

Строительная механика и расчет сооружений

УДК 624.04:[624.042.7+699.841]

© А. Ю. Иванов, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: andreyivanov4@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-4-36-45

© A. Yu. Ivanov, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: andreyivanov4@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТОВ СЕЙСМОИЗОЛИРОВАННЫХ СООРУЖЕНИЙ

OPTIMIZATION OF BASE-ISOLATED STRUCTURE DESIGNS

Рассмотрена проблема выбора оптимального типа системы сейсмоизоляции и ее параметров, которые минимизируют ущерб, причиняемый зданию землетрясениями за рассматриваемый период эксплуатации. Проведено ее сравнение с традиционными схемами сейсмоусиления, в которых усиление здания производится путем увеличения сечений несущих конструкций каркаса. Для этого использован алгоритм оптимизации, основывающийся на анализе ущерба, получаемого при выборе различных схем сейсмоусиления, который может быть оценен на любом интересующем этапе жизненного цикла здания. Предложена методика по оценке конструктивного ущерба при сейсмическом воздействии. Установлена зависимость конструктивного ущерба и финансовых потерь, величины которых требуются для анализа проекта по предлагаемому алгоритму оптимизации. Приведен практический пример по определению оптимального варианта проекта сейсмоусиления здания.

Ключевые слова: сейсмоизолированное сооружение, система сейсмоизоляции, схема сейсмоусиления здания, конструктивный ущерб, оптимизация проекта.

The article presents the study results of the problem of selecting the optimal type of the seismic isolation system and its parameters reducing the damage in the structure caused by earthquakes during the structure life-cycle. The proposed system is compared with traditionally used base-isolated seismic retrofit schemes where strengthening of the building is achieved by means of increasing the structural element section profiles of the building. There is used the optimization algorithm based on the analysis of the damage at selecting various seismic retrofit schemes, which can be estimated at any possible life-cycle stage of the building. The author proposes a procedure of evaluating the structural damage caused by earthquake excitation. There has been established a dependence between the structural damage and the financial losses, the values of which are necessary for carrying out the analysis of the project on the proposed optimization algorithm. A practical application example of determining the optimal building seismic retrofit scheme is given.

Keywords: earthquake isolated structure, seismic isolation system, seismic retrofit scheme, structural damage, structure design optimization.

Введение

Объектом исследования в данной статье является оптимизация сейсмоизолированных сооружений. Их оптимизация начала интенсивно анализироваться в литературе последние 15 лет и рассматривалась отечественными [1], а также зарубежными [2, 3] учеными. Нельзя не упомянуть работу [4], в которой проблема прогнозирования ущерба и алгоритм его учета при сейс-

мических воздействиях были рассмотрены впервые. Однако в указанных работах не был предложен алгоритм, который связывает результаты сейсмического расчета с показателями, которые характеризуют величины ущерба. Недостаточно конкретны в указанных работах и оптимизационные критерии.

Методы и алгоритмы, предложенные в [5, 6], были направлены на устранение этих недостат-

ков. За критерий оптимальности принималась прибыль проектируемого предприятия в течение его жизненного цикла. Учитывалась стоимость сейсмического ущерба, т. е. восстановительных и ремонтных работ, необходимость в которых возникает после различных сейсмических воздействий на сооружение за весь ожидаемый срок службы. Таким образом в [5] был предложен наиболее пригодный для решения конкретных инженерно-экономических задач алгоритм, который связывает результаты сейсмического расчета с экономическими показателями, характеризующими величины ущерба. Размер ущерба определялся на основе кривой несущей способности здания. В зарубежной практике для анализа резервов прочности зданий широко применяется нелинейный статический Pushover-анализ (НСМ, «М» от слова «метод»). Для расчета по НСМ необходимо знать спектр воздействия, соответствующий движению фундамента сооружения. Для зданий, расположенных на неподвижных фундаментах, движение последних совпадает с движением грунтового основания при землетрясении. В этом случае спектральная кривая берется из нормативных документов¹. Однако если антисейсмическое мероприятие заключается в применении системы сейсмоизоляции, то такой подход не годится². Движение суперструктуры³ не совпадает с движением субструктуры⁴, поэтому в статье [6] было показано, как применить предложенный в [5] алгоритм экономической оптимизации к зданию, расположенному на системе сейсмоизоляции (ССИ).

Однако в работах [5, 6] были рассмотрены не самые оптимальные антисейсмические мероприятия, касающиеся, в частности, выбора ССИ. Не был проанализирован отклик сейсмоизолированной системы (СИС) при выборе разных ССИ. По этой причине представляется необходимым рассмотреть проблему выбора оптимального типа ССИ, проанализировав поведение каждого типа СИС в зависимости от спектральной

ной характеристики воздействия. Для решения поставленной задачи необходимо рассчитать конструкции с различными характеристиками ССИ и определить наиболее оптимальный вариант антисейсмических мероприятий, используя предложенный алгоритм оптимизации.

