

УДК 69.07

К. Н. Макаров, Е. Е. Юрченко, Ю. Р. Погорельцев, В. Е. Юрченко, А. Н. Волков

Сочинский государственный университет

КИНЕМАТИЧЕСКИ ПОДОБНЫЕ ЗДАНИЯМ МОДЕЛИ ИЗ ЭЛЕКТРОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ

Кинематически подобные малоразмерные модели зданий испытаны на лабораторном стенде, способном возбуждать и регистрировать гармонические колебания благодаря электроупругим свойствам материалов моделей. Критерии подобия определяются по собственным частотам крупномасштабного объекта в программном комплексе. Получены уравнения воздействий и реакций при физическом моделировании, необходимые для анализа динамических характеристик зданий. Результаты позволяют выбрать методы реновации.

Ключевые слова: кинематическое подобие, моделирование, резонансная частота, ассиметричные здания, электроупругие материалы, динамические воздействия.

Цель — создать алгоритм кинематически подобного моделирования ассиметричных зданий, позволяющий предотвращать резонансные явления без изменения объемно-планировочных решений при реновации.

Задачи:

1. Исследовать особенности реакций ассиметричных зданий при динамических воздействиях.
2. Создать в программном комплексе математическую полномасштабную модель здания-представителя, воздействия на которую возможно воспроизвести в процессе физического моделирования. Получить значения собственных частот при гармонической нагрузке от собственного веса конструкций.
3. Использовать методы кинематического подобия для определения резонансных частот при конструировании физической малоразмерной модели из пластика ABS, обладающего электроупругими свойствами.
4. Произвести испытания при гармоническом синусоидальном воздействии на малоразмерную модель здания-представителя на лабораторном стенде в спектре частот, близких к резонансной.
5. Составить уравнения нагрузок и реакций для анализа полученных в процессе испытаний величин, служащих основанием для выбора метода реновации.

Актуальность исследования

Объемно-планировочные решения типовых общественных зданий застройки середины — конца прошлого столетия допускали обеспечение непрерывности связей разнофункциональных групп без специальных конструктивных мероприятий. В рассматриваемых объектах центр жесткости образует эксцентриситет относительно центра масс от 2 до 9 м при габаритных размерах в плане порядка 50...60 м. Подобные планировки оправданы в обычных условиях строительства и эксплуатации. Повышение фоновой сейсмичности территорий России за последние десятилетия на 1—2 балла, возросшие вибрационные транспортные нагрузки осложняют эксплуатацию объектов из-за

динамических составляющих. Решение о разделении таких зданий деформационными швами эффективно с конструктивной точки зрения, но приводит к потере имеющихся функциональных связей с образованием новых. В результате теряются полезные площади. В процессе исследования найдены конструктивные методы, позволяющие избегать резонансных явлений повышением жесткости наружного контура. Таким образом, в рамках капитального ремонта дефицит сейсмостойкости ликвидируется заменой витражей на монолитные стены без изменения объемно-планировочных решений.

Особенности реакций асимметричных зданий при динамических воздействиях

Исследования [1—4] показывают высокую чувствительность сейсмического отклика структур неправильной формы в плане к продолжительности движения грунта основания. Реакция характеризуется крутильно-поступательными перемещениями в узлах каркасов и при сильных землетрясениях приводит к повреждениям. В работах [5, 6] предложено классифицировать крутильную форму колебаний каркаса по характеру мгновенного центра вращения. Значения собственных частот по формам колебания близки по значениям, что означает большой вклад кручения в общую реакцию здания. Значения собственных частот, по мнению авторов [3—8], зависят от жесткости грунта и для первой формы колебаний отличаются до 44 %, для второй формы колебаний — до 50 % при бесконечно жестких и максимально гибких основаниях. В третьей форме колебаний — кручении — значения собственных частот от вида грунта основания отличаются не более чем на 6 %.

Применение комплексного моделирования в динамике сооружений оправдано временной составляющей процессов нагружения, что эффективно воспроизводится и корректируется при создании математических моделей по физическим и наоборот. Представленное в работе [5] исследование каркасной модели в масштабе 1 : 15 проводилось по деформированной схеме, где колонна первого этажа заменена домкратом. Колебания грунта возбуждались качающимся стендом. Математическое моделирование отслеживалось по собственным частотам рядом форм в комплексе Ansys LS-DYNA.

