдвига по нижней грани, сжатия по боковой грани соответственно;

$c_{z\varphi}, c_{x\varphi}, c_{x\varphi\sigma}, c_{z\varphi\sigma}$  — коэффициенты упругого неравномерного сжатия по нижней грани, сдвига по нижней грани, сжатия по боковой грани, сдвига по боковой грани соответственно.

Воспользовавшись методом основанным на построении ПФ и ИПФ [3] записываются решения дифференциальных уравнений движения (1), (2) в виде сумм интегралов Дюамеля. Не останавливаясь подробно на построении ПФ и ИПФ запишем решения дифференциальных уравнений движения [4]:

$$\begin{aligned} s_z &= \int_0^t q_z(\tau)k_z(t-\tau)d\tau \\ s_x &= \int_0^t [q_x(\tau)k_{11}(t-\tau) + M_y(\tau)k_{12}(t-\tau)] d\tau \\ s_y &= \int_0^t [q_x(\tau)k_{21}(t-\tau) + M_y(\tau)k_{22}(t-\tau)] d\tau \end{aligned} \quad (5)$$

где  $k_z(t), k_{11}(t), k_{12}(t), k_{21}(t), k_{22}(t)$  — ИПФ [4].

### 3.2. Распространение колебаний через грунт от массивного фундамента под виброактивное оборудование

#### 3.2.1. Методика по СП 26.13330 «Фундаменты машин с динамическими нагрузками»

Согласно действующим нормам [5] амплитуды вертикальных (горизонтальных) колебаний грунта при вертикальных (горизонтальных) вибрациях фундамента машины – источника волн предлагается рассчитывать по формуле:

$$a_s = a_0 \left\{ \frac{1}{\delta[1+(\delta-1)^2]} + \frac{\delta^2-1}{(\delta^2+1)\sqrt{3\delta}} \right\}, \quad (6)$$

где  $a_s$  — амплитуда вертикальных (горизонтальных) колебаний грунта на поверхности в точке, расположенной на расстоянии  $r$  от оси фундамента-источника волн в грунте;

$a_0$  — амплитуда свободных или вынужденных вертикальных (горизонтальных) колебаний фундамента источника волн на уровне его подошвы;

$$\delta = \frac{r}{r_0} \quad (7)$$

где приведенный радиус площади подошвы фундамента-источника:

$$r_0 = \sqrt{A/\pi} \quad (8)$$

Формула (6) является весьма приближенной: не учитывает свойств грунтов строительной площадки, формы фундамента-источника волн, вида и частотную характеристику динамического воздействия на этот фундамент.

#### 3.2.2. Методика по формуле Голицына [1], [3]

Если основание однородно, уменьшение амплитуд колебаний, вызванных поверхностными волнами, с удалением от источника приближенно может оцениваться по формуле [1], [3]:

$$A_2 = A_1 \sqrt{r_1/r_2} * e^{-\alpha(r_2-r_1)} \quad (9)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  — амплитуды колебаний на расстоянии  $r_1$  и  $r_2$  от источника;

$\alpha$  — коэффициент поглощения (в  $m^{-1}$ ), который характеризует демпфирующие свойства основания.

В [1], [6], [7] приведены некоторые коэффициенты поглощения  $\alpha$  для различных типов грунтов.

#### 3.2.3. Методика приведенная в работах В.М. Пятецкова и О.А. Савинова [2]

В основу методики положены результаты теоретического исследования распространения волн в упругом полупространстве при сосредоточенных горизонтальных, вертикальных и моментных воздействиях, выполненных Я.Д. Гимзельбергом и К.И. Огурцовым [8], [9]. В ходе этого исследования были построены зависимости максимальных смещений поверхности полупространства от относительного расстояния  $r/s$ .

Наиболее точно характер затухания колебаний, вызванных работой промышленных установок, выражается формулами [2]:

- для вертикальных воздействий

$$a_w = a^{(w)} k_{\Pi} W e^{-\eta(r-s)}; \quad (10)$$

- для горизонтальных воздействий

$$a_r = a_\phi^{(x)} k_{\Pi} U_r e^{-\eta(r-s)} \cos \theta \quad (11)$$

$$a_\theta = a_\phi^{(x)} k_{\Pi} U_\theta e^{-\eta(r-s)} \sin \theta \quad (12)$$

где  $a_w$  — амплитуды вертикальных колебаний грунта на расстоянии  $r$  от центра площади подошвы фундамента;  
 $a_\phi^{(w)}$ ,  $a_\phi^{(x)}$  — амплитуды вертикальных и горизонтальных (в направлении действия вынуждающей силы) колебаний фундамента;

