

## Методы расчета динамических систем с эластомерными опорами при сейсмических воздействиях уровня «проектное землетрясение»

### Зубрицкий М.А.

Аспирант кафедры энергообеспечения предприятий и энергоресурсосберегающих технологий, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (г. Казань); e-mail: zubrickiy\_maksim@mail.ru

### Ушаков О.Ю.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования объектов строительства, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет» (г. Екатеринбург)

### Сабитов Л.С.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры биомедицинской инженерии и управления инновациями, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (г. Казань)

### Сагабиев А.А.

Аспирант, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет» (г. Екатеринбург)

Статья получена: 15.07.2020. Рассмотрена: 17.07.2020. Одобрена: 12.08.2020. Опубликовано онлайн: 30.09.2020. ©РИОР

**Аннотация.** В статье представлен краткий обзор методов оценки сейсмостойкости систем с применением эластомерных опор при сейсмических воздействиях уровня «Проектное землетрясение» (ПЗ). В рамках исследования выполнен комплекс динамических и статических расчетов, рассмотрены методы расчета сейсмостойких систем: линейно-спектральный метод (ЛСМ) и прямой динамический метод (ПДМ). Целью исследовательской работы является оценка возможности применения ЛСТ

при сейсмических воздействиях уровня ПЗ на системы с эластомерными опорами. Установлено, что разница в результатах расчетов по двум методам не превышает 12%. Таким образом, ЛСМ может быть использован в качестве основного инструмента для расчета сейсмоизолированных систем при сейсмическом воздействии уровня ПЗ.

**Ключевые слова:** эластомерная опора, динамический и статический расчет, сейсмостойкость систем.

### METHODS FOR CALCULATING DYNAMIC SYSTEMS WITH ELASTOMERIC BEARINGS UNDER SEISMIC IMPACTS OF THE «DESIGN BASIS EARTHQUAKE» LEVEL

#### Zubritskiy M.A.

Postgraduate Student, Energy Supply for Enterprises and Energy Saving Technologies, Kazan State Power Engineering University, Kazan; e-mail: zubrickiy\_maksim@mail.ru

#### Ushakov O.Yu.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computer Aided Design of Construction Facilities, Ural Federal University, Ekaterinburg

#### Sabitov L.S.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Biomedical Engineering and Innovation Management, Kazan State Power Engineering University, Kazan

#### Sagabiev A.A.

Postgraduate Student, Ural Federal University, Ekaterinburg

**Manuscript received:** 15.07.2020. **Revised:** 17.07.2020. **Accepted:** 12.08.2020. **Published online:** 30.09.2020. ©РИОР

**Abstract.** The article provides a brief overview of methods for assessing the seismic resistance of systems using elastomeric bearings under seismic impacts of the “Designated earthquake” (DE) level. Within the framework of the study, a complex of dynamic and static calculations was carried out, the method for calculating seismic-resistant systems was considered: the linear spectral method (LSM) and the direct dynamic method (LDM). The aim of the research work is to assess the possibility of using LST in case of seismic impacts of the PZ level on systems with elastomeric bearings. It was found that the difference in the results of calculations using the two methods does not exceed 12%. Thus, the LST can be used as the main tool for calculating seismically isolated systems under seismic impact of the DE level.

**Keywords:** elastomeric bearing, dynamic and static analysis, seismic resistance of systems.

## 1. Введение

За последние два десятилетия в мире произошло более 20 разрушительных землетрясений в Афганистане, Иране, Индонезии, Пакистане, Китае, Японии, Гаити, Италии и даже Чехии. Жертвами катастрофы стали тысячи людей, а экономике пострадавших стран нанесен колоссальный ущерб. Таким образом, повышение сейсмостойкости зданий и сооружений — одна из самых актуальных проблем при строительстве в сейсмически опасных зонах.

Тривиальным решением задачи обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений является увеличение жесткости несущего остова за счет увеличения размеров элементов несущих конструкций (пассивная сейсмозащита), что приводит к значительному увеличению материалоемкости и, соответственно, удорожанию строительства. В отдельных случаях изменение жесткости и массы конструкции приводит к изменению динамических характеристик системы, что приводит к увеличению инерционных нагрузок. Таким образом, обеспечение сейсмостойкости путем увеличения жесткости несущих элементов не всегда является рациональным и экономически целесообразным.

