УДК 699.841

© Н. В. Островская, канд. техн. наук, доцент

© Д. Е. Бондарев, ассистент

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: ostrovskaya.nv@yandex.ru, 89523684328@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-5-94-100

© N. V. Ostrovskaya, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© D. E. Bondarev, assistant lecturer

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: ostrovskaya.nv@yandex.ru, 89523684328@mail.ru

КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДЕМПФИРОВАНИЯ В СЕЙСМОИЗОЛИРОВАННЫХ СООРУЖЕНИЯХ

CRITERIA FOR DAMPING PARAMETERS OPTIMIZATION IN SEISMIC ISOLATED STRUCTURES

Для защиты от землетрясений различных сооружений и зданий, в том числе и уникальных, широко применяются всевозможные системы сейсмоизоляции. Эффективность применения таких систем существенно зависит от грамотного выбора параметров демпфирования. Рассматривается общий подход к поиску оптимальных параметров демпфирования как по критерию абсолютных ускорений, так и по кинематическому критерию. Также предложен оптимизационный критерий для уникальных сооружений.

Ключевые слова: система сейсмоизоляции, оптимизация демпфирования, уникальные сооружения.

All kinds of seismic insulation systems are widely used to protect various structures and buildings, including unique ones, against earthquakes. The efficiency of such systems depends significantly on the competent selection of damping parameters. The article considers a general approach to selecting optimal damping parameters, both by the criterion of absolute accelerations and by the kinematic criterion. The optimization criterion for unique structures is also proposed.

Keywords: seismic isolation system, damping optimization, unique structures.

1. Постановка задачи

Ранее в работах [1, 2] рассматривался вопрос оптимизации параметров пластического демпфирования для системы «защищаемый объект–система сейсмоизоляции» (ЗО–ССИ). В данной статье будет сделано обобщение данного подхода для оптимизации демпфирования по абсолютным ускорениям, а также на основе кинематического критерия.

Специальный критерий оптимизации демпфирования следует применять и в тех случаях, когда система сейсмоизоляции (ССИ) используется для защиты уникальных сооружений. Предполагается, что на здание, расположенное на ССИ, могут действовать сейсмические нагрузки, частотность которых неизвестна. Пусть возможно действие « m » низкочастотных и « k » высокочастотных нагрузок. Применение ССИ не означает абсолютной защиты. Полностью защищается лишь несущее ядро здания, а повреж-

дения в зданиях возможны. Сильное демпфирование уменьшает повреждения, возникающие при низкочастотных (резонансных для ССИ) нагрузках, и уменьшает повреждения при высокочастотных нагрузках. Слабое демпфирование приводит к обратным эффектам. Оптимизация демпфирования уменьшает вероятность повреждений.

Современные подходы к проектированию и расчетам уникальных зданий и сооружений подразумевают применение мощных расчетных программных комплексов, основанных на конечно-элементном моделировании. С такими подходами на примере многочисленных расчетов конструкций самого различного назначения, конфигурации и мест расположения в нашей стране можно ознакомиться в работах [3, 4]. Однако эти расчеты трудоемки и требуют перебора большого количества факторов, влияющих на характеристики демпфирования, что мало-

эффективно для проектирования оптимальных параметров.

Задача оптимизации систем сейсмоизоляции встречается в работах зарубежных авторов [5, 6], однако они опираются при выборе определенных параметров системы «ЗО-ССИ» на многочисленные экспериментальные данные, получение которых не всегда возможно.

2. Математические модели

В исследованиях [1, 2] при оптимизации демпфирования использовалась линеаризованная динамическая модель «ЗО-ССИ» с одной степенью свободы [7]. Вопрос точности перехода от нелинейной к линейной модели подробно рассмотрен в [8]:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega\dot{u} + \omega^2 u = -\ddot{x}_i(t), \quad (1)$$

где $u, \dot{u}, \ddot{u}$ — относительные перемещения, скорости и ускорения ЗО соответственно; ω — собственная частота системы; ζ — параметр демпфирования; $\ddot{x}_i(t)$ — i -е сейсмическое воздействие в репрезентативной выборке воздействий.