1. Оптимизационная задача и функция цели

Оптимизационная задача в условиях данной работы сводится к минимизации целевой функции при задании различных значений варьируемым параметрам. В качестве целевой функции, как было указано в [5, 6], принимается экономический эффект, величина которого может быть рассчитана в любой момент выбранного жизненного цикла здания. Количественно она определяется при помощи формулы⁵

$$E = -K_{ant} + f(k, N) \sum_{I=I_{\min}}^{I=I_{\max}} L(I) \cdot D_{rel}, \quad (1)$$

где K_{ant} — затраты на антисейсмические мероприятия; $f(k, N)$ — коэффициент приведения затрат, вычисляемый согласно [3] по формуле

$$f(k, N) = \left(\frac{1}{k} - 1\right) [1 - (1 - k)^N]$$

(здесь $k = \frac{d + d^*}{1 + d}$, где d^* — норма амортизации (параметр, определяющий снижение стоимости здания во времени и обратный его сроку эксплуатации); d — годовая прибыль производства); $L(I)$ — среднегодовое число I -балльных землетрясений на площадке строительства; N — время после начала эксплуатации (в годах); D_{rel} — наступивший ущерб (финансовые затраты, связанные с ремонтом или заменой повреждаемых конструктивных элементов).

2. Методика расчета спектра отклика в условиях применения ССИ

Как было указано, при применении ССИ использование нормативных спектральных кривых неправомерно. Для расчета перемещения верха здания от сейсмических воздействий по предлагаемой методике следует построить спектральную кривую (спектральный отклик), соответствующую движению суперструктуры. Предлагаемая методика использует порядок расчета, состоящий из двух этапов.

На первом этапе выполняется прямой динамический расчет системы «земная поверх-

¹ СП 14.13330.2014. СНИП II-7-81* Строительство в сейсмических районах. М.: ОАО «ЦПП», 2014. 126 с.

² EC8. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. European Committee for Standardisation: Brussels, Belgium, The European Standard EN 1998-1, 2004.

³ Суперструктура — защищаемый объект (здание), расположенный на ССИ (субструктура — кинематическом фундаменте).

⁴ Субструктура — кинематический фундамент защищаемого объекта (сейсмический ростверк, опирающийся на ССИ).

⁵ Приведен окончательный вид формулы для расчета экономического эффекта. Вывод формулы (1) представлен в статье [1].

ность грунтового основания — субструктура». При этом сооружение можно рассматривать как твердое тело. Для резинометаллических сейсмоизоляторов, поведение которых при циклическом воздействии может быть представлено как линейное, применим интегральный подход для определения жесткости системы. Если определен суммарный вес здания, включающий в себя его собственный вес, другие постоянные нагрузки, а также участвующие в динамической реакции длительные нагрузки, то по максимальной вертикальной нагрузке на сеймоопору можно определить их требуемое количество для всего здания. Исходя из суммарной горизонтальной жесткости определяется частота. В случаях, когда в качестве ССИ применяются сеймоопоры с демпфирующими элементами, в которых при циклическом нагружении развиваются пластические деформации, в уравнение, описывающее такую модель, должно входить слагаемое, учитывающее билинейную (или другую) характеристику пластического демпфера [7]. Если в качестве опор применяются слайдеры трения маятникового типа, то на поведение системы будут влиять такие параметры, как эквивалентный радиус кривизны опоры и величина силы трения, возникающей между балансирами сферических вогнутых поверхностей. Расчет производится для набора акселерограмм, в результате находятся законы движения субструктуры.

На втором этапе выполняется прямой динамический расчет системы «субструктура — линейный осциллятор». Для каждого закона движения субструктуры находится спектр отклика. Проводится статистическая обработка спектров отклика. В результате обработки находится усредненный спектр отклика ускорений как оценка математических ожиданий плюс оценка стандартного отклонения.

3. Методика определения ущерба с использованием НСМ

Полученный спектр отклика служит основой для применения НСМ (Pushover-анализа). НСМ представляет собой диаграммный метод расчета, целью которого является выявление ожидаемого уровня повреждений конструктивной системы путем оценки таких его прочностных и деформационных свойств, наличия которых требует от системы рассматриваемое сейсмическое воздей-

ствии [8, 9]. Это прочностное и деформационное требование сравнивается с реальной несущей способностью здания и оценивается уровень повреждений. В качестве основателей НСМ можно выделить таких ученых, как Х. Крауинклер [9], П. Фаджфар [10], А. К. Чопра, Р. К. Гоэль [11]. Рекомендации по применению НСМ содержатся в зарубежных нормативных документах^{6,7,8,9}. Ряд таких отечественных исследователей и ученых из стран СНГ, как Ю. И. Немчинов, Н. Г. Марьенков, А. К. Хавкин, К. Н. Бабик [12], А. В. Соснин [8], К. Т. Чхиквадзе, Ц. Г. Цискрели, Н. Ш. Члаидзе, Л. Д. Каджая [13], также рассматривали применение НСМ для анализа сейсмостойкости.

НСМ в постановке данной задачи позволяет учитывать особенности прошедшего через ССИ сейсмического воздействия, так как расчетный спектр отклика строится на основе усредненного спектра отклика ускорений, в котором и учтено влияние той или иной ССИ.

4. Экономическая оптимизация при применении ССИ

На основе найденных по НСМ горизонтальных перемещений верха сооружения вычисляется конструктивный и финансовый ущерб. Затем применяется описанный в [5] алгоритм оптимизации. При этом варьируемым параметром является тип ССИ.