Еще в 60-е гг. XX в. был предложен альтернативный способ повышения сейсмостойкости систем — сейсмоизоляция (активная сейсмозащита). Сам термин сейсмоизоляция обозначает снижение инерционных сил, вызванных сейсмическим воздействием, путем введения в расчетную динамическую модель сооружения специальных элементов, позволяющих снизить инерционные нагрузки. Устройство, регулировка и контроль сейсмоизолирующих систем требует высокой квалификации как инженера-проектировщика, так и инженерно-технического персонала, обеспечивающего надежную эксплуатацию зданий и сооружений.

Глобально методы активной сейсмозащиты подразделены на инерционные демпфирующие системы и сейсмоизоляцию [2]. В инерционных системах, включающих демпферы и динамические гасители, снижение механической энергии конструкции происходит за счет ее поглощения гасителем колебаний. Одним из ярких примеров сейсмоизоляции такого типа является небоскреб *Taipei 101*. Инерционные силы при

землетрясении снижает огромный 660-тонный шар-маятник, помещенный между 87 и 91 этажами (рис. 1).

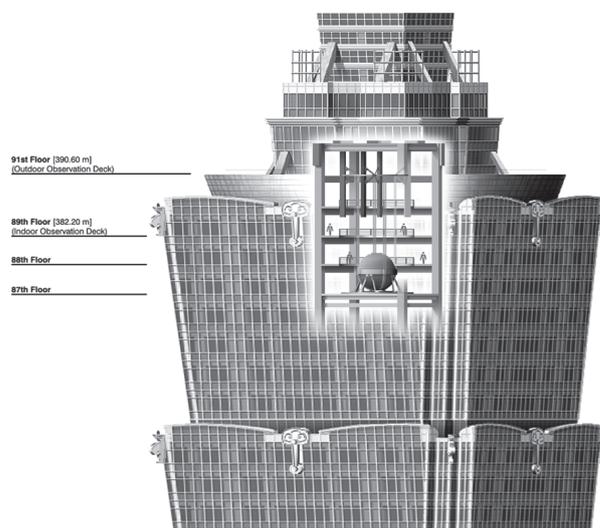


Рис. 1. Инерционная демпфирующая система в небоскребе *Taipei 101*

Снижение сейсмического воздействия в сейсмоизолированных системах обеспечивается изменением частот собственных колебаний системы. Различают адаптивные и стационарные системы сейсмоизоляции. В адаптивных системах динамические характеристики изменяются в процессе землетрясения, в стационарных же системах динамические характеристики остаются неизменными.

На рис. 2 схематично представлены деформированные схемы здания без сейсмоизоляции и с ее применением. Благодаря большей податливости в нижней части системы горизонтальные перемещения в целом возрастают при уменьшении ускорения масс.

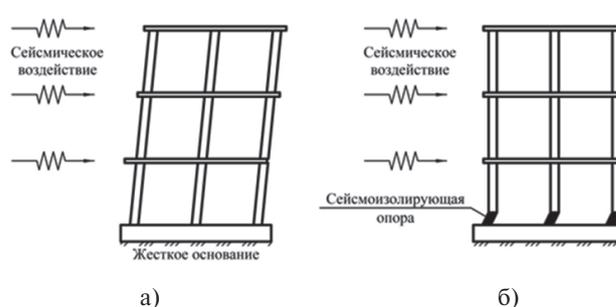


Рис. 2. Деформированная схема здания: а) здание без сейсмоизоляции; б) здание с сейсмоизоляцией

Согласно [1] расчет сейсмоизолированных систем выполняется в два этапа:

- проектный расчет с применением ЛСМ для получения данных для проектирования конструкции;
- проверочный расчет в виде нелинейного динамического расчета.

Данный подход отражен и в зарубежных нормативных документах [7–9].

Целью данной работы является сравнение результатов расчетов, полученных на основании линейно-спектрального и прямого динамического метода, и оценка применимости ЛСМ при проектировании сейсмоизолированных систем.

## 2. Постановка задачи

В качестве расчетной динамической модели принят вертикальный стержень с тремя равномерно распределенными по высоте сосредоточенными массами и эластомерным сейсмоизолятором, находящимся в нижнем узле конструкции (рис. 3).

Вертикальный стержень имеет сечение широкополочного двутавра 30Ш1 ГОСТ Р 57837-2017. Материал конструкции — сталь С345 ГОСТ 27772-2015.

В качестве сейсмоизолятора принята эластомерная линейная опора Л ДШР РОЧ [13], состоящая из послойно уложенных друг на друга листов резины и металлических пластин (рис. 4). В табл. 1 представлены характеристики сейсмоизолирующей опоры.