Математическая полномасштабная модель в программном комплексе ЛИРА

Математическая модель построена для одноэтажного здания общественного центра туристической базы, имеющего сложную форму с габаритными размерами в плане 54...64 м, высотой этажа 3,6 м. Значения собственных частот $f_{зд} = 2,5...4,5$ Гц. Первая форма колебаний представлена на рис. 1. Полученный диапазон значений собственных частот при этом расчете незначительно отличается от значений собственных частот при расчете на 8-балльное сейсмическое воздействие с учетом эксплуатационных нагрузок и грунта основания.

Конструктивное решение здания — рамный каркас из железобетона с шагом колонн 3,6 и 6,0 м. Ширина сечения колонн и ригелей 0,4 м, высота сечения 0,4 м. Часть пролетов перекрыта монолитными железобетонными плитами толщиной 0,2 м. Фундаменты под колонны столбчатые, не связаны между собой фундаментными балками.

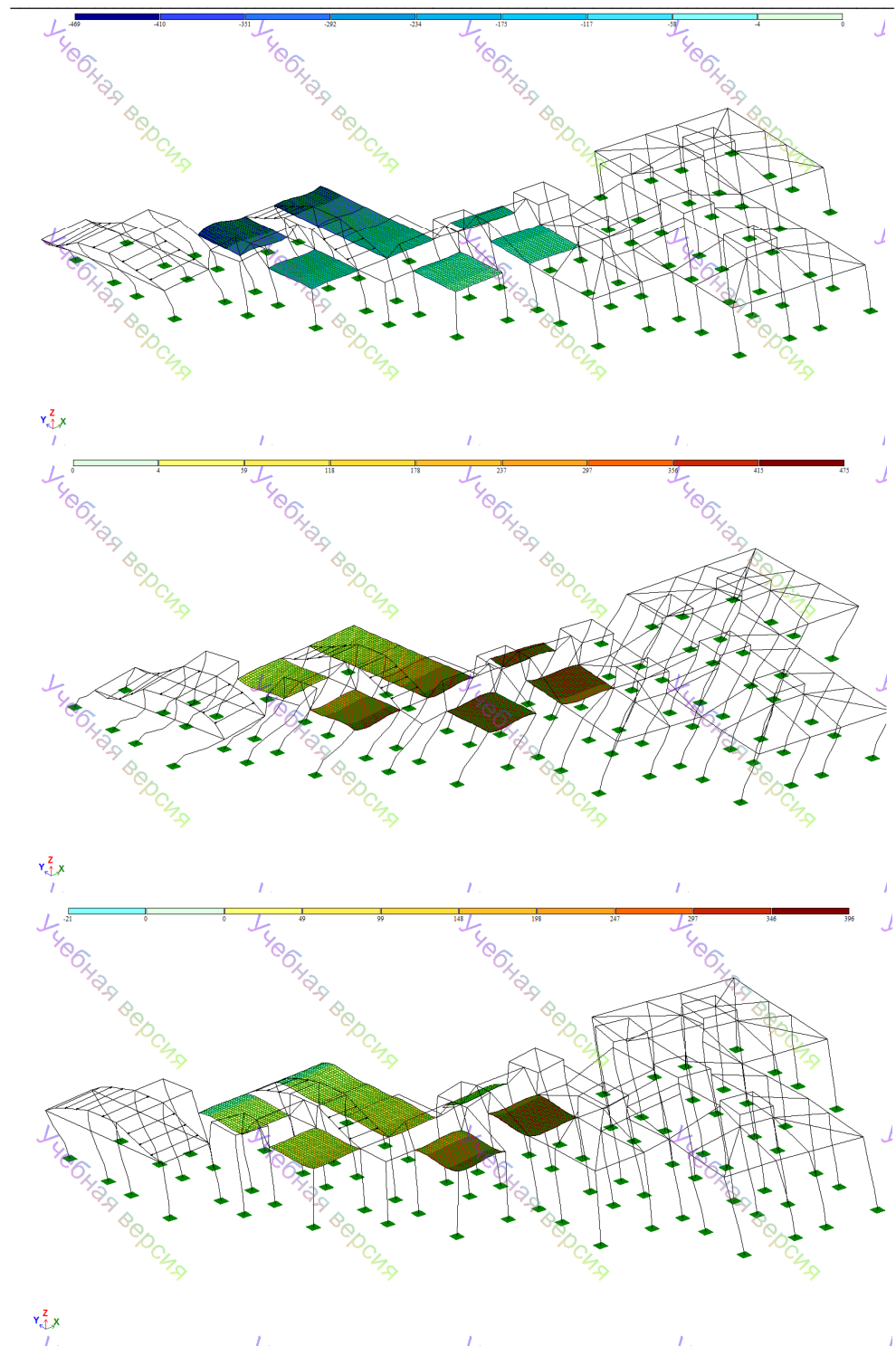


Рис. 1. Формы колебаний каркаса (вдоль X), полученные в ПК ЛИРА при гармоническом воздействии собственного веса

Методы кинематического подобия при конструировании малоразмерной модели

Для определения резонансных частот при конструировании физической малоразмерной модели применялся пластик ABS, обладающий электроупругими свойствами (рис. 2). Согласно [9, 10], при физическом моделировании вращательных движений имеем критерий подобия:

$$C_{\omega} C_l \sqrt{\frac{C_p}{C_E}} = 1,$$

где C_{ω} — масштаб частоты вращения; C_l — масштаб геометрический, $M 1 : 200$; $C_l = 0,005$; C_p — масштаб плотностей:

$$C_p = \frac{\rho_{бет}}{\rho_{ABS}} = 2,12,$$

где $\rho_{бет} = 2300 \text{ кг/м}^3$ — плотность железобетона; $\rho_{ABS} = 1080 \text{ кг/м}^3$ — плотность ABS; C_E — масштаб модулей упругости, $C_E = E_{бет} / E_{ABS} = 0,0126$; $E_{бет} = 27\,000 \text{ МПа}$ — модуль деформации бетона; $E_{ABS} = 2\,140\,000 \text{ МПа}$ — модуль упругости пластика ABS.

