

# Сейсмоизоляция турбоагрегата АЭС с использованием устройств сухого трения

Мирзаев Ибрахим, Турдиев Маликжон Сайфиддин ўғли

Ташкентский государственный транспортный университет.

E-mail: [ibrakhim.mir@mail.ru](mailto:ibrakhim.mir@mail.ru)

**Аннотация.** Предлагается новый алгоритм решения задач сейсмодинамики конструкций при наличии сейсмоизоляции с использованием принципа сухого трения. Проведены расчеты колебания турбоагрегата АЭС с сейсмоизоляцией на действие трех различных землетрясений по записям акселерограмм. Приведены перемещения и ускорения основания конструкции и турбоагрегата. Показана степень снижения ускорения турбоагрегата при использовании сейсмоизоляции.

## 1. Введение

Объектом исследования в данной работе является турбоагрегат на скользящем фундаменте, предметом исследования – сейсмоизоляция турбоагрегата.

Турбоагрегат является основным из устройств АЭС, и защита его от действий землетрясений является важной задачей для тех регионов, где планируются построение АЭС. Для Республики Узбекистан эта задача является актуальной, так как в Джизакской области планируется построение и ввод в действие со стороны специалистов России. Узбекистан является сейсмоактивной зоной. Вопросы сейсмоизоляции АЭС рассмотрены многими исследователями по различным моделям. Обзор работ приведен в статье Тарасова В.А. Double Seismic Insulation System of Turbine Unit Foundation //Construction of Unique Buildings and Structures;2020; Volume 91 Article No 9101.

Следует отметить, что динамические задачи с сухим трением являются существенно нелинейными задачами. Однако многие исследователи слишком упрощают задачу и фактически приходят к линейной задаче без обоснования и оценки погрешности модели. В данной работе предлагается численный алгоритм решение нелинейной динамической задачи расчета конструкции с сухим трением

## 2. Методы исследования

Пусть задано горизонтальное движение основания конструкции в виде сейсмограммы реального землетрясения. Будем считать, что фундамент конструкции состоит из нижнего и верхнего частей, а между ними имеется сейсмоизоляция в виде специального материала и плоского слайдера (<https://docplayer.net/133188454-Curved-surface-sliders.html>). Нижней части фундамента конструкции придадим перемещение основания. В качестве модели взаимодействия двух частей фундамента примем модель сухого трения Кулона.

Конструкцию представим одномерной сдвиговой моделью с сосредоточенными массами и безынерционными упругими связями (Mirzaev I, Turdiyev M S 2021 *Vibrations of Buildings with Sliding Foundations under Real Seismic Effects Construction of Unique Buildings and Structures* Volume 94 Article No 9407).

$$[M] \cdot \{\ddot{U}\} + [C] \cdot \{\dot{U}\} + [K] \cdot \{U\} = \{Q(t)\}, \quad (1)$$

$$\{U\} = 0, \quad \{\dot{U}\} = 0, \quad \text{при } t = 0,$$

где  $[M]$  – диагональная матрица масс, массы расположены в уровнях этажей,  $[K]$  – матрица жесткостей,  $[C] = \alpha \cdot [M] + \beta \cdot [K]$  – матрица вязкости,  $\{U\}$  – вектор перемещений. Условие взаимодействия массы  $M_0$  со скользящим нижним фундаментом имеет вид

$$u_0 = u_g - u_r, \quad \text{если } |F_0| < |F_{fr}|, \quad \text{т.е. при совместном движении}, \quad (2)$$

$$F_0 = F_{fr}, \quad \text{при скольжении}, \quad (3)$$

где  $u_0$  – перемещение ростверка;  $u_g$  – перемещение нижней части фундамента, т.е. аппроксимированная функция оцифрованной сейсмограммы горизонтальной составляющей землетрясения;  $u_r$  – величина сдвига в момент времени в начале текущего совместного движения нижней части фундамента и ростверка, т.е. разность между значениями перемещений нижней части фундамента и ростверка (в начальный момент времени  $u_r = 0$ );  $F_0$  – неизвестное значение силы сцепления между верхним и нижним фундаментами;  $F_{fr} = \text{sign}(\dot{u}_g - \dot{u}_0) \cdot f \cdot P$  – значение силы сухого трения;  $f$  – коэффициент сухого трения;  $P$  – вес здания.

При совместном движении перемещение  $u_0$  определяется по равенству (2) и уравнение движения массы  $M_1$  имеет вид  $M_0$  (Mirzaev I, Turdiyev M S 2021 Vibrations of Buildings with Sliding Foundations under Real Seismic Effects *Construction of Unique Buildings and Structures* Volume 94 Article No 9407)

$$M_1 \ddot{u}_1 + k_1 u_1 + c_1 \dot{u}_1 - k_2 (u_2 - u_1) - c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) = k_1 u_0 + c_1 \dot{u}_0.$$

В этом случае  $Q_1 = k_1 u_0 + c_1 \dot{u}_0$ , остальные элементы вектора  $\{Q\}$  равны нулю.