Следует отметить, что на данный момент существуют более сложные модели сооружения, расположенного на системе сейсмоизоляции. Данные модели учитывают кручение, несколько этажей по высоте, а также качение (поворот относительно горизонтальных осей). Например, в работе зарубежных исследователей [9] рассматривается модель здания, расположенного на сферических маятниках, которая учитывает кручения относительно трех взаимно перпендикулярных осей координат (рис. 1).

Рис. 1. Общий вид модели [7]

Рис. 2. Вид математической модели, учитывающей кручение объекта относительно вертикальной оси [8]

В работах [10, 11] исследователи продемонстрировали результаты влияния ротационной компоненты на динамику сейсмоизолированного сооружения, расположенного как на маятниковых, так и на резинометаллических опорах (рис. 2).

Таким образом, видно, что существуют различные подходы к моделированию системы «ЗО–ССИ» с помощью систем с тремя и большим числом степеней свободы, однако в статье будет рассмотрена оптимизация демпфирования на примере системы с одной степенью свободы (1).

3. Общий подход к оптимизации демпфирования

Как было предложено в работах [1, 2], в качестве критерия оптимизации параметров демпфирования определялась следующая функция:

$$Cr = \min_{\zeta} \ddot{U}_{\max}, \quad (2)$$

где $\ddot{U}_{\max} = \frac{\sum_i \max_t |\ddot{u}_i(t) + \ddot{x}_i(t)|}{n}$ — усредненные по i абсолютные ускорения ЗО (оценка математического ожидания); $\ddot{u}_i(t)$ — i -е относительное ускорение ЗО, соответствующее $\ddot{x}_i(t)$; i — номер реализации внешнего воздействия в репрезентативной выборке этих воздействий; n — число воздействий в выборке.

При этом для функций $u_i(t)$ было принято следующее ограничение:

$$u_{\max} = \max |u_i(t)| \leq h, \quad (3)$$

где h — максимально возможные по конструктивным соображениям перемещения ЗО относительно фундамента (за счет работы ССИ); $i = 1, 2, \dots, n$.

Однако в ряде случаев за критерий оптимизации следует брать кинематический критерий $u_{\max}$. Это может произойти в силу следующих причин. При работе ССИ должны деформироваться различные коммуникации (водоснабжения, теплоснабжения, электроснабжения и т. п.). Их деформирование определяется значениями $u_{\max}$. Уменьшение относительных перемещений ЗО может значительно сократить затраты на создание коммуникационных сетей, обеспечивающих требуемые перемещения.

Сейсмоизолирующие опоры, конструктивно позволяющие реализовывать большие относительные перемещения ЗО (больше 0,5 м), значительно дороже опор, допускающих лишь небольшие $u_{\max}$. Поэтому оптимизация (уменьшение) $u_{\max}$ может дать заметный экономический эффект, а также повысить надежность работы конструкции. Могут быть и другие причины перехода к кинематическому критерию оптимизации. Сформулируем этот критерий:

$$Cr = \min_{\zeta} U_{\max}, \quad (4)$$

где $U_{\max} = \max_i \max_t |u_i(t)|$ — максимальное значение относительных перемещений из всей репрезентативной выборки воздействий.

При этом для функций $\ddot{u}_i(t)$ принимается следующее ограничение

$$\ddot{u}_{\max} = \max_t |\ddot{u}_i(t) + \ddot{x}_i(t)| \leq a, \quad (5)$$

где a — допустимые для ЗО абсолютные ускорения, $i = 1, 2, \dots, n$.

Для удобства и наглядности оба критерия сведены в табл. 1.

Ниже приведены результаты численных расчетов для линеаризованной модели с одной степенью свободы (формула (1)) при оптимизации демпфирования по двум критериям. Частота системы принята $\omega = 0,4$ Гц, параметр демпфирования ζ варьировался от 0 до 1, в качестве репрезентативной выборки воздействий были использованы 200 акселерограмм различной балльности. Результаты расчетов по абсолютным ускорениям представлены в табл. 2. Резуль-

Таблица 1

Критерии оптимизации параметров демпфирования

№ п/п	Критерий оптимизации	
	Абсолютные ускорения	Кинематический $u_{\max}$
1	$Cr = \min_{\varsigma} \ddot{U}_{\max}$	$Cr = \min_{\varsigma} U_{\max}$
2	$\ddot{U}_{\max} = \frac{\sum_i \max_t \ddot{u}_i(t) + \ddot{x}_i(t) }{n}$	$U_{\max} = \max_i \max_t u_i(t) $
Ограничение		
3	$u_{\max} = \max_t u_i(t) \leq h$	$\ddot{u}_{\max} = \max_t \ddot{u}_i(t) + \ddot{x}_i(t) \leq a$
4	h — допустимые для ЗО относительные смещения	a — допустимые для ЗО абсолютные ускорения

таты в виде графиков по двум критериям представлены на рис. 3.