5. Пример расчета. Численный анализ

А. Конструктивные и расчетные характеристики системы

В качестве примера рассматривается сооружение каркасного типа производственного назначения, имеющее размеры в плане 43×108 м и высоту 14,5 м. Конструкция кровельного покрытия здания состоит из стропильных ферм, устанавливаемых с шагом 4 м на подстропильные фермы, которые опираются на железобетонные колонны каркаса. Верхние и нижние пояса ферм раскреплены продольными и диагональными связями. Типовой вариант S_{tip} запроектирован

⁶ EC8. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. European Committee for Standardisation: Brussels, Belgium, The European Standard EN 1998-1, 2004.

⁷ Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Vol. 1: ATC-40 Report. Applied Technology Council. Redwood City, California. 1996. 334 p.

⁸ FEMA 440. Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. Federal Emergency Management Agency. Washington, DC. 2005.

⁹ ASCE/SEI Standard 41-13. Seismic Evaluation and of Retrofit of Existing Buildings. Structural Engineering Institute, American society of civil engineers, 2014.

на основное сочетание нагрузок без учета сейсмичности, его модальный анализ дает период колебаний по 1-й форме $T = 1,58$ с. Варианты сейсмоусиления этого каркаса S_{PS} , S_{MS} получены в [5] предварительным расчетом по нормам¹⁰ путем варьирования коэффициента K_1 , отличаются площадью поперечных сечений и армированием железобетонных колонн, а также размерами сечений элементов металлопроката (S_{PS} — частично усиленный каркас: $K_1 = 0,5$ ($T = 1,49$ с); S_{MS} — максимально усиленный каркас, наибольшие сечения несущих элементов $K_1 = 1$ ($T = 0,94$ с)). Антисейсмические мероприятия для типового каркаса S_{ip} могут заключаться и в применении ССИ. Конструкция сейсмоизолированного здания подразумевает наличие сейсмического ростверка, который опирается на сеймоопоры, скомпонованные по конструктивным и расчетным соображениям.

Рассмотрим два типа сейсмоизоляции:

1. Резинометаллические сейсмоизоляторы с резиновым наполнителем мягкого типа с высокой ($\zeta = 15\%$) демпфирующей способностью (вариант S_{HDRI}).

2. Слайдеры трения со сферической поверхностью маятникового типа (вариант S_{SFP}).

Таким образом, в дополнение к уже рассмотренным в работах [5, 6] типам каркасов S_{ip} , S_{PS} , S_{MS} добавляется рассмотрение двух типов сейсмоизолированного каркаса: S_{HDRI} и S_{SFP} (вместо каркаса S_{SIS} в [6]).

В первом случае проектом сейсмоизолированного сооружения S_{HDRI} предусматривается его возведение на ж/б сейсмическом ростверке, который отливается по опорным частям резинометаллических сейсмоизоляторов, предварительно установленных на отдельные фундаменты. По величине вертикальной силы V , действующей на изоляторы в местах опирания на них ростверка, подобраны четыре типа изоляторов (V от 100 до 1400 кН) таким образом, чтобы суммарная горизонтальная жесткость системы была минимальной. Выбранные таким образом конструктивные параметры варианта S_{HDRI} создают собственную частоту СИС $f = 0,5$ Гц.

Во втором случае (S_{SFP}) сейсмический ростверк проектируется на слайдерах трения маят-

никового типа с фиксированным эквивалентным радиусом кривизны и перемещением ± 300 мм, вертикальной нагрузкой 2400 кН соответствующим коэффициентом трения 0,04. Заданные конструктивные параметры варианта S_{SFP} создают собственную частоту системы $f = 0,4$ Гц, при этом система должна быть оборудована дополнительными демпфирующими устройствами (например, изоляторами со свинцовым сердечником), обеспечивающими затухание колебаний в системе ($\zeta = 10\%$) при землетрясении.

Б. Описание сейсмических воздействий

Исходные воздействия задаются в виде ансамблей инструментальных акселерограмм, условно разделенных на три группы в зависимости от балльности (таблица). Проблема определения интенсивности и синтеза наиболее опасных сейсмических воздействий под сооружение подробно рассмотрена в [14]. Акселерограммы каждой группы подобраны таким образом, чтобы их спектральные пики были максимально сближены в частотном диапазоне, при этом у разных групп эти пики должны соответствовать разным диапазонам частот. Такое разбиение на группы позволит проанализировать, как влияет тип применяемой сейсмоизоляции на расчетное воздействие с различной спектральной окраской. Допустим, что за рассматриваемый жизненный цикл здания на площадке строительства произойдет одно 9-балльное, три 8-балльных и четыре 7-балльных землетрясения, характеризующихся разными группами воздействий. Такое деление необходимо для решения оптимизационной задачи, математическая запись которой связывает величины ущербов с землетрясениями определенной интенсивности, выраженной в баллах. При этом ущерб от 6-балльных землетрясений условно принимается равным 0.

Исходные воздействия, задаваемые в виде ансамблей инструментальных акселерограмм

Группы воздействий	Интенсивность воздействия (баллы)	Количество воздействий за жизненный цикл
1-я группа	8	3
2-я группа	7	4
3-я группа	9	1

¹⁰ СП 14.13330.2014. СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах. М.: ОАО «ЦПП», 2014. 126 с.