Скольжение с сухим трением наступает только тогда, когда выполняется условие (3). Рассматриваемая задача (1), (2), (3) является нелинейной задачей, при этом отсутствуют условия вычисления неизвестной функции  $F_0$ , далее покажем отсутствие необходимости вычисления значения этой функции. Скольжение может произойти только тогда, когда ростверк набрал необходимую силу инерции, а ускорение фундамента в этот момент снижается. Поэтому при слабых землетрясениях скользящий фундамент не срабатывает или эффект будет небольшим. Во время динамического процесса изменяются размерности матриц  $[M]$  и  $[K]$ . При скольжении имеет место уравнение для массы  $M_0$  (Mirzaev I, Turdiyev M S 2021 Vibrations of Buildings with Sliding Foundations under Real Seismic Effects *Construction of Unique Buildings and Structures* Volume 94 Article No 9407).

$$M_0 \cdot \ddot{u}_0 - k_1(u_1 - u_0) - c_1(\dot{u}_1 - \dot{u}_0) = F_{fr}, \text{ при этом } Q_0 = F_{fr}.$$

Для решения задачи в целом воспользуемся следующим алгоритмом. На каждом шаге по времени решаем задачи в трех постановках (Ibrakhim Mirzaev, Anvar Yuvmitov, Malikjon Turdiev and Jakhongir Shomurodov 2021 Influence of the Vertical Earthquake Component on the Shear Vibration of Buildings on Sliding Foundations E3S Web of Conferences 264, 02022):

1. уравнение (1) решаем с условием (2);
2. уравнение (1) решаем с условием (3), при этом  $F_0 = f \cdot P$  ;
3. уравнение (1) решаем с условием (3), при этом  $F_0 = -f \cdot P$  .

Матрицы  $[M]$  и  $[K]$  в первой постановке имеют размер  $m \times m$  (здесь  $m$  – количество этажей здания), а во второй и третьей постановках  $(m + 1) \times (m + 1)$ . Выбор истинного решения из этих трех решений осуществляется следующим образом. Если относительные скорости  $\dot{u}_g - \dot{u}_0$  во втором и третьем постановках задач имеют разные знаки, тогда истинным решением является решение задачи в первой постановке, потому что приложенная сила сухого трения заставляет двигаться ростверк в разные стороны и значит неизвестная сила меньше предельного значения силы сухого трения, т.е. отсутствует скольжение. Если относительные скорости во второй и третьей постановках задач имеют одинаковый знак, тогда истинным решением является решение задачи в той постановке, в которой относительная скорость по абсолютному значению наименьший, потому что сила сухого трения направлена против относительного движения и всегда приводит затуханию относительного движения. Все три задачи решаются методом Ньюмарка (Chopra, K.A. Dynamics of structures. Fourth Ed. USA, Berkeley, Prentice Hall, One Lake Street, Upper Saddle River, NJ 07458, 2012. 980 p. ISBN:0-13-855214-2.); оцифрованная сейсмограмма землетрясения аппроксимируется линейной функцией в интервале шага записи, когда шаг аппроксимации по времени меньше шага записи землетрясения.

### 3. Результаты и их обсуждение

Обсудим результаты расчетов на примере сейсмоизоляции турбоагрегата АЭС ( Тарасова В.А. Double Seismic Insulation System of Turbine Unit Foundation //Construction of Unique Buildings and Structures;2020; Volume 91 Article No 9101 ). Пусть заданы характеристики конструкции, а также сейсмограммы следующих очень сильных землетрясений (Ambraseys, N.N., Smit, P., Douglas, J., Margaris, B., Sigbjörnsson, R., Ólafsson, S., Suhadolc, P., Costa, G. Internet site for European strong-motion data. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. 2004. 45(3). URL: [http://www.isesd.hi.is/ESD\\_local/frameset.htm](http://www.isesd.hi.is/ESD_local/frameset.htm)):

1. Cairano 3 – 000319 (16.01.1981 г, 8 баллов по MSK-64, максимальное ускорение –  $1.47 \text{ м/с}^2$ , максимальное перемещение –  $0.0029 \text{ м}$ , шаг оцифрования –  $0.005 \text{ с}$ , продолжительность –  $22.175 \text{ с}$ );
2. Nocera Umbra 2 – 000856 (03.04.1998 г, 9 баллов по MSK-64, максимальное ускорение –  $3.73 \text{ м/с}^2$ , максимальное перемещение –  $0.0054 \text{ м}$ , шаг оцифрования –  $0.005 \text{ с}$ , продолжительность –  $40.990 \text{ с}$ );
3. Gazli – 000074 (17.05.1976 г, выше 10 баллов по MSK-64, максимальное ускорение –  $7.23 \text{ м/с}^2$ , максимальное перемещение –  $0.1827 \text{ м}$ , шаг оцифрования –  $0.005 \text{ с}$ , продолжительность –  $28 \text{ с}$ ).

Масса турбоагрегата  $2.5 \cdot 10^6 \text{ kg}$ , масса фундамента турбоагрегата  $5.0 \cdot 10^6 \text{ kg}$ . Жесткость эквивалентной пружины на сдвиг между турбоагрегатом и фундаментом  $1.0 \cdot 10^8 \text{ N/m}$ . Коэффициент сухого трения между фундаментами  $0.025$  или  $0.05$ .