$W$ ,  $U_r$ ,  $U_\theta$  — вертикальная, радиальная и тангенциальная составляющие максимального смещения поверхности грунта, выраженная в процентах от максимального смещения грунта непосредственно рядом с фундаментом в рассматриваемом направлении в зависимости от параметра  $v_0$ ;

$s$  — расстояние от центра площади подошвы фундамента от точки пересечения указанной линии с контуром подошвы (полуразмер подошвы фундамента);

$r$  — расстояние от источника до рассматриваемой точки;

$\theta$  — угол между направлением действия вынуждающей силы и линией, соединяющей центр тяжести площади подошвы фундамента с точкой наблюдения;

$k_{\Pi}$  — коэффициент перепада равный отношению амплитуды колебаний грунта рядом с фундаментом к амплитуде колебаний фундамента, зависящий от соотношения между частотами собственных и вынужденных колебаний источника и от характеристик упругости грунтов основания;

$\eta$  — безразмерный параметр, учитывающий особенности приложения динамической нагрузки.

### 3.2.4. Численное моделирование МКЭ

Для решения поставленной задачи расчета колебаний массивного фундамента и для оценки распространения сейсмических волн от них используется явный динамический анализ реализованный в программном комплексе ANSYS с использованием решателя LS-DYNA.

Уравнения движения для идеального упругого тела, в которых объемные силы положены нулю, можно записать [10], [11]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \end{aligned} \quad (13)$$

Для решения дифференциальных уравнений в частных производных (13) используется явная схема интегрирования. Уравнения (13) выражают законы сохранения массы, импульса и энергии в Лагранжевых координатах. Эти уравнения, вместе с моделью материала и набором начальных и граничных условий, определяют полное решение задачи.

Для обеспечения стабильности и точности решения размер шага по времени, используемого при явном интегрировании по времени, ограничивается условием Куранта-Фридрихса-Леви [12].

### Результаты расчета

Для расчета примем размеры и дополнительные характеристики массивного фундамента:

$a = b = 2,0$  м — длина и ширина массивного фундамента;

$h_0 = 1,5$  м — высота фундамента;

$h_1 = 0,5$  м,  $h_2 = 1,0$  м (см. рис. 1);

$m_\phi = 25$  т — масса фундамента;

$\mu_\phi = 0,2$  — коэффициент Пуассона массивного фундамента.

На фундамент установлено виброактивное оборудование с вращающимися частями с характеристиками:

$m_{об} = 4$  т — масса оборудования;

$l_0 = 1,5$  м — расстояние от точки приложения силы до центра масс;

$r_y = 0,902$  м — радиус инерции;

$Q = 10$  кН — амплитуда динамической нагрузки от виброактивного оборудования;

$\omega = 157$  рад/с (25 Гц) — круговая частота нагрузки от оборудования.

Характеристики грунта (суглинки):

$E = 50$  МПа — модуль упругости грунта;

$\rho_r = 1,8$  т/м<sup>3</sup> — плотность грунта;

$\mu_r = 0,3$  — коэффициент Пуассона грунта;

$\phi = 26^\circ$  — угол внутреннего трения;

$c_n = 47$  кПа — удельное сцепление;

$\sigma_r = 0,047$  МПа — предельное напряжение при растяжении;

$\gamma = 0,1$  — диссипативный коэффициент.

При отсутствии экспериментальных данных значение  $c_z$  для фундаментов допускается определять [2]:

$$c_z = b_0 E \left( 1 + \sqrt{\frac{A_{10}}{A}} \right) = 1,549 \cdot 10^5 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3} \quad (14)$$

где  $b_0 = 1,2$  м<sup>-1</sup> — коэффициент принимаемый для суглинков и супесей;

$A = a \cdot b = 4 \text{ м}^2$  — площадь фундамента;

$A_{10} = 10 \text{ м}^2$ .

Значения упругих коэффициентов постели грунта примем, полагая, что они зависят от основного коэффициента постели грунта  $c_z$  [4]:  $c_x = c_z$ ;  $c_{zб} = c_{xб} = c_{zфб} = 0,7c_z$ ;  $c_{zф} = 2,1c_z$ ;  $c_{xф} = c_{xфб} = 0,8c_z$ .

#### 4.1. Колебания массивного фундамента при использовании метода основанного на построении ПФ и ИПФ

Расчет производится в системе компьютерной алгебры и инженерных расчетов MathCAD. Время интегрирования Вертикальные, горизонтальные перемещения и угол поворота системы вокруг оси отображены на рисунках 2, 3, 4 соответственно. Расчет производится с учетом переходных режимов (пуска и остановки), однако, так как частоты собственных вертикальных и горизонтально-вращательных колебаний системы выше частоты возмущающей силы, переход через резонанс не наблюдается.