Сейсмические воздействия заданы следующими однокомпонентными акселерограммами, действующими по оси  $X$ :

- 1) Iran, 1978 г. (рис. 5);
- 2) El Centro, USA (California), 1979 г.;
- 3) Duzce, Turkey, 1999 г.

Записи акселерограмм взяты из базы данных PEER Ground motion Database [10].

Расчеты ЛСМ и ПДМ выполнены в программном комплексе *Lira 10.X*. Акселерограммы сейсмического воздействия конвертированы в спектры ответа с использованием внутреннего модуля (27) — сейсмическое воздействие по однокомпонентной акселерограмме. Расчет ПДМ выполнен с использования модуля «Динамика+». Данная система реализует метод прямого интегрирования уравнений движения по времени, что позволяет производить ком-

пьютерное моделирование отклика конструкции на динамическое воздействие. Таким образом, могут быть смоделированы как линейные, так и нелинейные задачи.

Шаг интегрирования  $\Delta t$  принят на основании предельного значения, определяющего диапазон частот, учитываемых при расчете:

$$0 < \Delta t < \frac{1}{20 \cdot f}, \quad (1)$$

где  $f$  — рассматриваемая частота системы.

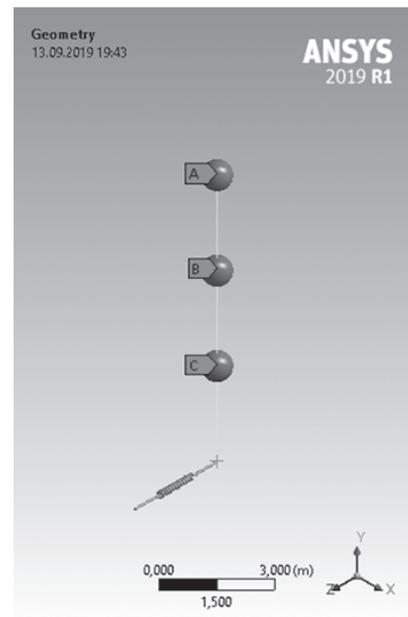


Рис. 3. Общий вид расчетной динамической модели

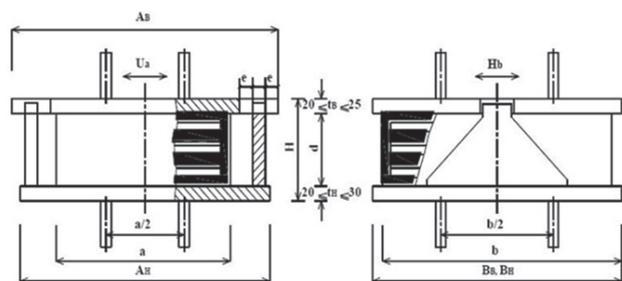


Рис. 4. Общая схема опоры Л ДШР РОЧ

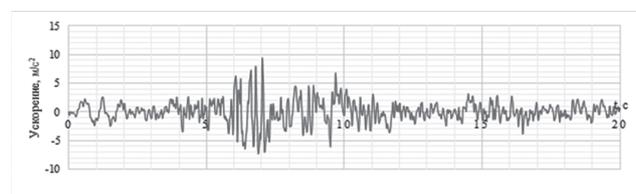


Рис. 5. Акселерограмма горизонтальной компоненты землетрясения, Iran, 1978 г.

Таблица 1

**Общие характеристики сейсмоизолятора  
Л ДШР РОЧ**

Допускаемое горизонтальное усилие $H_b$ , кН	Допускаемое перемещение $U_a$ (+), мм	Размеры опорной части в плане, мм		
		ВВ, ВН	АВ	АН
97	30	410	370	340

Таблица 2

**Общие характеристики системы**

№ n/n	Наименование	Значение		
		Erthq. 1	Erthq. 2	Erthq. 3
1	Сечение, мм	Двутавр $300(h) \times 200(b) \times 15(bf) \times 8(bw)$		
2	Высота, мм	9000		
3	Модуль упругости, Па	$2e^{11}$		
4	Предел упругости, МПа	270		
5	Сосредоточенные массы $m_a = m_b = m_c$ , кг	3000	10 000	7000
6	Первая частота собственных колебаний $f_1$ , Гц	0,853	0,45094	0,5637
7	Вторая частота собственных колебаний $f_2$ , Гц	5,397	2,8677	3,5813

**3. Результаты**

Для оценки погрешности результатов, полученных линейно-спектральным методом, сравним их с результатами, полученными на основании прямого динамического метода с ис-

пользованием записей ускорений *Erthq. 1–3*, по следующим параметрам:

- горизонтальные смещения узлов системы;
- частоты собственных колебаний системы;
- внутренние усилия в наиболее нагруженных элементах (поперечная сила / изгибающий момент);
- реакции в эластомерных опорах.