При численном решении задач с сухим трением шаг по времени необходимо подбирать для обеспечения достаточной точности. В наших примерах расчетов шаг по времени был выбран равным  $0.001 \text{ с}$ .

На рис.1 приведено сравнение перемещений основания и турбоагрегата, а на рис.2 соответствующих ускорений при землетрясении №1: 8 баллов. Коэффициент сухого трения  $f=0,025$ . Получается сравнительно большие перемещения турбоагрегата, но его ускорения имеют небольшие значения, максимальное значение этого ускорения 7 раз меньше чем максимальное ускорение основания

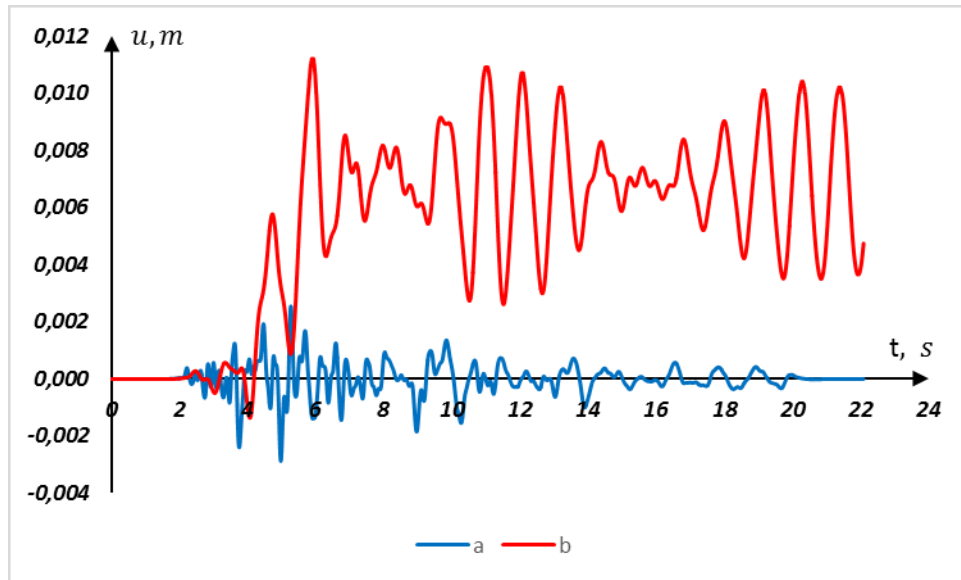


Рис. 1

$$a = 0,00287 \text{ m}; b = 0,0112 \text{ m}$$

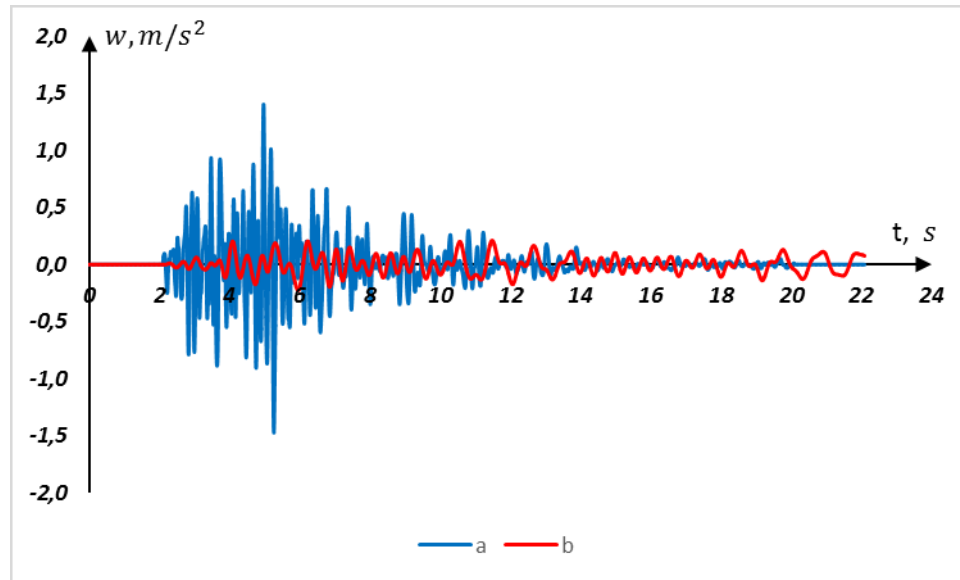


Рис. 2

$$a = 1,47 \text{ m/s}^2; b = 0,224 \text{ m/s}^2$$



На рис.3 приведено сравнение перемещений основания и турбоагрегата, а на рис.4 соответствующих ускорений при землетрясении №1: 8 баллов. Коэффициент сухого трения  $f=0,05$ . Получается сравнительно большие перемещения турбоагрегата, но его ускорения имеют небольшие значения, максимальное значение этого ускорения 4 раза меньше чем максимальное ускорение основания