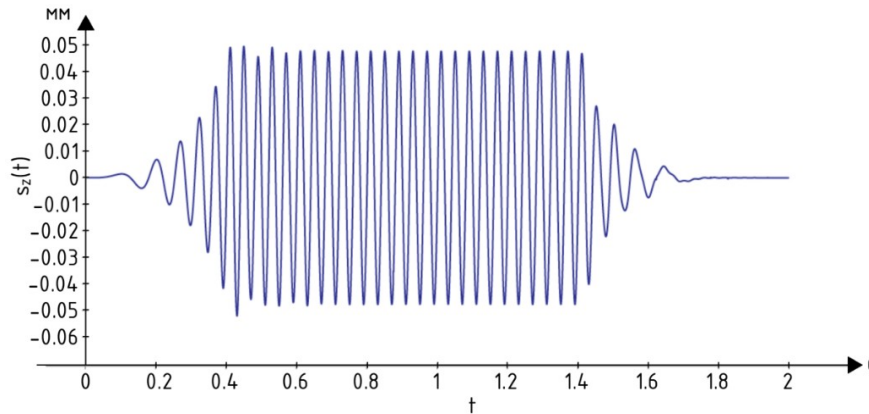


Рисунок 2 - Вертикальные колебания системы

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.72.8.2>

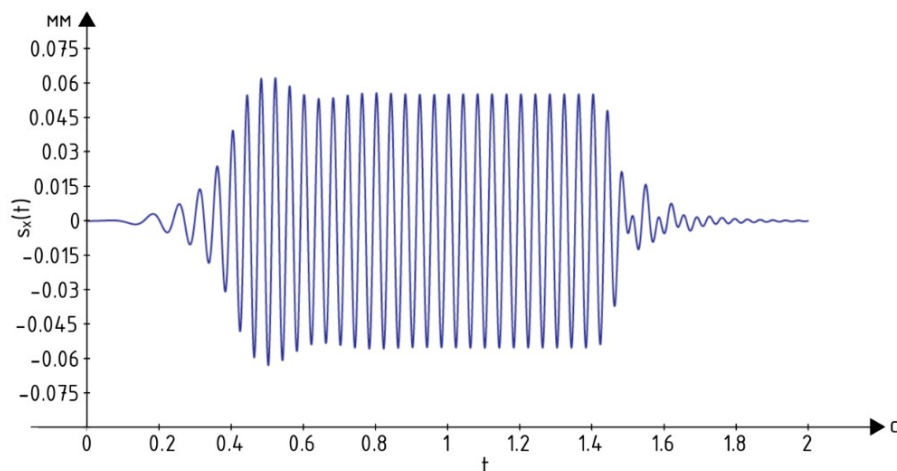


Рисунок 3 - Горизонтальные колебания системы

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.72.8.3>

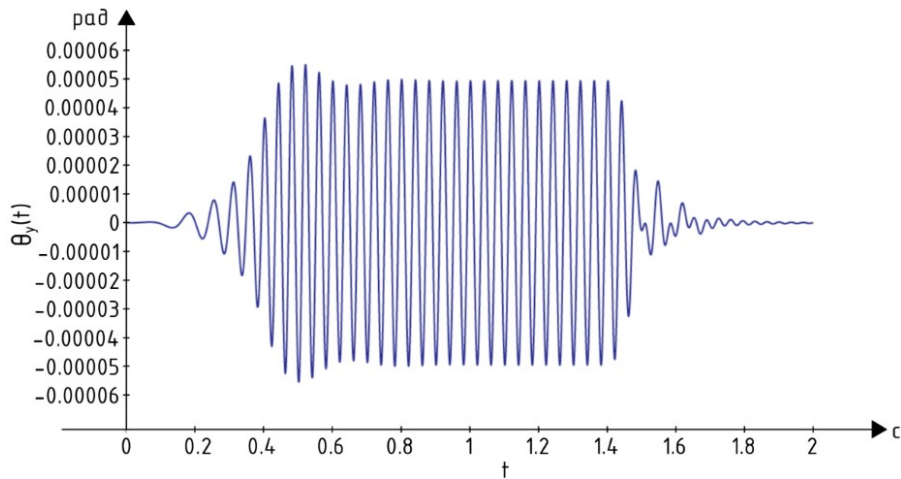


Рисунок 4 - Угол поворота системы вокруг оси  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.72.8.4>

#### 4.2. Численное моделирование колебаний массивного фундамента МКЭ

Для моделирования грунтового основания и массивного фундамента в программном комплексе ANSYS используются трехмерные конечные элементы: для грунта в виде тетраэдра, для фундамента – гексаэдры. Размер конечного элемента фундамента равен 0.1 м. Используется модель прочности для грунта Друккера-Прагера [12].