Тогда

$$C_{\omega} = \left(\frac{1}{C_l}\right) \sqrt{\left(\frac{C_E}{C_p}\right)} = \left(\frac{1}{0,005}\right) \sqrt{\left(\frac{0,0126}{2,12}\right)} = 15,4.$$

При моделировании в линейном масштабе $1 : 200$ из пластика ABS получим резонансные частоты $f_{\text{мод}} = f_{\text{зд}} C_{\omega}$ в диапазоне $f_{\text{мод}} = 38,5 \dots 61,6 \text{ Гц}$.



Рис. 2. Каркасная модель (вид сверху) из пластика ABS с парой электродов

Эксперимент проводится на частотах 6 и 20 Гц, а также близких к резонансным 40 и 80 Гц. Для движения диффузора и модели получены уравнения движения. Кроме того, измерения реакций модели проводились и для далеких от резонансных: 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 Гц.

Лабораторный стенд для испытания малоразмерных моделей из электроупругих материалов

Лабораторный стенд для резонансных частот, представленный в [11], состоит из генератора синусоидальных волн, микрофонного усилителя низких частот, компьютера-осциллографа, двух электродов (рис. 3). Сигналы, поступающие с них по левому и правому каналам, обрабатываются программой SpectraLab с амплитудой измерений от единиц микровольт до десятков милливольт. Модель испытывалась как без грунта, так и в емкости с песком, перпендикулярно которой установлен диффузор марки 4ГД-35. По данным паспорта этой марки диффузора, его максимальное перемещение при поршневом движении составляет 3,35 мм на его резонансных частотах 50...75 Гц. Пара электродов с разных сторон модели (см. рис. 3) фиксировала ее реакции по левому и правому каналам в mV в программе SpectraLab. Таким образом, в процессе колебаний измерялись механические деформации, полученные за счет изменения переменного электрического поля [11—16]. Движение диффузора аппроксимировалось на частотах 6...80 Гц. В полученном уравнении (рис. 4): f — частота; y — перемещение диффузора вниз-вверх, мм; $y(f) = 0,0576(f) - 1,314$.