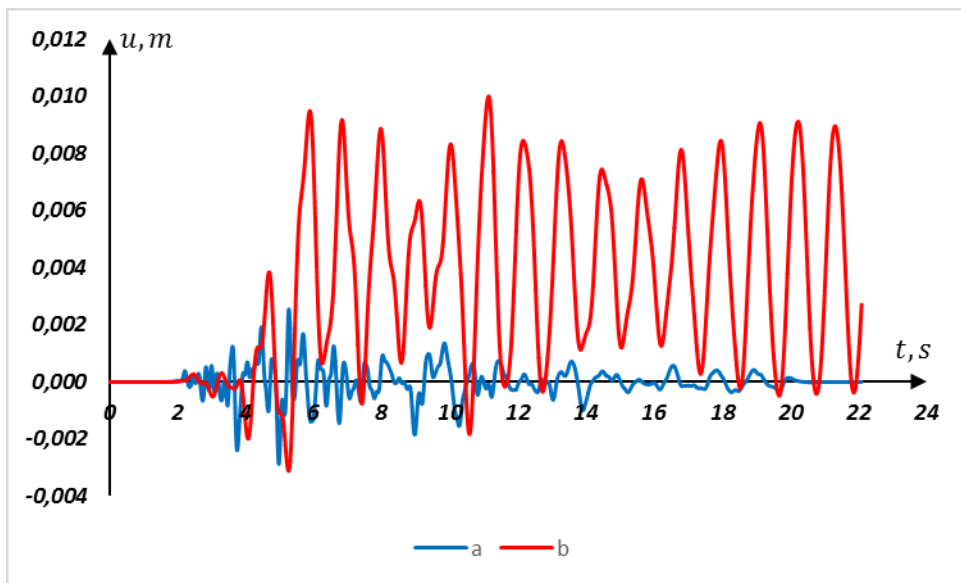


Рис. 3

$$a = 0,00287 \text{ m}; b = 0,00199 \text{ m}$$

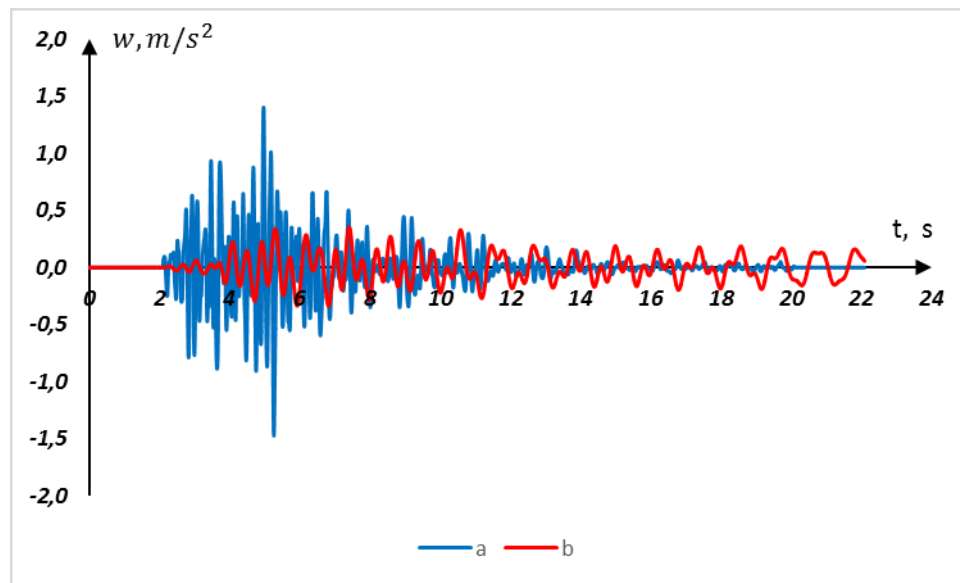


Рис. 4

$$a = 1,47 \text{ m/s}^2; b = 0,352 \text{ m/s}^2$$

На рис.5 приведено сравнение перемещений основания и турбоагрегата, а на рис.6 соответствующих ускорений при землетрясении №2: 9 баллов. Коэффициент сухого трения  $f=0,025$ . Получается сравнительно большие перемещения турбоагрегата, но его ускорения имеют небольшие значения, максимальное значение этого ускорения 12 раз меньше чем максимальное ускорение основания