В. Динамический расчет и построение усредненных спектров реакций

1. Каждая акселерограмма, описывающая движение земной поверхности, подается на вход математической модели «сооружение — ССИ». Прямой динамический расчет и построение спектров проводятся с помощью составленной программы в MathCad. В результате расчета сейсмоизолированных систем S_{HDRI} и S_{SFP} находятся соответствующие законы движения кинематического фундамента.

2. Производится расчет осциллятора ($\zeta = 5\%$) на полученные на этапе 1 законы движения кинематического фундамента, и строятся соответствующие спектры отклика ускорений. По этим данным строятся усредненные спектры отклика для каждой группы воздействий для вариантов ССИ S_{HDRI} и S_{SFP} (рис. 1).

3. Производится расчет осциллятора ($\zeta = 5\%$) на исходные инструментальные акселерограммы, также строятся усредненные спектры отклика для расчета вариантов сейсмоусиления S_{PS} и S_{MS} без использования ССИ (рис. 2).

На рис. 1 и 2 видно, что уровень воздействия (3-я группа) на защищаемый объект снижается в три раза в случае применения резинометаллических опор, а в случае применения сейсмоизоляции с использованием слайдеров трения и специальных демпфирующих устройств — в пять раз. Полученные спектры используются для ана-

лиза откликов различных вариантов сейсмоусиления здания.

Г. Финансовые затраты на сейсмоусиление каркаса здания и расчет экономического эффекта при сейсмоусилении во времени

В работе [5] определены сметные стоимости типового каркаса и традиционных вариантов его сейсмоусиления. Для типового каркаса S_{tip} стоимость материалов и работ по его возведению определена равной $C_{tip} = 15,90$ млн руб., для каркаса S_{PS} эта стоимость $C_{PS} = 20,19$, для S_{MS} она составляет $C_{MS} = 30,80$ млн руб. Также принято, что на строительство объекта заказчиком выделяются инвестиции в размере $C_{tot} = 200,00$ млн руб. Это значение принимается за 1, тогда стоимость типового каркаса в относительных единицах равна $C_{(tip)} = \frac{C_{tip}}{C_{tot}} = \frac{15,9}{200,0} = 0,08$, частично усиленного $C_{(PS)} = 0,101$ и максимально усиленного $C_{(MS)} = 0,154$. Таким образом, затраты на антисейсмические мероприятия составляют:

$$K_{ant(PS)} = C_{(PS)} - C_{(tip)} = 0,101 - 0,08 = 0,021;$$

$$K_{ant(MS)} = C_{(MS)} - C_{(tip)} = 0,154 - 0,08 = 0,074.$$

Стоимость антисейсмических мероприятий, предусматривающих применение сейсмоизоляции, включает в себя затраты на устройство сейсмического ростверка и стоимость самих изоляторов, количество которых определяется проектом. Затраты на сейсмоусиление по проекту S_{SFP} с применением слайдеров трения маятникового

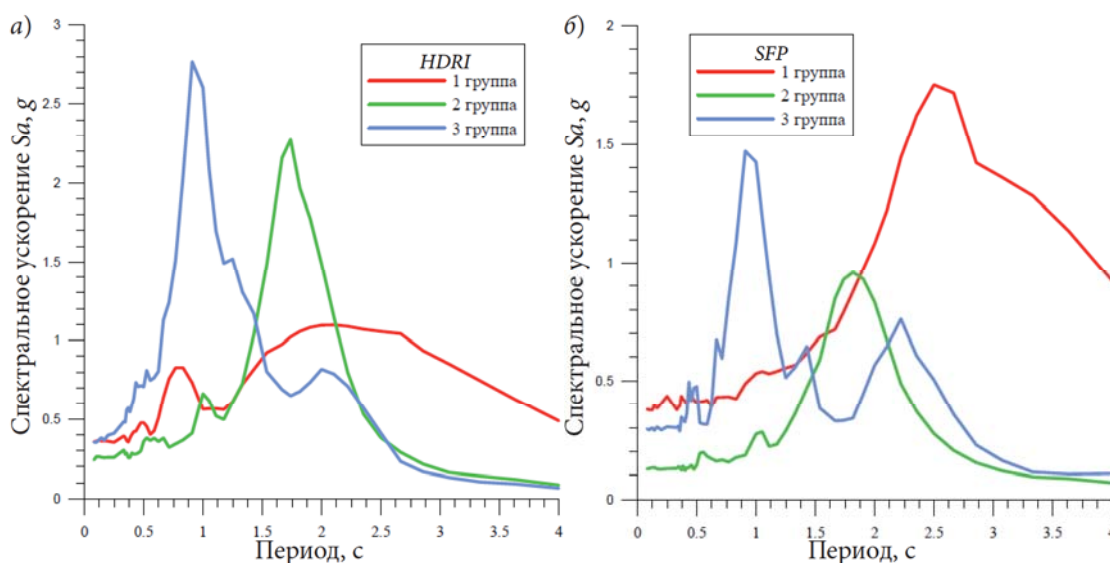


Рис. 1. Усредненные спектры отклика ускорений для расчета сейсмоизолированных систем S_{HDRI} (а) и S_{SFP} (б)