Рис. 3. Лабораторный стенд для испытаний малоразмерных моделей

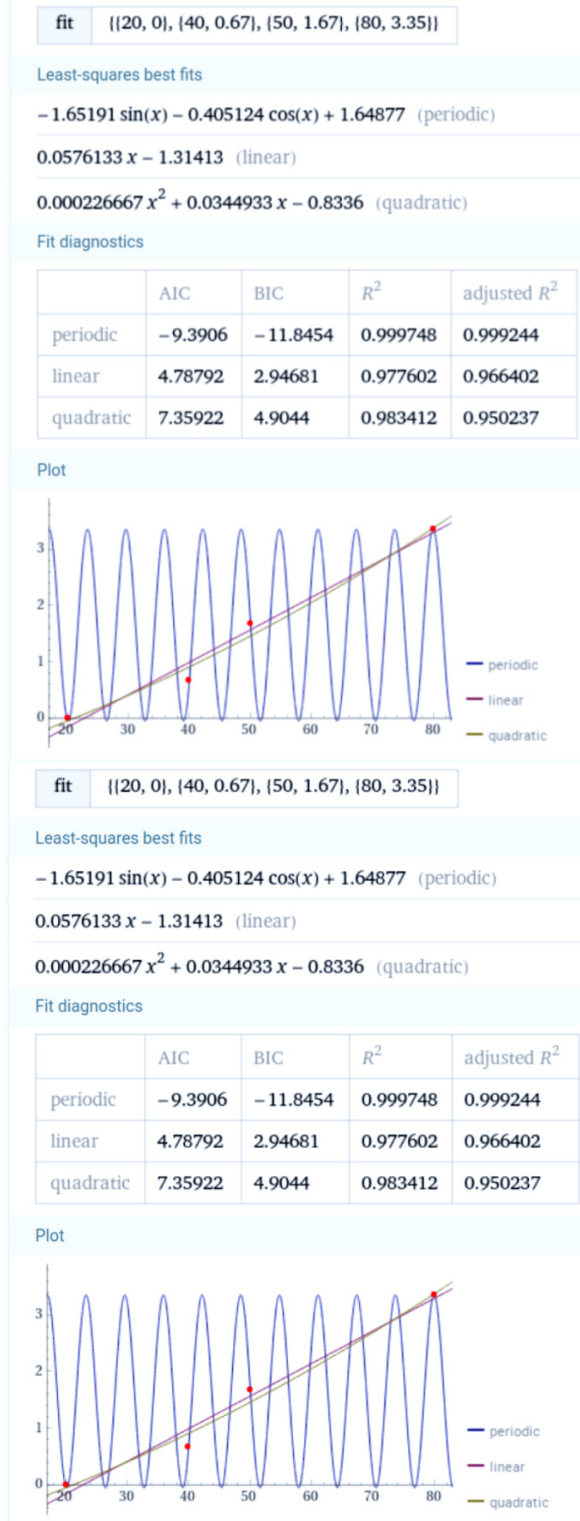


Рис. 4. Аппроксимация движения диффузора
 вниз-вверх $y(f) = 0,0576(f) - 1,314$

Акустическая система 4ГД-35 в лабораторном стенде имеет номинальную акустическую мощность 4 В. Частоты, на которых производились измерения, согласно классификации¹ относятся к низким. Диффузор создавал акустическую волну, имеющую синусоидальный характер вдоль линии распространения, перпендикулярной фронту. Максимальный ход диффузора ограничен длиной звуковой катушки, ее масса 9 г, характеристическая чувствительность 92 дБ. Звуковое давление в таком поршневом режиме происходит от частоты резонанса до 1000 Гц. Акустическая система, используемая в лабораторном стенде, представляет собой открытый ящик, такой тип акустического оформления, при котором задняя поверхность диффузора не изолирована от внешней среды. На рис. 5 представлена зависимость падения звукового давления, дБ, от числа слоев ткани на задней поверхности². Акустическая система на рис. 5 соответствует варианту 0, так как ткани на задней стенке нет. Как видно на рис. 5, значение импеданса на 70 Гц составляет 18,5 Ом.