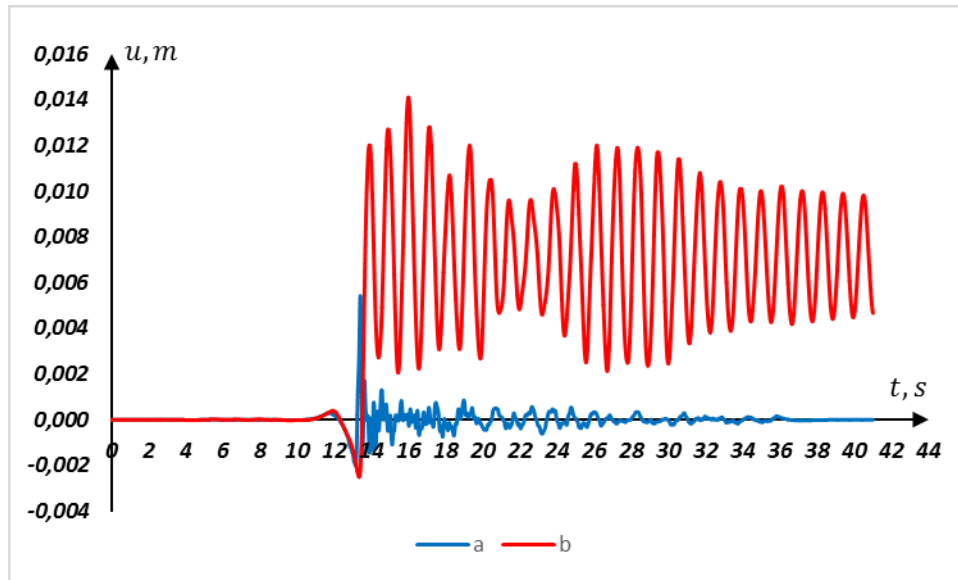


Рис. 5

$$a = 0,00542 \text{ m}; b = 0,0141 \text{ m}$$

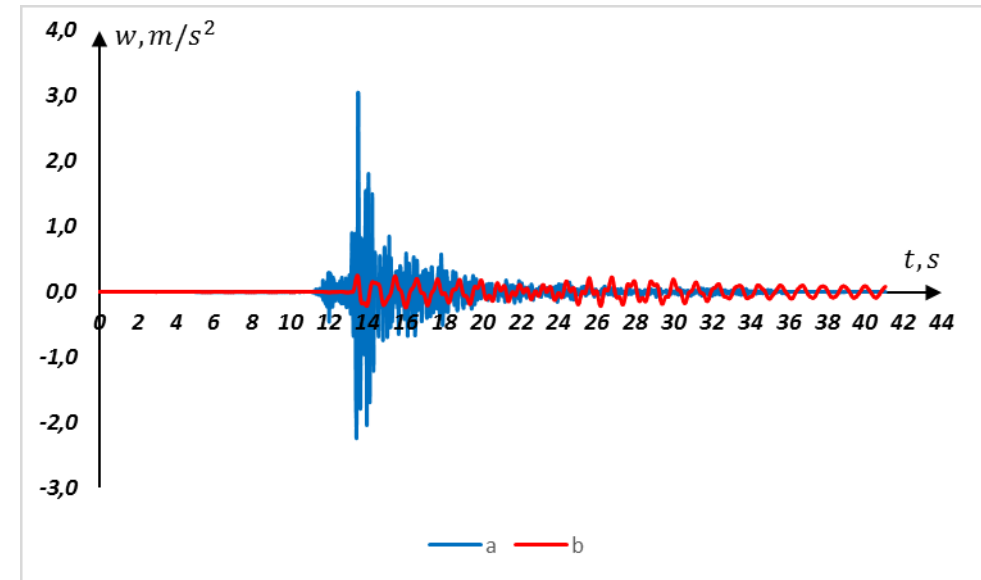


Рис. 6

$$a = 3,05 \text{ m/s}^2; b = 0,253 \text{ m/s}^2$$

На рис.7 приведено сравнение перемещений основания и турбоагрегата, а на рис.8 соответствующих ускорений при землетрясении №2: 9 баллов. Коэффициент сухого трения  $f=0,05$ . Получается сравнительно большие перемещения турбоагрегата, но его ускорения имеют небольшие значения, максимальное значение этого ускорения 7.7 раз меньше чем максимальное ускорение основания