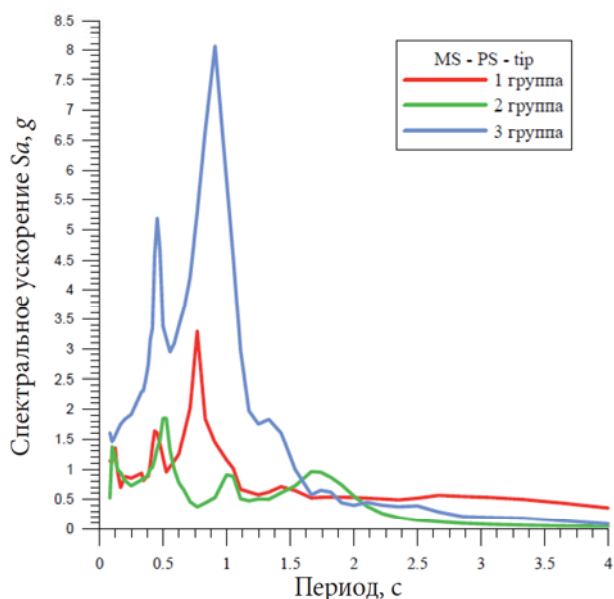


Рис. 2. Усредненные спектры отклика ускорений для расчета систем S_{tip} , S_{PS} и S_{MS}

типа (42 шт.) определены на основании коммерческого предложения от завода-изготовителя, а также стоимости устройства сейсмического ростверка, составляет $K_{amt(SFP)} = C_{(SFP)} = 0,09$ в долях от общей стоимости здания. Затраты на сейсмоусиление по проекту S_{HDRI} с использованием резинометаллических сейсмоизоляторов (78 шт.) составляют $K_{amt(HDRI)} = C_{(HDRI)} = 0,01$.

Д. Определение ущерба с использованием НСМ

В статье [6] подробно была рассмотрена последовательность нахождения точки состояния системы и соответствующего ей ущерба, полученного зданием на ССИ при определенном сейсмическом воздействии. За основу принималась процедура «А» метода спектра несущей способности нелинейного статического анализа, регламентированная АТС-40¹¹. Использовалась кривая несущей способности, полученная для здания S_{tip} в [5]. Здесь для построения кривых несущей способности каркасов S_{tip} , S_{PS} , S_{MS} , а также для поиска точки состояния системы, характеризующей горизонтальное перемещение верха здания при заданных сейсмических воздействиях, используется расчетный комплекс SAP 2000, в котором имеется возможность расчета по НСМ

как по методу спектра несущей способности, так и по ряду других процедур. В SAP 2000 нелинейная работа конструкции моделируется назначением ее элементам пластических шарниров разных типов, образование которых определяется специальной упрощенной процедурой расчета (event-to-event strategy). По результатам такого нелинейного статического расчета конструкции на вертикальную и горизонтальную нагрузки строится кривая ее несущей способности. На рис. 3 и 4 показана модель каркаса S_{tip} , соответствующая уровням повреждений LS и E , а на рис. 5, а схематично показана его кривая несущей способности.

Пусть сейсмические силы действуют по направлению оси X (вдоль здания). Если расчетный спектр пересекает кривую несущей способности на участке до точки IO (нормальная эксплуатация), то считается, что сооружение при таком воздействии работает упруго, повреждения и финансовые потери отсутствуют. Уровень повреждений LS (угроза жизни) характеризуется появлением красных пластических шарниров в основании большинства (~80 %) железобе-



Рис. 3. Модель каркаса S_{tip} , соответствующая уровню повреждений LS



Рис. 4. Модель каркаса S_{tip} , соответствующая уровню повреждений E

¹¹ Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Vol. 1: ATC-40 Report. Applied Technology Council. Redwood City, California. 1996. 334 p.