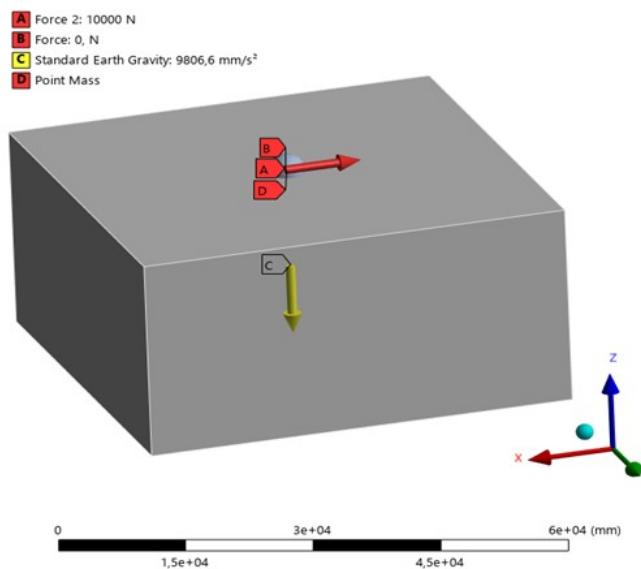


Рисунок 5 - Расчетная схема реализованная в ANSYS  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.72.8.5>

Время моделирования с. Численное моделирование производится без учета режимов пуска и остановки оборудования (нарастания и убывания числа оборотов оборудования).

Вертикальные, горизонтальные перемещения системы при решении МКЭ отображены на рисунках 6, 7 соответственно.

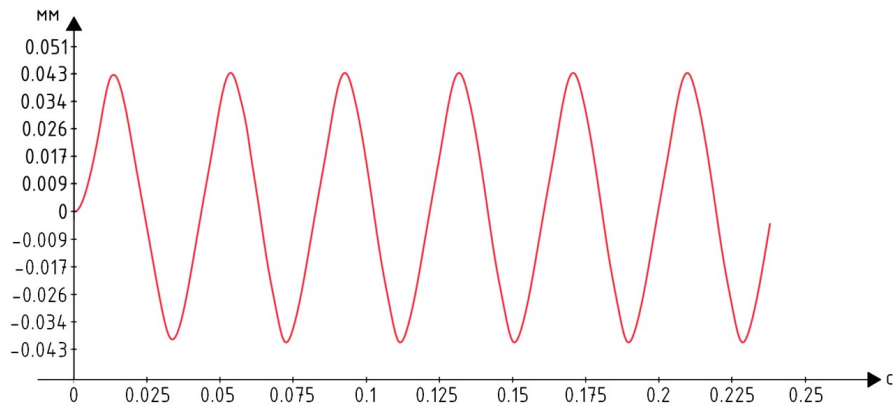


Рисунок 6 - Вертикальные колебания системы по оси Z  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.72.8.6>

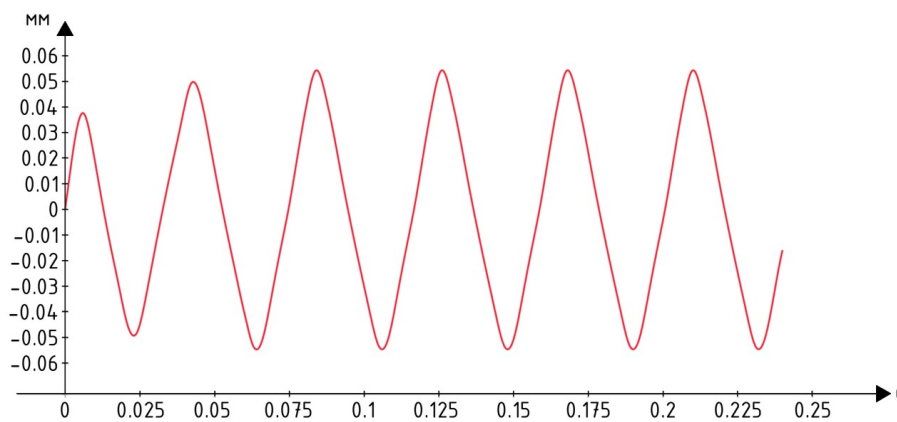


Рисунок 7 - Горизонтальные колебания системы по оси X  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.72.8.7>

### 4.3. Сравнение результатов

В таблице 1 отображены результаты расчетов массивного фундамента, заглубленного в грунт при действии динамических нагрузок от машины с вращающимися частями, произведенные методом основанным на ПФ и ИПФ и численным моделированием МКЭ в ANSYS.