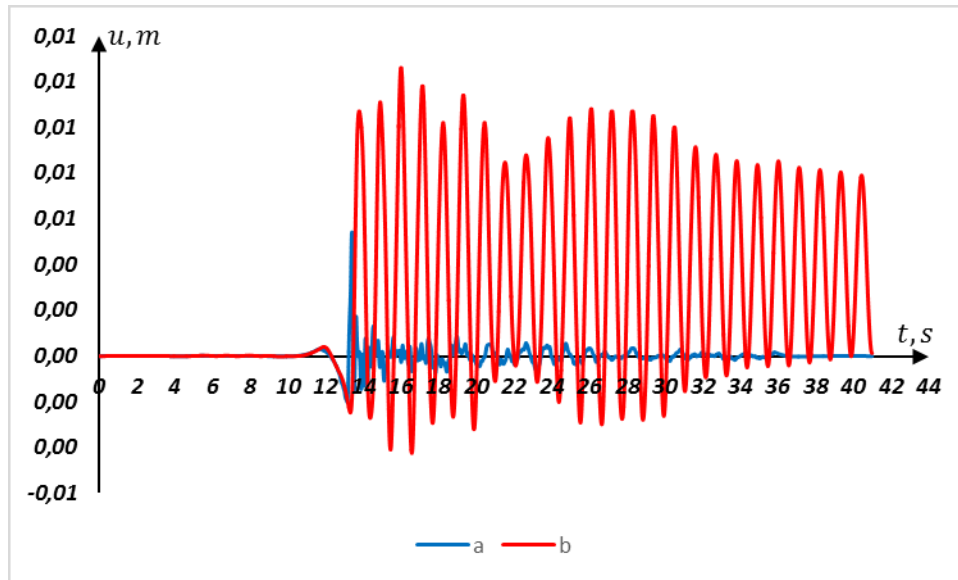


Рис. 7

$$a = 0,00542 \text{ m}; b = 0,0126 \text{ m}$$

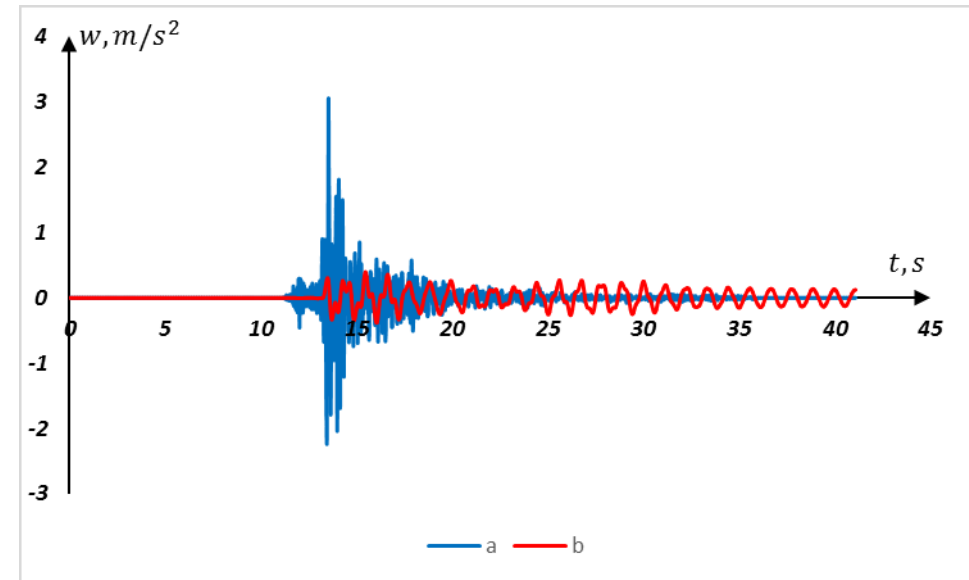


Рис. 8

$$a = 3,05 \text{ m/s}^2; b = 0,396 \text{ m/s}^2$$

На рис.9 приведено сравнение перемещений основания и турбоагрегата, а на рис.10 соответствующих ускорений при землетрясении №3: 10 баллов. Коэффициент сухого трения  $f=0,025$ . Получается сравнительно большие перемещения турбоагрегата, но его ускорения имеют небольшие значения, максимальное значение этого ускорения 6.5 раз меньше чем максимальное ускорение основания