Численный анализ показывает, что оптимизация демпфирования по критерию абсолютных ускорений может уменьшить сейсмический риск в 1,5 раза.

Для кинематического критерия мы наблюдаем (рис. 3, б), что функция $Cr(\varsigma)$ монотонно убывает с увеличением ς , что следует из ее физического смысла (увеличение демпфирования уменьшает относительные перемещения ЗО). Поэтому оптимальное значение ς лежит на границе интервала допустимых значений ς . Этот интервал определяется неравенством (5).

4. Оптимизация параметров демпфирования для уникальных сооружений

Как уже отмечалось выше, для уникальных сооружений важно не уменьшить вероятность повреждений, а минимизировать уровень повреждений. Для этого нужно минимизировать максимумы абсолютных ускорений ЗО при всех воздействиях, не прибегая к усреднению максимумов по воздействиям. Таким образом, можно предложить следующий критерий оптимизации демпфирования для уникальных сооружений:

$$Cr = \min_{\varsigma} \tilde{\ddot{U}}_{\max}, \quad (6)$$

где $\tilde{\ddot{U}}_{\max} = \max_i \max_t |\ddot{u}_i(t) + \ddot{x}_i(t)|$ — максимальное значение относительных перемещений из всей репрезентативной выборки воздействий, $i = 1, 2, \dots, n$.

Все обозначения те же, что в п. 3. Для функций $u_i(t)$ принимается ограничение (3). В каче-

стве исходных данных используем результаты, полученные по расчетам модели в п. 3 и представленные в табл. 2. Результаты расчетов представлены на рис. 4.

Численный анализ показывает, что оптимизация демпфирования для уникальных соору-

Рис. 3. Оптимизация ς для репрезентативного ансамбля воздействий по критерию: а — абсолютных ускорений (формула (2)); б — кинематическому критерию (формула (4))

Таблица 2

Результаты расчетов по абсолютным ускорениям

№ п/п	Акселерограмма	Коэффициент демпфирования ζ										
	$\ddot{x}_i(t)$, м/с ²	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1	1,013	0,341	0,142	0,135	0,149	0,174	0,203	0,227	0,250	0,277	0,300	0,321
2	0,996	0,137	0,140	0,155	0,171	0,196	0,223	0,253	0,288	0,321	0,352	0,382
3	1,042	1,800	1,474	1,303	1,222	1,167	1,124	1,09	1,063	1,042	1,025	1,013
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
40	1,823	0,500	0,410	0,398	0,408	0,467	0,551	0,628	0,701	0,771	0,837	0,899
41	1,660	0,849	0,457	0,484	0,536	0,596	0,657	0,723	0,792	0,853	0,907	0,954
42	1,711	6,819	4,090	3,297	2,806	2,469	2,234	2,061	1,994	1,948	1,912	1,883
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
55	2,486	0,315	0,209	0,239	0,280	0,329	0,380	0,431	0,482	0,534	0,583	0,628
56	2,494	2,721	1,935	1,674	1,498	1,506	1,517	1,535	1,552	1,575	1,610	1,662
57	2,593	0,751	0,462	0,355	0,323	0,325	0,337	0,354	0,385	0,417	0,450	0,483
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
70	2,910	2,702	1,267	1,117	1,063	1,026	0,999	1,015	1,059	1,099	1,168	1,238
71	2,610	1,941	0,917	0,989	1,102	1,212	1,313	1,402	1,480	1,548	1,608	1,661
72	3,257	2,006	0,742	0,582	0,531	0,523	0,532	0,550	0,571	0,601	0,633	0,664
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
107	4,009	1,010	0,707	0,616	0,569	0,538	0,519	0,542	0,593	0,641	0,705	0,768
108	4,029	1,020	0,559	0,482	0,455	0,47	0,512	0,555	0,605	0,659	0,711	0,760
109	4,033	4,771	2,720	2,251	2,092	2,054	2,072	2,120	2,183	2,252	2,323	2,394
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
140	5,031	5,499	3,1	2,316	2,202	2,311	2,41	2,498	2,576	2,645	2,705	2,760
141	5,044	7,341	3,021	2,059	1,915	1,909	2,003	2,118	2,229	2,331	2,425	2,509
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
165	6,080	1,292	0,6853	0,7224	0,8477	1,108	1,343	1,564	1,77	1,961	2,139	2,304
166	6,146	2,49	1,45	1,07	0,9976	1,036	1,104	1,287	1,487	1,667	1,832	1,985
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
180	7,310	3,854	2,280	1,985	1,903	1,938	2,038	2,157	2,277	2,392	2,500	2,600
181	7,210	0,841	0,675	0,702	0,743	0,847	0,942	1,041	1,218	1,386	1,547	1,701
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
187	8,180	6,500	5,160	4,966	4,811	4,708	4,71	4,729	4,775	4,838	4,911	4,990
188	8,267	7,481	4,794	4,083	3,668	3,633	3,85	4,023	4,163	4,280	4,385	4,483
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
195	9,818	3,767	1,817	1,551	1,435	1,481	1,561	1,618	1,660	1,767	1,873	1,97
$\ddot{U}_{\max}$		2,39	1,34	1,19	1,13	1,16	1,22	1,29	1,36	1,44	1,52	1,59
$\ddot{\tilde{U}}_{\max}$		9,22	5,29	4,966	4,811	4,708	4,71	4,729	4,775	4,838	4,911	4,99