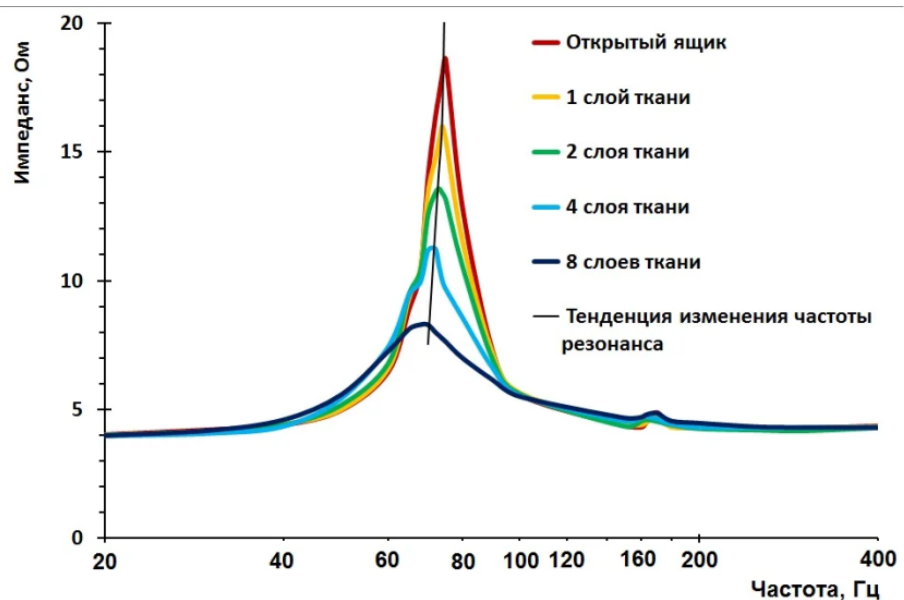


Рис. 5. Акустический импеданс на резонансной частоте 4ГД-35³

Уравнения нагрузок и реакций малоразмерной модели

Для получения уравнения движения моделей по результатам произведенных измерений в SpectraLab составлен алгоритм. Преобразования mV в dB требуют по алгоритму выполнить несколько шагов.

Шаг 1. Заполняем поле в калькуляторе dBm , в табл. 1 это столбец 1. Заполняем значениями напряжений DC в mV — столбец 2 табл. 1, т. е. значениями реакций моделей в процессе измерений в диапазоне частот данного

¹ URL: https://zen.yandex.ru/media/minus_funt/369-panel-akusticheskogo-soprotivleniia-pervyefenomeny-607c39953d51355a0031de65.

² Там же.

³ Там же.

эксперимента. Значения dBm вычислены при определенном сопротивлении микрофонного усилителя $50\,000\text{ Ом}^4$. Уравнение:

$$dBm = 10 \log\left(\frac{P_1}{0,001}\right),$$

где dBm — логарифмическая мера усиления.

Шаг 2. Значения в табл. 1, с 3-го по 10-й столбец, вычислены по калькулятору мощности и сопротивления в напряжение и ток⁵.

Таблица 1

Характеристики по реакциям модели⁶

dBm	Напряжение DC, mV	Мощность, W	mV_{RMS}	dBV	dBu	dBW	A	$dB(A)$	dB (mA)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-88,0	0,282	$1,58e^{-12}$	0,281	-71,0	-68,0	-118,0	$5,63e^{-8}$	-164,0	-104,9
-86,0	0,354	$2,51e^{-12}$	0,354	-69,0	-66,0	-116,0	$3,16e^{-8}$	-149,0	-89,9
-79,0	0,793	$1,26e^{-11}$	0,793	-62,0	-59,8	-109,0	$1,58e^{-8}$	-155,0	-95,9
-74,0	1,41	$3,98e^{-11}$	1,41	-57,0	-54,8	-104,0	$2,82e^{-8}$	-150,0	-90,9
-73,0	1,58	$5,01e^{-11}$	1,58	-56,0	-53,8	-103,0	$3,16e^{-8}$	-149,0	-89,9
-72,0	1,78	$3,31e^{-11}$	1,78	-55,0	-52,0	-102,0	$3,55e^{-8}$	-148,0	-88,9
-71,0	1,99	$7,94e^{-11}$	1,99	-54,0	-51,8	-101,0	$3,98e^{-8}$	-147,0	-87,9
-70,0	2,24	$1,00e^{-10}$	2,23	-53,0	-50,8	-100,0	$4,47e^{-8}$	-146,0	-86,0
-69,0	2,51	$1,26e^{-10}$	2,50	-52,0	-49,8	-99,0	$5,01e^{-8}$	-145,0	-85,9
-68,0	2,82	$1,58e^{-10}$	2,82	-51,0	-48,8	-98,0	$5,63e^{-8}$	-144,9	-84,9