Оценка погрешности результатов расчетов представлена в табл. 3.

Для оценки качества полученных данных выполним их статистическую обработку:

- среднее значение погрешности горизонтальных смещений узлов системы составило 4,18%; среднеквадратичное отклонение — 0,45%;
- среднее значение погрешности изгибающих моментов в элементах системы составило 4,80%; среднеквадратичное отклонение — 0,64%;
- среднее значение погрешности поперечных сил в элементах системы составило 9,93%; среднеквадратичное отклонение — 1,47%;
- среднее значение погрешности периодов колебаний составило 5,27%; среднеквадратичное отклонение — 1,33%.

Периоды и частоты собственных колебаний системы при ЛСМ определены на основании модального анализа. В ПДМ периоды колебаний определены как временной интервал между

Таблица 3

**Результаты расчетов для сейсмических воздействий *Erthq. 1–3***

№ n/n	Наименование	Значение					
		Erthq. 1		Erthq. 2		Erthq. 3	
1	Максимальные перемещения верхнего узла системы, мм	250,1	-2,5%	252,9	-0,71%	264,6	-1,7%
		256,6		254,7		269,1	
2	Максимальные перемещения среднего узла системы, мм	139,9	2,3%	140,9	-1,7%	147,7	3,3%
		136,7		143,3		142,8	
3	Максимальные перемещения нижнего узла системы, мм	55,1	-8,2%	52,8	-8,3%	64,7	-8,9%
		60		57,6		71	
4	Максимальный изгибающий момент в наиболее нагруженной точке системы, кН·м	287,5	-4,3%	281,6	-5,7%	298,8	4,4%
		300,3		298,6		285,7	
5	Максимальное значение реакции в эластомерной опоре, кН	67,5	-8,8%	52,8	-9,4%	62,7	-11,6%
		74		58,3		71	
6	Периоды собственных колебаний, с	1,39	-4,8%	2,07	7,2%	1,62	-4,1%
		1,46		1,92		1,69	

1. В числителе указаны результаты, полученные на основании линейно-спектральной теории, в знаменателе — на основании прямого динамического метода.

2. Погрешность со знаком «-» обозначает дефицит отклика по заданному критерию.

соседними пиковыми значениями перемещений верхней сосредоточенной массы системы. На рис. 6 представлен график перемещения верха системы во времени при сейсмическом воздействии *Erthq. 2*.

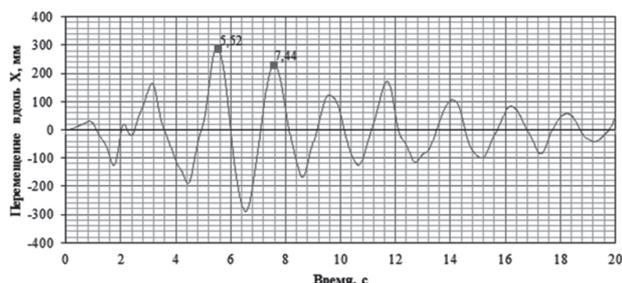


Рис. 6. График зависимости перемещения верха системы во времени с указанием экстремумов для нахождения периода колебаний ( $T = 7,44 \text{ с} - 5,52 \text{ с} = 1,92 \text{ с}$ )

## Заключение

Анализируя результаты выполненных расчетов на сейсмические воздействия прямым динамическим методом и линейно спектральным методом, можно сделать следующие выводы:

- максимальные значения перемещения верха системы отличаются менее чем на 9%. Разность между горизонтальными смещениями узлов системы с уменьшением высоты возрастает. Максимальная разница результатов — 8,9%;
- максимальная разность между значениями внутренних усилий составила: для поперечной силы — 11,6%, для изгибающего момента — 5,7%;
- периоды собственных колебаний отличаются не более чем на 8%.