Таблица 1 - Результаты расчетов массивного фундамента, заглубленного в грунт

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.72.8.8>

Вариант расчета массивного фундамента	Максимальные амплитуды колебаний массивного фундамента (мм)	
	Вертикальные перемещения	Горизонтальные перемещения
Метод основанный на построении ПФ и ИПФ	0.05213 мм	0.06211 мм
Численное моделирование МКЭ (ANSYS)	0.04285 мм	0.05438 мм

При использовании численного моделирования МКЭ значения максимальных амплитуд вертикальных колебаний оказались на 22% ниже, а горизонтальных — на 15% ниже по сравнению с результатами, полученными по методу с использованием ПФ и ИПФ.

### 4.4. Распространение сейсмических волн от массивного фундамента под виброактивное оборудование по различным методикам

При расчете по формулам (10) – (12) разработчики методики рекомендую воспользоваться графиком, отображенным на рисунке 8, для учета коэффициента перепада  $k_{П}$ , однако указано, что данный график построен для низкочастотных неуравновешенных машин. Для расчета используется машина с частотой возмущения 25 Гц (1500 цикл/мин), что относит ее к среднечастотной машине в соответствии с таблицей 6 [13]. Рекомендаций по величине коэффициента перепада для такого рода машин нет. Таким образом, целесообразность применения данного

коэффициента перепада  $k_{\Pi}$  в нашем случае однозначно не ясна. В связи с этим результирующие графики распространения колебаний от фундаментов машин построены для двух вариантов: с учетом коэффициента перепада  $k_{\Pi} = 0.4$  в соответствии с рисунком 8 и  $k_{\Pi} = 1$  (перепад амплитуд колебаний между фундаментом машины и грунтом рядом с ним не учитывается).

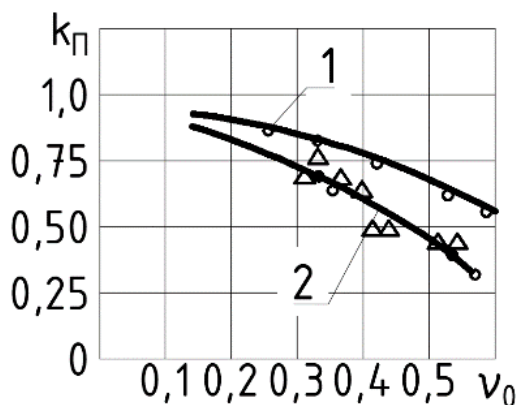


Рисунок 8 - Зависимость коэффициента перепада  $k_{\Pi}$  от параметра  $\nu_0$ :

1 – вертикальное импульсное воздействие (о-о); 2 – вертикальное ( $\Delta$ - $\Delta$ ) или горизонтальное (о-о) гармонические воздействия

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.72.8.9>

Для оценки уровней колебаний распространяющихся от массивного фундамента под виброактивное с помощью численного моделирования МКЭ в программном комплексе ANSYS воспользуемся расчетной схемой отображенной на рисунке 5.

Границы расчетной схемы приняты из условия неотражения волн распространяющихся от массивного фундамента. При времени интегрирования секунды волна примерно достигает необходимых для анализа расстояний в 20 м от грани массивного фундамента.

На рисунке 9 отображены изополя полных деформации системы.

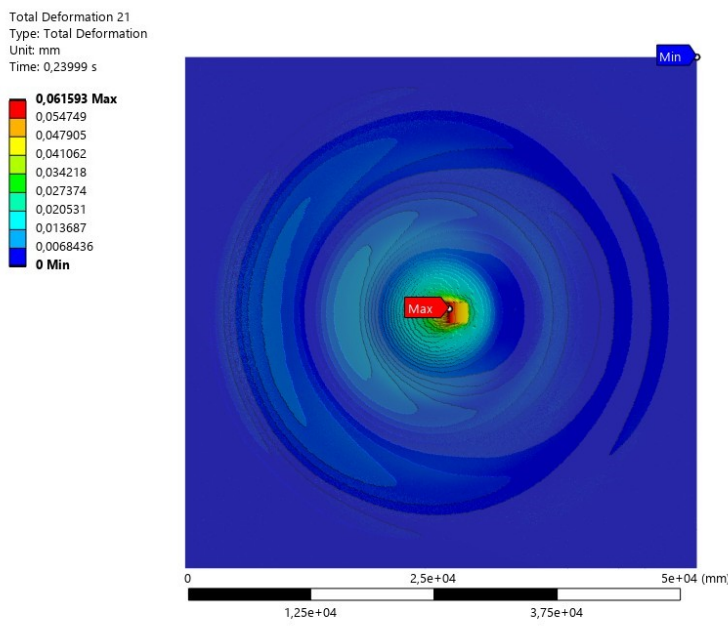


Рисунок 9 - Изополя полных деформаций системы при численном моделировании МКЭ

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.72.8.10>

По результатам расчета по формулам (6), (9), (10) – (12) и при численном моделировании МКЭ были построены графики затухания амплитуд вертикальных и горизонтальных колебаний в процентах от максимального уровня колебаний и расстояния от грани массивного фундамента, что отображено на рисунках 10 и 11.