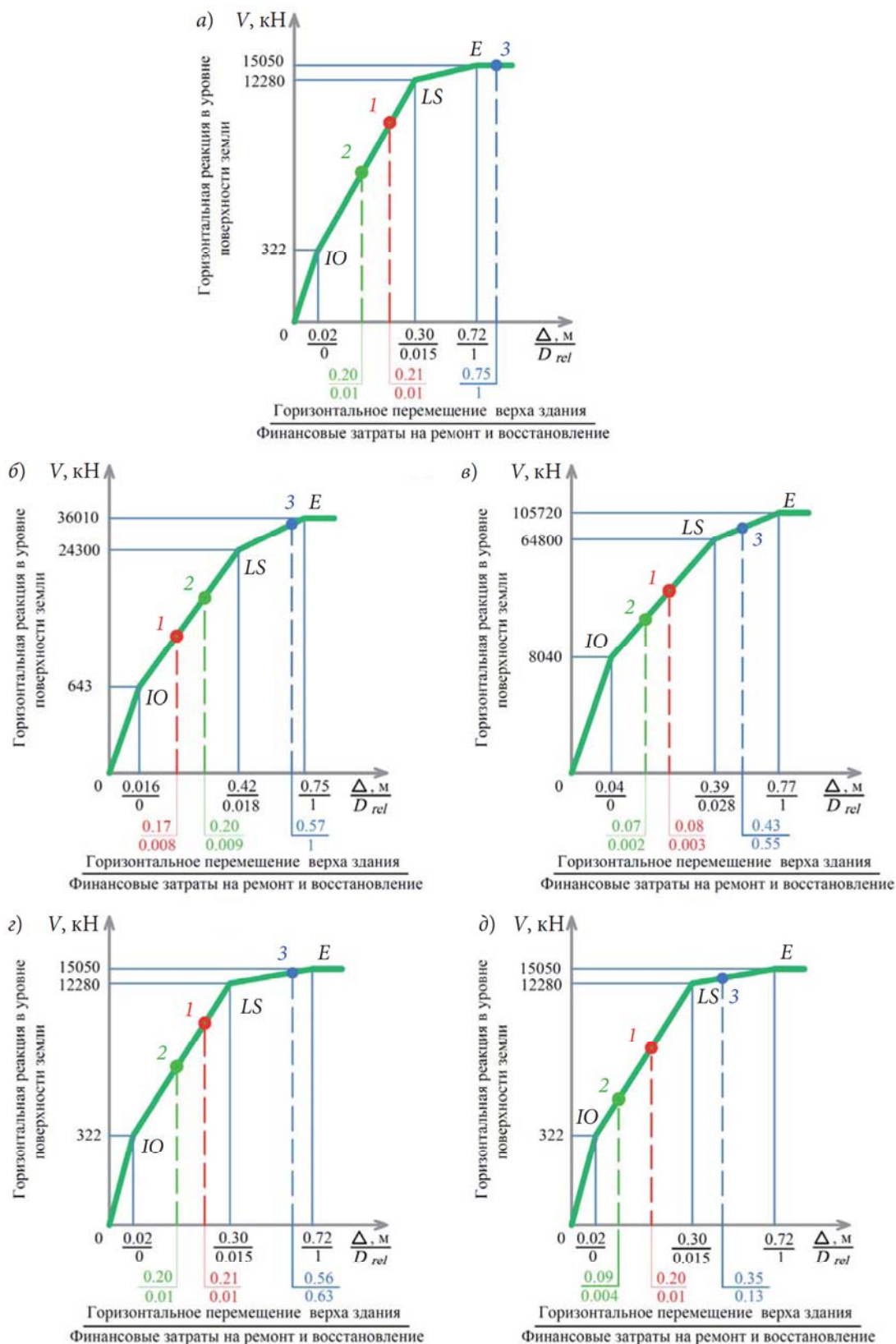


Рис. 5. Кривые несущей способности/финансовые кривые с результатами расчета на три группы воздействий для вариантов: а — S_{ip} ; б — S_{ps} ; в — S_{MS} ; г — S_{HDM} ; д — S_{SFP} ; 1, 2, 3 — точки на кривой, соответствующие горизонтальным перемещениям верха здания, полученным при его расчете на первую, вторую и третью группы воздействий (см. таблицу)

тонных колонн (см. рис. 3), поэтому такому состоянию конструкции ставится в соответствие финансовый ущерб D_{rel} эквивалентный стоимости замены вышедших из строя колонн¹² (0,015, рис. 5, а, з, д). Вследствие дальнейшего увеличения горизонтальной нагрузки образуются пластические шарниры в оставшихся колоннах, а также в продольных и диагональных связях по верхним поясам стропильных ферм (см. рис. 4), и конструкция в конечном счете исчерпывает свои ресурсы несущей способности (уровень повреждений E (авария)) и разрушается. Следовательно, финансовый ущерб в точке E кривой можно оценить как общую стоимость здания, равную 1. Таким образом, кривые несущей способности могут быть построены по трем точкам, при этом каждой точке соответствует свое значение финансового ущерба (рис. 5). Нанося на эти кривые значения целевых горизонтальных перемещений верха здания, полученных при расчете на заданные группы воздействий, интерполяцией определяют соответствующие финансовые потери от каждого из этих воздействий для всех вариантов сейсмостойкости (см. рис. 5, а–д).

Е. Расчет экономического эффекта и анализ полученных результатов

На основании данных по финансовому ущербу от каждого воздействия для всех вариантов усиления каркаса здания рассчитывается экономический эффект E по формуле (1). При расчете $f(k, N)$ переменная d , характеризующая прибыль, принимается равной 0,1, а параметр, определяющий снижение стоимости со временем, $d^* = 0,03$.

Значения E вычисляются для каждого типа здания в семи точках, характеризующих определенный временной этап жизненного цикла здания. Результаты вычислений представлены в виде графиков зависимости «экономический эффект E — жизненный цикл здания N » (рис. 6).

Согласно представленным данным наиболее оптимальным с точки зрения экономических затрат на всех этапах является проект S_{HDRI} предусматривающий применение резино-металлических сейсмоизоляторов. Однако добиться снижения собственной частоты для рассмотренной системы ниже значения 0,5 Гц с их

¹² Финансовый ущерб приводится в долях от стоимости всего здания.