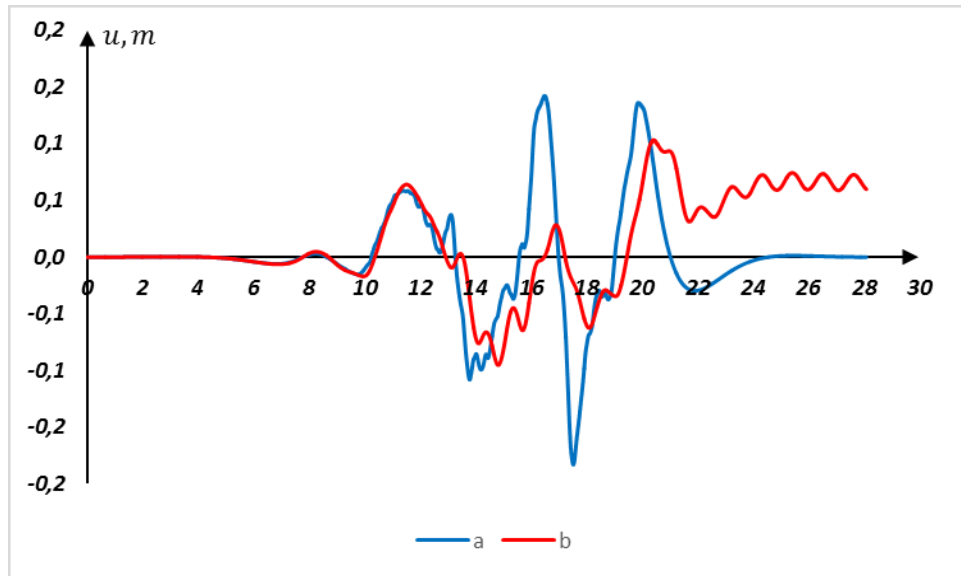


Рис. 9

$$a = 0,183 \text{ m}; b = 0,103 \text{ m}$$

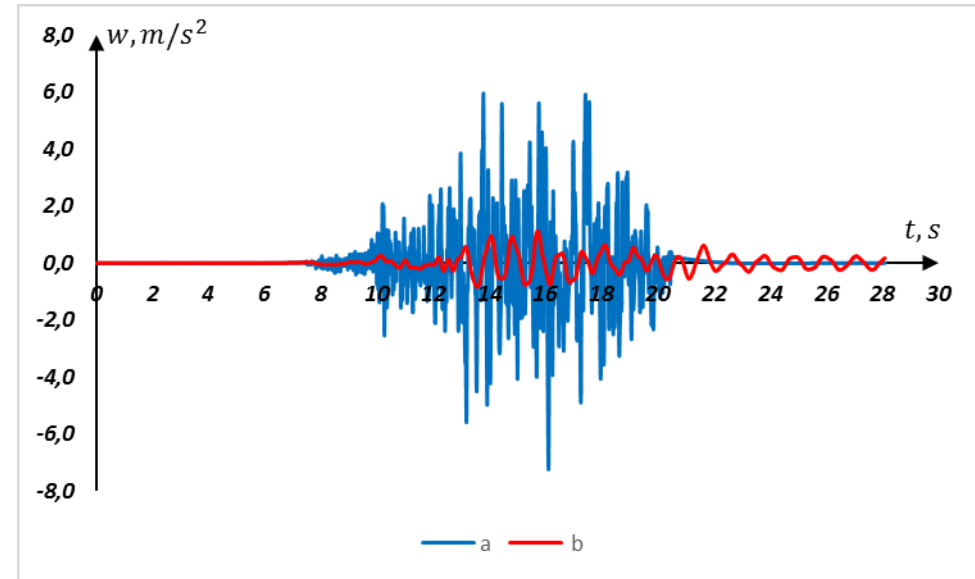


Рис. 10

$$a = 7,23 \text{ m/s}^2; b = 1,12 \text{ m/s}^2$$

На рис.11 приведено сравнение перемещений основания и турбоагрегата, а на рис.12 соответствующих ускорений при землетрясении №3: 10 баллов. Коэффициент сухого трения  $f=0,05$ . Получается сравнительно большие перемещения турбоагрегата, но его ускорения имеют небольшие значения, максимальное значение этого ускорения 4.6 раз меньше чем максимальное ускорение основания

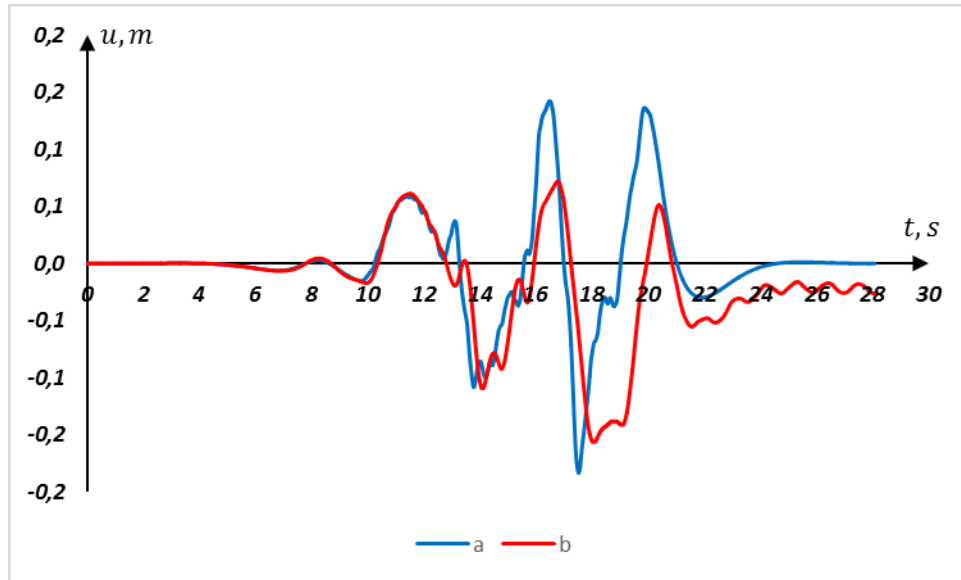


Рис. 11

$$a = 0,183 \text{ m}; b = 0,156 \text{ m}$$

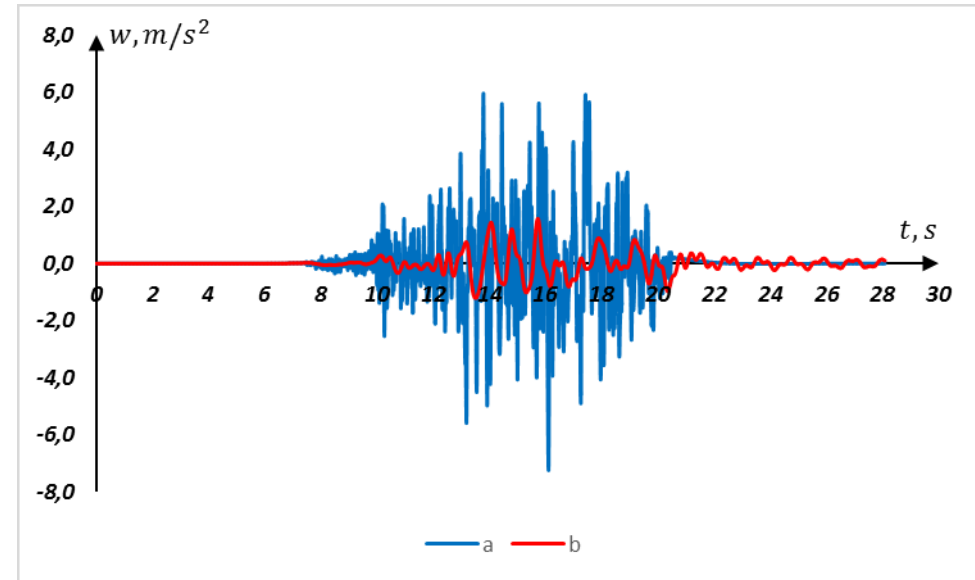


Рис. 12

$$a = 7,23 \text{ m/s}^2; b = 1,57 \text{ m/s}^2$$

На рис.13 приведено сравнение перемещений основания и турбоагрегата, а на рис.14 соответствующих ускорений при землетрясении №3: 10 баллов. На этих рисунках приведены результаты расчетов по линейной теории, процесс трения заменяется слабой пружиной, что не соответствует динамическому процессу взаимодействия конструкции с основанием по принципу сухого трения.