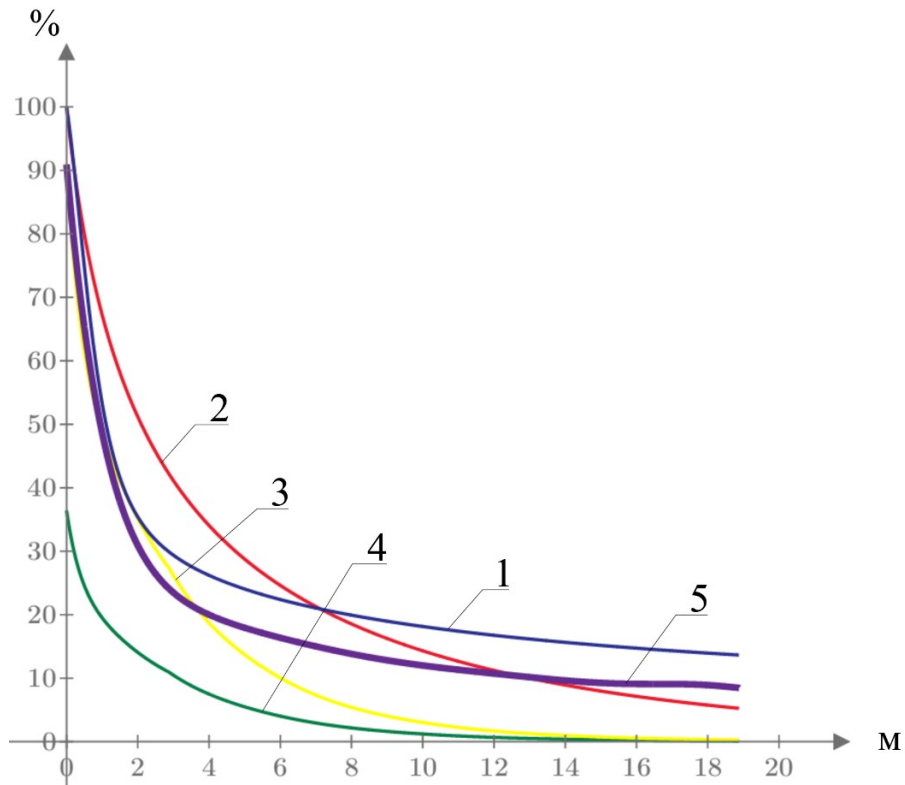


Рисунок 10 - Распространение вертикальных колебаний от массивного фундамента с установленной машиной с вращающимися частями в процентах от максимального уровня колебаний:

1 – по формуле (6); 2 – по формуле (9); 3 – по формуле (10) с  $k_{п}=1$ ; 4 – по формуле (10) с  $k_{п}=0,4$ ; 5 – численное моделирование МКЭ