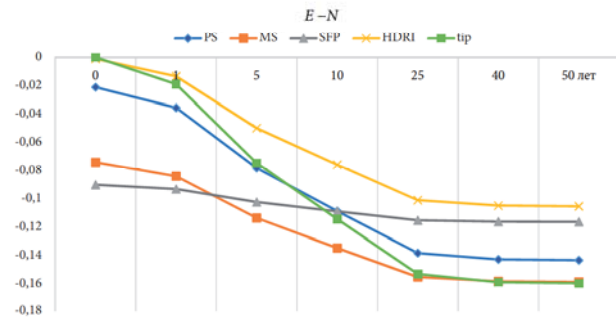


Рис. 6. Графики зависимости «экономический эффект E — жизненный цикл здания N » для различных вариантов сейсмостойкости каркаса

помощью не удастся ввиду того, что изоляторы такого типа при уменьшении горизонтальной жесткости теряют способность воспринимать требуемую вертикальную статическую нагрузку. Также в основе их применения лежит допущение о нулевых углах закручивания в периферийных точках в основании защищаемого объекта.

Применение слайдеров трения для рассматриваемого сооружения позволяет понизить собственную частоту изолированной системы до 0,4 Гц и приводит к значительному уменьшению уровня воздействий с низким преобладающим периодом. Например, пик спектрального ускорения 3-й группы воздействий снижается почти в пять раз (см. рис. 1, а и 2), а горизонтальное перемещение верха здания — почти в два раза (см. рис. 5, а, д). Однако при наличии в исходном воздействии низкочастотных гармоник, переносящих значительную часть его энергии и близких по спектральному составу к частоте сейсмоизолированной системы, применение низкочастотной сейсмоизоляции и слайдеров трения не только не приведет к уменьшению воздействия на сооружение (рис. 5, а, д, 1-я группа воздействий), но и может серьезно усугубить его влияние.

К недостатку слайдеров трения можно отнести их высокую стоимость по сравнению с резинометаллическими сейсмоизоляторами. По данным рис. 6 для проведения антисейсмических мероприятий с использованием слайдеров требуются самые крупные стартовые инвестиции в строительство. Тем не менее, высокая степень защиты объекта с помощью этих устройств максимально снизит расходы на ремонтные и вос-

становительные работы после землетрясений или вовсе исключит таковые.

Проведенный в данной статье численный анализ позволил сравнить на примере конкретного здания самое большое число проектов по его сейсмоусилению по сравнению с работами [5, 6] и показал, что целесообразно применять ССИ для повышения сейсмостойкости сооружения и минимизации затрат на ремонт в течение жизненного цикла объекта. При этом рассматриваемые резинометаллические сейсмоизоляторы в условиях выбранных групп воздействий оказываются наиболее эффективными на всех оцениваемых этапах эксплуатации, несмотря на то что лучше всего снижают уровень воздействий на сооружение не они, а слайдеры трения маятникового типа. Таким образом, именно стоимость, а не механические характеристики рассматриваемых ССИ оказывается основным параметром, влияющим на экономический эффект, получаемый при эксплуатации предприятия на протяжении его жизненного цикла.

Заключение

1. Приведена методика решения задачи оптимизации проектов сейсмоизолированных сооружений, определены основные варьируемые параметры, влияющие на целевую функцию оптимизационной задачи.

2. Проанализирован отклик сооружений с разными ССИ на воздействия разного спектрального состава, определены условия, при которых уровень исходного воздействия снижается или возрастает.

3. Составлена программа, позволяющая строить спектры реакций с учетом влияния ССИ и выявлять для заданной ее частотной характеристики наиболее опасные воздействия с точки зрения пиковых значений спектральных ускорений.

4. На примере конкретного здания производственного назначения по предлагаемой методике проведен анализ убытков во времени, связанных с наступлением различного ущерба вследствие определенных сейсмических воздействий.

Библиографический список

1. Уздин А. М., Елизаров С. В., Белаиш Т. А. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и соору-

жений. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. 501 с.

2. Lagaros N. D. Life-cycle cost analysis of construction practices // Bulletin of Earthquake Engineering. 2007. № 5. Pp. 425–442.

3. Lagaros N. D., Fragiadakis M. Evaluation of ASCE-41, ATC-40 and N2 static pushover methods based on optimally designed buildings // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2011. № 31. Pp. 77–90.

4. Кейлис-Борок В. И., Нерсесов И. А., Яглом А. М. Методы оценки экономического эффекта сейсмостойкого строительства. М.: АН СССР, 1962. 46 с.

5. Ватин Н. И., Иванов А. Ю., Рутман Ю. Л., Черногорский С. А. Оптимизация конструкций сейсмостойких сооружений по экономическому критерию // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 8 (76). С. 77–93.

6. Иванов А. Ю., Черногорский С. А., Власов М. П. Оптимизация конструктивных решений сейсмостойкого проектирования по экономическому критерию с учетом применения системы сейсмоизоляции // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 4 (79). (В печати.)

7. Рутман Ю. Л. Маятниковые сейсмоизолирующие опоры. Конструкция, расчет, эксперимент // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 1. С. 31–36.

8. Соснин А. В. Об особенностях методологии нелинейного статического анализа и его согласованности с базовой нормативной методикой расчета зданий и сооружений на действие сейсмических сил // Вестник ЮУрГУ. Сер: «Строительство и архитектура». 2016. № 1 (16). С. 12–19.

9. Krawinkler H., Seneviranta G. D. P. K. Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation // Engineering Structures. 1998. No. 20 (4). Pp. 452–464.

10. Kilar V., Rilar V., Fajfar P. Simplified push-over analysis of building structures // 11th World Conference of Earthquake Engineering. 1996. No. 11. 8 p.