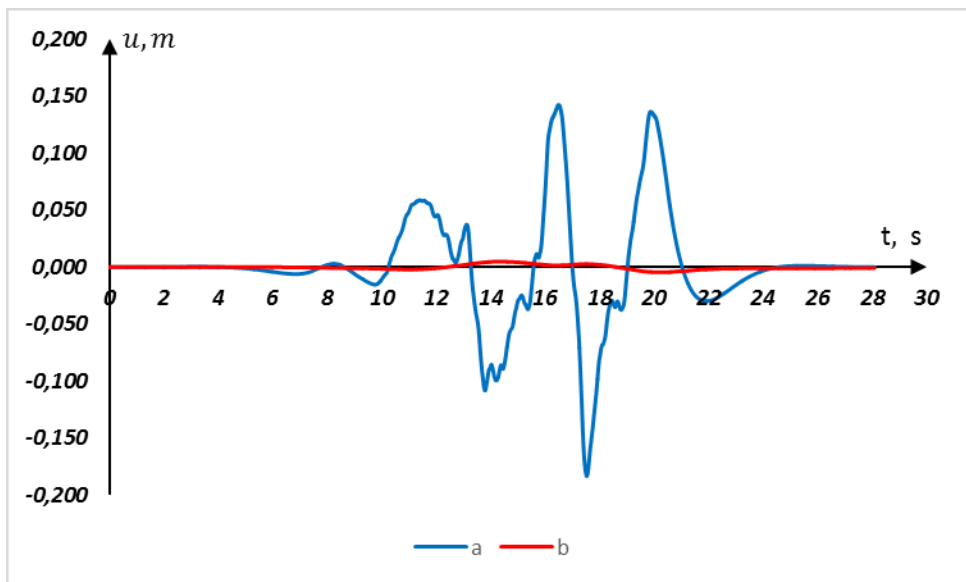


Рис. 13

$$a = 0,183 \text{ m}; b = 0,00499 \text{ m}$$

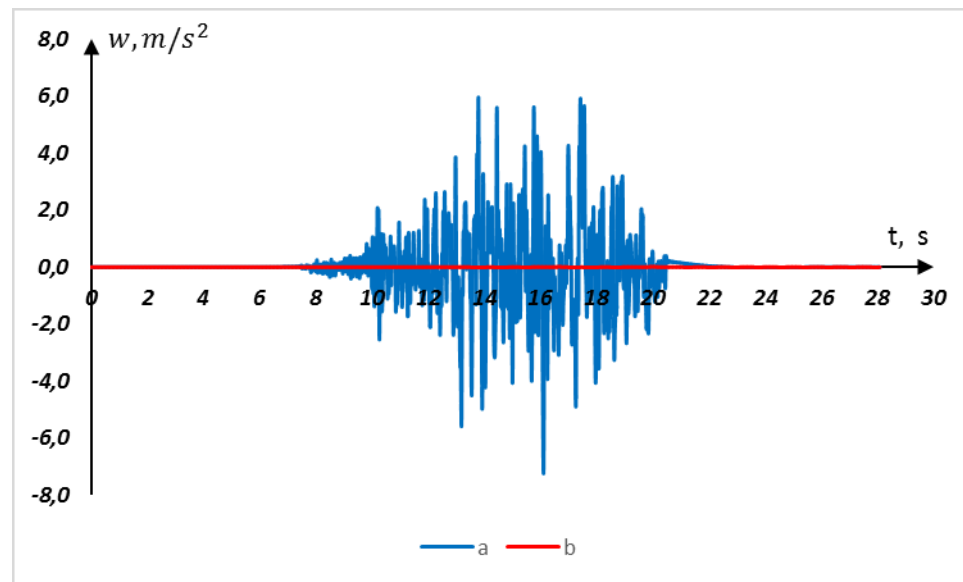


Рис. 14

$$a = 7,23 \text{ m/s}^2; b = 0,0112 \text{ m/s}^2$$

## **ВЫВОДЫ**

1. Плоские слайдеры, используемые для сейсмоизоляции конструкций, позволяют снижать максимальное значение ускорения несколько раз в зависимости от массы конструкции, коэффициента сухого трения и характера сейсмического воздействия, т.е. от интенсивности и частотного состава.
2. Использование в расчетах линейной модели взаимодействия вместо модели сухого трения Кулона приведет к ошибочным результатам.
3. К заключению об эффективности используемого слайдера необходимо прийти на основе расчетов по наборам записей землетрясений.