жений может уменьшить сейсмический риск в 1,5 раза.

Заключение

Предложен алгоритм поиска оптимальных параметров демпфирования как по критерию минимальных усредненных абсолютных ускорений, так и по критерию минимальных относительных перемещений защищаемого объекта. Данные критерии заключаются в минимизации максимальных значений усредненных абсолют-

ных ускорений 3О и максимальных значений относительных перемещений 3О из всей репрезентативной выборки воздействий соответственно.

Также рассмотрен критерий оптимизации демпфирования для уникальных сооружений, что может уменьшить сейсмический риск в 1,5 раза. Данный критерий заключается в минимизации максимальных значений абсолютных ускорений 3О при всех воздействиях.

Рис. 4. Оптимизация ζ для репрезентативного ансамбля воздействий по критерию для уникальных сооружений (формула 6)

Следует отметить, что модель с одной степенью свободы, которая используется в данном исследовании, хорошо себя зарекомендовала в мировой практике для расчета изолированных зданий при поступательном движении грунта, но данная модель не учитывает кручение здания в плане. Результаты численных расчетов влияния ротационной компоненты на динамику сейсмоизолированного сооружения подробно рассмотрены в работах [10, 11].

Библиографический список

1. Ostrovskaya N. V., Rutman Yu. L. Optimum control of energy dissipation in support-pendulum seismic isolation system for large NPP equipment // *Procedia Structural Integrity*. 2017. Vol. 6. Pp. 19–26.
2. Ostrovskaya N. V., Rutman Yu. L. Damping optimization in seismic isolation systems // *Key Engineering Materials*. 2019. Vol. 828. Pp. 129–135.
3. Акимов П. А. и др. Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов / под ред. А. М. Белостоцкого, П. А. Акимова. К 25-летию Научно-исследовательского центра СтаДиО. М.: АСВ, 2016. Т. 1. 426 с.
4. Акимов П. А. и др. Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов / под ред. А. М. Белостоцкого, П. А. Акимова. К 25-летию Научно-исследовательского центра СтаДиО. М.: АСВ, 2016. Т. 2. 596 с.
5. Moreschi L. M. Seismic Design of Energy Dissipation Systems for Optimal Structural Performance: dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering Mechanics. Blacksburg, Virginia, 2000. 206 p. URL: [http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-07132000-](http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-07132000-16010022/unrestricted/etd.pdf)

16010022/unrestricted/etd.pdf (дата обращения: 20.04.2020).

6. Castelliano M. G., Infanti S., Colato G. P. The experience of FIP industriale in the retrofit of bridges through seismic isolation and energy dissipation // *Buletinul AGIR*. 2009. № 1–2. Pp. 266–278. URL: <http://www.agir.ro/buletine/495.pdf> (дата обращения: 20.04.20).