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.72.8.11>

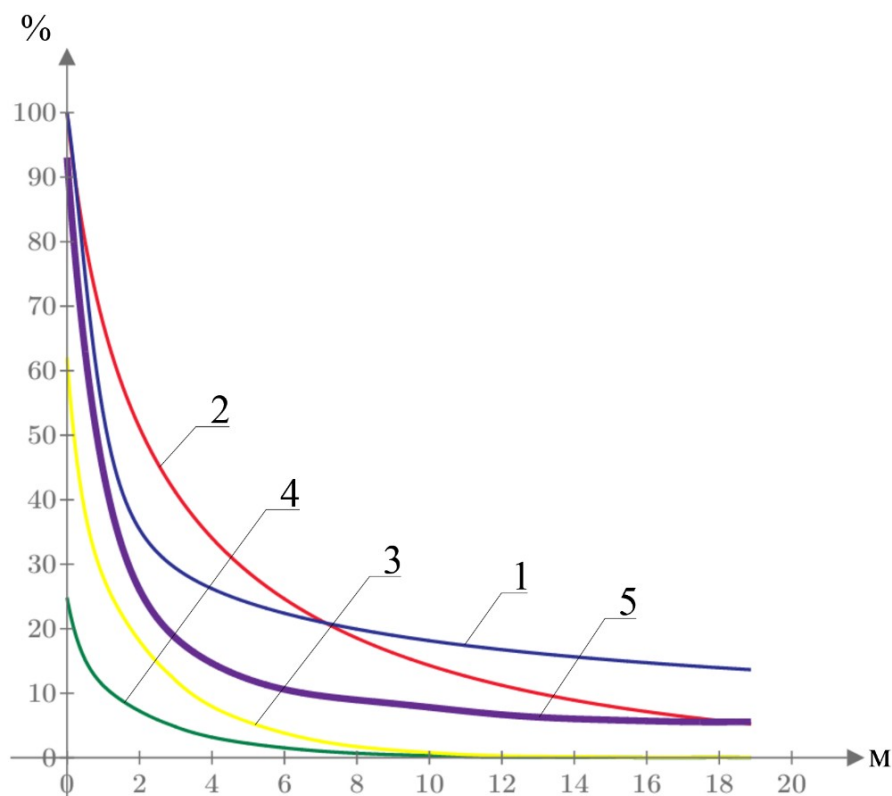


Рисунок 11 - Распространение горизонтальных колебаний от массивного фундамента с установленной машиной с вращающимися частями в процентах от максимального уровня колебаний:

1 – по формуле (6); 2 – по формуле (9); 3 – по формуле (11) с  $k_{п}=1$ ; 4 – по формуле (11) с  $k_{п}=0,4$ ; 5 – численное моделирование МКЭ

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.72.8.12>

### Заключение

1. Численный расчет массивных фундаментов МКЭ демонстрирует хорошую сходимость в оценке колебательных процессов в сравнении с результатами полученными методом основанным на построении ПФ и ИПФ.

2. Наименьшие уровни колебаний на расстоянии от грани массивного фундамента наблюдаются при расчете по методике предложенной В.М. Пятецким и О.А. Савиновым и не превышают 5% от максимальных на расстоянии 10 метров. На расстоянии 18–20 метров от грани массивного фундамента уровни колебаний не превышают 10% при расчете по всем методикам.

3. Численное моделирование МКЭ дает удовлетворительные результаты для дальнейшего применения к расчету определения уровней колебаний распространяющихся через грунт от массивного фундамента для возможности дальнейшего принятия решений по защите окружающей застройки.

4. Численное моделирование позволяет учитывать реальное напластование слоев грунта с учетом физико-механических свойств каждого из них, что позволяет производить более детализированные расчеты, в том числе при групповой установке виброактивного оборудования, как на отдельностоящих фундаментах, так и при установке на общем фундаменте.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Баркан Д.Д. Динамика оснований и фундаментов / Д.Д. Баркан. — Москва: Стройвоенмориздат, 1948. — 411 с.
2. Пятецкий В.М. Современные фундаменты машин и их автоматизированное проектирование / В.М. Пятецкий, Б.К. Александров, О.А. Савинов. — Москва: Стройиздат, 1993. — 415 с.



3. Чернов Ю.Т. Вибрации строительных конструкций. Аналитические методы расчета. Основы проектирования и нормирования вибраций строительных конструкций, подвергающихся эксплуатационным динамическим воздействиям / Ю.Т. Чернов. — Москва: АСВ, 2011. — 384 с.
4. Волкова М.В. Расчет массивных фундаментов, заглубленных в грунт, под виброизолированное и невиброизолированное оборудование / М.В. Волкова, Ю.Т. Чернов, Д. Кбейли // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2020. — № 7. — С. 5–12. — DOI: 10.32683/0536-1052-2020-739-7-5-12.
5. СП 26.13330.2012. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. Актуализированная редакция СНиП 2.02.05-87. — Москва: ФЦС, 2012. — 70 с.
6. Климов И.В. Виброизоляция штамповочных молотов / И.В. Климов, В.П. Кошелев, В.С. Носов. — Москва: Машиностроение, 1979. — 143 с.
7. П 01-72. Методические рекомендации по определению динамическим свойств грунтов, скальных пород и местных строительных материалов. — Санкт-Петербург: Энергия, 1972. — 35 с.
8. Гимзельберг Я.Д. Инженерный метод расчета волновых полей, возникающих при работе промышленных установок с вертикальными возмущающими силами / Я.Д. Гимзельберг // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. — 1975. — Т. 109. — С. 122–130.
9. Гимзельберг Я.Д. О методике расчета колебаний, распространяющихся от фундаментов машин с горизонтальными силами на основе динамической теории упругости / Я.Д. Гимзельберг, К.И. Огурцов // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. — 1975. — Т. 109. — С. 131–136.
10. Калужнюк М.М. Сваебойные работы при реконструкции: (Влияние колебаний на здания и сооружения) / М.М. Калужнюк, В.К. Рудь. — Санкт-Петербург: Стройиздат, 1989. — 160 с.
11. Слепян Л.И. Нестационарные упругие волны / Л.И. Слепян. — Санкт-Петербург: Судостроение, 1972. — 376 с.
12. ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide / ANSYS Inc. — 2025.
13. Инструкция по расчету несущих конструкций промышленных зданий и сооружений на динамические нагрузки / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. — Москва: Стройиздат, 1970. — 288 с.