11. Chopra A. K., Goel R. K. A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demand of buildings // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2002. No. 31. Pp. 561–582.

12. Немчинов Ю. И., Марьенков Н. Г., Хавкин А. К., Бабик К. Н. Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости (с учетом рекомендаций Еврокода 8, международных стандартов и требований ДБН). Киев: ГП ГНИИСК, 2012. 53 с.

13. Чхиквадзе К. Т., Цискрели Ц. Г., Члаидзе Н. Ш., Каджая Л. Д. Применение нелинейного статического (Pushover) метода для оценки поведения конструкций при сейсмическом воздействии // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 2. С. 48–52.

14. Уздин А. М., Нестерова О. П., Прокопович С. В., Долгая А. А., Чанг Юань, Гуань Юхай, Ван Хайбинь.

Моделирование сейсмических воздействий для динамического расчета зданий и сооружений // Научный журнал «Содружество». 2017. № 20. С. 59–66.

References

1. Uzdin A. M., Elizarov S. V., Belash T. A. *Seysmostoykie konstruktsii transportnykh zdaniy i sooruzheniy* [Earthquake resistant designs of transport buildings and structures]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte. Publ., 2012, 501 p.
2. Lagaros N. D. Life-cycle cost analysis of construction practices. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2007, no. 5, pp. 425–442.
3. Lagaros N. D., Fragiadakis M. Evaluation of ASCE-41, ATC-40 and N2 static pushover methods based on optimally designed buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, no. 31, pp. 77–90.
4. Keylis-Borok V. I., Nersesov I. A., Yaglom A. M. *Metody otsenki ehkonomicheskogo ehffekta seysmostoykogo stroitel'stva* [Methods of assessing the economic effect of aseismic construction]. Moscow, AN SSSR Publ., 1962, 46 p.
5. Vatin N. I., Ivanov A. Yu., Rutman Yu. L., Chernogorskiy S. A. *Optimizatsiya konstruktsiy seysmostoykikh sooruzheniy po ehkonomicheskomu kriteriyu* [Optimization of aseismic construction designs by economic criterion]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering-Construction Journal*, 2017, no. 8 (76), pp. 77–93.
6. Ivanov A. Yu., Chernogorskiy S. A., Vlasov M. P. *Optimizatsiya konstruktivnykh resheniy seysmostoykogo proektirovaniya po ehkonomicheskomu kriteriyu s uchetom primeneniya sistemy seismoizolyatsii* [Optimization of constructive solutions of seismic design by economic criterion taking into account the use of the seismic isolation system]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering-Construction Journal*, 2018, no. 4 (79), (in print).
7. Rutman Yu. L. *Mayatnikovye seismoizoliruyushchie opory. Konstruktsiya, raschet, ehksperiment* [Pendulum seismic isolation bearings. Design, analysis, experiment]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering-Construction Journal*, 2012, no. 1, pp. 31–36.
8. Sosnin A. V. *Ob osobennostyakh metodologii nelineynogo staticheskogo analiza i ego soglasovannosti s bazovoy normativnoy metodikoy rascheta zdaniy i sooruzheniy na deystvie seysmicheskikh sil* [About the features of methodology of the nonlinear static analysis and its coherence with the basic standard method of calculating buildings and structures subjected to seismic forces]. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Stroitel'stvo i arkhitektura» – Bulletin of YuUrSU. Construction and Architecture series*, 2016, no. 1 (16), pp. 12–19.
9. Krawinkler H., Seneviranta G. D. P. K. Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation. *Engineering Structures*, 1998, no. 20 (4), pp. 452–464.
10. Kilar V., Rilar V., Fajfar P. Simplified push-over analysis of building structures. *Proc. of the 11th World Conference of Earthquake Engineering*, 1996, no. 11, 8 p.
11. Chopra A. K., Goel R. K. A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demand of buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002, no. 31, pp. 561–582.
12. Nemchinov Yu. I., Mar'ënkov N. G., Khavkin A. K., Babik K. N. *Proektirovanie zdaniy s zadannym urovnem obespecheniya seysmostoykosti (s uchetom rekomendatsiy Evrokoda 8, mezhdunarodnykh standartov i trebovaniy DBN)* [Design of buildings with the set level of ensuring seismic stability (taking into account Eurocode 8 recommendations, the international standards and requirements of DBN)]. Kiev, GP GNIISK Publ., 2012, 53 p.
13. Chkhikvadze K. T., Tsiskreli Ts. G., Chlaidze N. Sh., Kadzhaya L. D. *Primenenie nelineynogo staticheskogo (Pushover) metoda dlya otsenki povedeniya konstruktsiy pri seysmicheskoy vozdeystvii* [Application of the nonlinear static (Pushover) method for assessing the behavior of designs at seismic influence]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy – Construction mechanics and calculation of constructions*, 2010, no. 2, pp. 48–52.
14. Uzdin A. M., et al. *Modelirovanie seysmicheskikh vozdeystviy dlya dinamicheskogo rascheta zdaniy i sooruzheniy* [Modeling of seismic influences for dynamic calculation of buildings and constructions]. *Nauchnyy zhurnal «Sodruzhestvo» – Scientific journal “Cooperation”*, 2017, no. 20, pp. 59–66.