7. Рутман Ю. Л. Маятниковые сейсмоизолирующие опоры. Конструкция. Расчет. Эксперимент // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 1 (27). С. 31–36.

8. Островская Н. В., Рутман Ю. Л. Оптимизация конструктивных параметров упругопластических демпферов в системах сейсмоизоляции // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. № 3 (74). С. 36–41.

9. Almazán J. L., de la Llera J. C. Accidental torsion due to overturning in nominally symmetric structures isolated with FPS // *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 2003. Vol. 32 (6). Pp. 919–948.

10. Rutman Yu. L., Simbort E., Bondarev D. E. An analysis of the dynamics of seismically isolated structures taking into account its torsional vibrations // *Procedia Structural Integrity*. 2017. Vol. 6. Pp. 208–215.

11. Бондарев Д. Е., Симборт Э. Кручение симметричных сооружений, расположенных на различных системах сейсмоизоляции, вызванное волновым эффектом землетрясения // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2019. № 6. С. 28–33.

References

1. Ostrovskaya N. V., Rutman Yu. L. Optimum control of energy dissipation in support-pendulum seismic isolation system for large NPP equipment. *Procedia Structural Integrity*, 2017, vol. 6, pp. 19–26.
2. Ostrovskaya N. V., Rutman Yu. L. Damping optimization in seismic isolation systems. *Key Engineering Materials*, 2019, vol. 828, pp. 129–135.
3. Akimov P. A., et al. *Aktual'nye problemy chislennogo modelirovaniya zdaniy, sooruzheniy i kompleksov* [Actual problems of numerical modeling of buildings, structures and complexes]. Ed. by Belostotsky A.M., Akimov P. A. In: To the 25-th anniversary of the StaDIO research center. Moscow, DIA Publ., 2016, vol. 1, 426 p.
4. Akimov P. A., et al. Actual problems of numerical modeling of buildings, structures and complexes [Actual problems of numerical modeling of buildings, structures and complexes]. Ed. by Belostotsky A. M., Akimov P. A. In: To the 25-th anniversary of the StaDIO research center. Moscow, DIA Publ., 2016, vol. 2, 596 p.
5. Moreschi L. M. *Seismic design of energy dissipation systems for optimal structural performance. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering Mechanics*. Blacksburg, Virginia, 2000. 206 p. Available at:

<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-07132000-16010022/unrestricted/etd.pdf> (accessed: 20.04.2020).

6. Castelliano M. G., Infanti S., Colato G. P. The experience of FIP industriale in the retrofit of bridges through seismic isolation and energy dissipation. *Buletinul AGIR*, 2009, no. 1–2, pp. 266–278. Available at: <http://www.agir.ro/buletine/495.pdf> (accessed: 20.04.20).

7. Rutman Yu. L. *Mayatnikovye seysmoizoliruyushchie opory. Konstruktsiya. Raschet. Eksperiment* [Pendulum seismic isolation supports. Design. Calculation. Experiment]. *Inzhenerno-stroitel'niy zhurnal – Civil engineering journal*, 2012, no. 1 (27), pp. 31–36.

8. Ostrovskaya N. V., Rutman Yu. L. *Optimizatsiya konstruktivnykh parametrov uprugoplasticheskikh dempferov v sistemakh seysmoizolyatsii* [Optimization of elastic-plastic damper design parameters in the seismic isolation systems]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 3 (74), pp. 36–41.

9. Almazán J. L., de la Llera J. C. Accidental torsion due to overturning in nominally symmetric structures isolated with FPS. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 2003, vol. 32 (6), pp. 919–948.

10. Rutman Yu. L., Simbort E., Bondarev D. E. An analysis of the dynamics of seismically isolated structures taking into account its torsional vibrations. *Procedia Structural Integrity*, 2017, vol. 6, pp. 208–215.

11. Bondarev D. E., Simbort E. *Kruchenie simmetrichnykh sooruzheniy, raspolozhennykh na razlichnykh sistemakh seysmoizolyatsii, vyzvannoe volnovym efektom zemletryaseniya* [Torsion of symmetrical structures located on various seismic isolation systems caused by the wave effect of an earthquake]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy – Earthquake resistant engineering. Safety of structures*, 2019, no. 6, pp. 28–33.