#### **Список литературы на английском языке / References in English**

1. Barkan D.D. Dinamika osnovanii i fundamentov [Dynamics of foundations and bases] / D.D. Barkan. — Moscow: Stroyvoenmorizdat, 1948. — 411 p. [in Russian]
2. Pyatetsky V.M. Sovremennye fundamenty mashin i ikh avtomatizirovannoe proektirovanie [Modern machine foundations and their automated design] / V.M. Pyatetsky, B.K. Aleksandrov, O.A. Savinov. — Moscow: Stroizdat, 1993. — 415 p. [in Russian]
3. Chernov Yu.T. Vibratsii stroitel'nykh konstruktсий. Analiticheskie metody rascheta. Osnovy proektirovaniya i normirovaniya vibratsii stroitel'nykh konstruktсий, podvergayushchikhsya ekspluatatsionnim dinamicheskim vozdeistviyam [Vibrations of building structures. Analytical calculation methods. Fundamentals of design and standardization of vibrations of building structures subject to operational dynamic effects] / Yu.T. Chernov. — Moscow: ASV, 2011. — 384 p. [in Russian]
4. Volkova M.V. Raschet massivnykh fundamentov, zaglublennykh v grunt, pod vibroizolirovannoe i nevibroizolirovannoe oborudovanie [Calculation of massive foundations buried in the ground for vibration-isolated and non-vibration-isolated equipment] / M.V. Volkova, Yu.T. Chernov, D. Kbeili // Izvestiya visshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo [News of higher educational institutions. Construction]. — 2020. — № 7. — P. 5–12. — DOI: 10.32683/0536-1052-2020-739-7-5-12. [in Russian]
5. SP 26.13330.2012. Fundamenti mashin s dinamicheskimi nagruzkami. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.05-87 [SP 26.13330.2012. Foundations of machines with dynamic loads. Updated version of SNiP 2.02.05-87]. — Moscow: FCS, 2012. — 70 p. [in Russian]
6. Klimov I.V. Vibrozolyatsiya shtampovochnykh molotov [Vibration isolation of stamping hammers] / I.V. Klimov, V.P. Koshelev, V.S. Nosov. — Moscow: Mashinostroenie, 1979. — 143 p. [in Russian]
7. P 01-72. Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu dinamicheskim svoystv gruntov, skalnykh porod i mestnykh stroitel'nykh materialov [N 01-72. Methodological recommendations for determining the dynamic properties of soils, rocks and local building materials]. — Saint Petersburg: Energiya, 1972. — 35 p. [in Russian]
8. Gimzelberg Ya.D. Inzhenernii metod rascheta volnovykh polei, vznikayushchikh pri rabote promyshlennykh ustanovok s vertikal'nimi vozmushchayushchimi silami [An engineering method for calculating wave fields arising during the operation of industrial installations with vertical disturbing forces] / Ya.D. Gimzelberg // Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva [Proceedings of the Vedeneev VNIIG]. — 1975. — Vol. 109. — P. 122–130. [in Russian]
9. Gimzelberg Ya.D. O metodike rascheta kolebaniy, rasprostranyayushchikhsya ot fundamentov mashin s gorizontalnimi silami na osnove dinamicheskoi teorii uprugosti [On the method of calculating vibrations propagating from the foundations of machines with horizontal forces based on the dynamic theory of elasticity] / Ya.D. Gimzelberg, K.I. Ogurtsov // Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva [Proceedings of the Vedeneev VNIIG]. — 1975. — Vol. 109. — P. 131–136. [in Russian]
10. Kalyuzhnyuk M.M. Svaeboinnye raboty pri rekonstruktsii: (Vliyanie kolebaniy na zdaniya i sooruzheniya) [Pile driving during reconstruction: (The impact of vibrations on buildings and structures)] / M.M. Kalyuzhnyuk, V.K. Rud. — Saint Petersburg: Stroizdat, 1989. — 160 p. [in Russian]
11. Slepian L.I. Nestatsionarnye uprugie volny [Unsteady elastic waves] / L.I. Slepian. — Saint Petersburg: Sudostroenie, 1972. — 376 p. [in Russian]
12. ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide / ANSYS Inc. — 2025.



13. Instruktsiya po raschetu nesushchikh konstruksii promishlennikh zdanii i sooruzhenii na dinamicheskie nagruzki [Instructions for calculating the load-bearing structures of industrial buildings and structures for dynamic loads] / Central Research Institute of Building Structures named after V.A. Kucherenko. — Moscow: Stroiizdat, 1970. — 288 p. [in Russian]