Таким образом, для оценки сейсмостойкости систем с использованием эластомерных опор возможно использование линейно-спектральной теории наряду с прямым динамическим методом. Разница значений перемещений и усилий находится в пределах инженерной погрешности. Отмечается, что процесс подбора типа эластомерной опоры — итерационный, и при изменении характеристик опоры необходимо выполнить повторный расчет с изменившимися динамическими характеристиками системы.

## Литература

1. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах [Текст]. — М., 2018.
2. Айзенберг Я.М. Сейсмоизоляция и адаптивные системы сейсмозащиты [Текст] / Я.М. Айзенберг. — М.: Наука, 1983.
3. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость [Текст] / А.Н. Бирбраер. — СПб., 1988.
4. Мкртычев О.В. Безопасность зданий и сооружений при сейсмических и аварийных воздействиях [Текст] / О.В. Мкртычев. — М., 2010.
5. Мкртычев О.В. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения) [Текст] / О.В. Мкртычев, Г.А. Джинчвелашвили. — М., 2012.
6. СТО 73108225-001-2008 «Части опорные резиновые армированные» [Текст].
7. Тарасов В.А. Системы сейсмоизоляции [Текст] / В.А. Тарасов [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2016. — № 4. — С. 117–140.
8. Уздин А.М. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений [Текст] / А.М. Уздин. — СПб., 1993. — 176 с.
9. Eurocode 8: Seismic Design of Buildings. EUR 25204 EN — 2012.
10. Applied Technology Council (ATC-40). (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Redwood, CA.
11. FEMA-356. (2000). Prestandard and Commentary for the seismic rehabilitation of buildings, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, VA.
12. PEER Ground Motion Database. URL: <https://ngawest2.berkeley.edu>
13. Zubritskiy M.A., Ushakov O.Y., Sabitov L.S. (2019). Performance-based seismic evaluation methods for the estimation of inelastic deformation demands.
14. Zubritskiy M.A. Account for the contribution of higher vibration modes under seismic resistance estimation of system with elastomeric supports by nonlinear static method / O.Y. Ushakov, L.S. Sabitov // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1425. No. 1. 7 s.

## References

1. SP 14.13330.2018. Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonah [SP 14.13330.2018. Construction in seismic areas]. Moscow, 2018.
2. Ajzenberg Ya.M. Sejsmoizolyaciya i adaptivnye sistemy sejsmozashchity [Seismic isolation and adaptive seismic protection systems]. Nauka Publ. 1983.
3. Birbraer A.N. Raschet konstrukcij na sejsmostojkost' [Calculation of structures for seismic resistance]. St. Petersburg, 1988.
4. Mkrtychev O.V. Bezopasnost' zdaniy i sooruzhenij pri sejsmicheskikh i avarijnyh vozdejstviyah [Safety of buildings and structures under seismic and emergency impacts]. Moscow: 2010.
5. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A. Problemy ucheta nelinejnostej v teorii sejsmostojkosti (gipotezy i zabluzhdeniya) [Problems of accounting for nonlinearities in the theory of seismic stability (hypotheses and delusions)]. Moscow, 2012.

6. *STO 73108225-001-2008 «Chasti opornye rezinovyie armirovannyye»* [STO 73108225-001-2008 “Rubber reinforced support parts”].
7. Tarasov V.A., Baranovskiy M.Yu., Red'kin A.V., Sokolov E.A., Stepanov A.S. Sistemy sejsmoizolyacii [Seismic isolation systems]. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij* [Construction of unique buildings and structures]. 2016, I. 4, pp. 117–140.
8. Uzdin A.M. *Osnovy teorii sejsmostojkosti i sejsmostojkogo stroitel'stva zdaniy i sooruzhenij* [Fundamentals of the theory of seismic resistance and earthquake-resistant construction of buildings and structures]. St. Petersburg, 1993. 176 p.
9. Eurocode 8: Seismic Design of Buildings. EUR 25204 EN — 2012.
10. Applied Technology Council (ATC-40). (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Redwood, CA.
11. FEMA-356. (2000). Prestandard and Commentary for the seismic rehabilitation of buildings, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, VA.
12. PEER Ground Motion Database. URL: <https://ngawest2.berkeley.edu/>
13. Zubritskiy M.A., Ushakov O.Y., Sabitov L.S. (2019). ‘Performance-based seismic evaluation methods for the estimation of inelastic deformation demands’.
14. Zubritskiy M.A. Account for the contribution of higher vibration modes under seismic resistance estimation of system with elastomeric supports by nonlinear static method / Ushakov O.Y., Sabitov L.S. // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1425. No. 1. 7 s.