Шаг 3. Те же величины, что в табл. 1, определяем для диффузора, как при паспортном значении сопротивления 4 Ом , так и по измеренному — 20 Ом^7 . Величины табл. 2 вычислены с использованием ресурсов⁸ при паспортном сопротивлении диффузора и при полученном при измерениях в 20 Ом .

Шаг 4. Значения A из столбца 8 табл. 1 делим на значения $A_{\text{диф}} = 0,45$ табл. 2, получаем «разы» $A / A_{\text{диф}}$, подставляем полученный результат⁹, определяем значения в dB , получаем табл. 3.

Таблица 2

⁴ URL: <https://fantasylab.ru/technology-r-d/how-to/db-converter.html>.

⁵ URL: <https://reference-audio-analyzer.pro/w-r-v.php#gsc.tab=0>.

⁶ URL: <https://fantasylab.ru/technology-r-d/how-to/db-converter.html>.

URL: <https://reference-audio-analyzer.pro/w-r-v.php#gsc.tab=0>.

⁷ URL: https://zen.yandex.ru/media/minus_funt/369-panel-akusticheskogo-soprotivleniia-pervye-fenomeny-607c39953d51355a0031de65.

⁸ URL: <https://fantasylab.ru/technology-r-d/how-to/db-converter.html>.

URL: <https://reference-audio-analyzer.pro/w-r-v.php#gsc.tab=0>.

⁹ Там же.

Характеристики по диффузору

V_{RMS}	dBV	dBu	V_{PP}	W	dBW	dBm	$A_{диф}$	$dB(A)$	$dB(mA)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	12,04	14,2	11,31	4	6,02	36,02	1,0	0	60
8,94	19,0	21,2	25,29	4	6,02	36,02	0,45	-6,98	53,0

Таблица 3

Вычисление значений dB

dBm	dB	dBm	dB	dBm	dB
1	2	1	2	1	2
-88,0	-136,0	-74,0	-144,0	-71,0	-141,0
-86,0	-142,0	-73,0	-143,0	-70,0	-140,0
-79,0	-149,0	-72,0	-142,0	-69,0	-139,0

Шаг 5. Преобразование реакций моделей mV в dB представлено в табл. 4 с интерполяцией величин из табл. 1, столбца 1 и табл. 3, столбца 2.

Таблица 4

Результаты измерений реакций модели по левому и правому каналам

Частота, Гц	Измеренные реакции модели, mV		Вычисленные по алгоритму реакции модели, dB	
	Левый канал	Правый канал	Левый канал	Правый канал
2	3	4	5	6
6	0,957	0,442	-149	-152
20	1,583	1,472	-143	-142
40	2,080	1,914	-140	-140
80	2,577	2,319	-139	-140
150	2,312	2,221	-139	-140
200	2,165	2,182	-140	-140

Шаг 6. Вычисление смещений моделей в процессе испытаний. Давление диффузором 4ГД-35м вверх составляет 6,32...605 Па (110...149 dB). Давление моделей вниз — 0,004 и 0,005 Па. Модель и емкость с песком работают подобно диоду, пропускающему ток только в одном направлении, в те моменты, когда к нему приложено прямое смещение, что соответствует положительным полупериодам ($U_{вх} > 0$) входного сигнала. Когда к диоду приложено обратное смещение, (отрицательные полупериоды), он закрыт, а по цепи протекает только незначительный обратный ток. В результате сигнал на нагрузке будет выглядеть так, как показано на рис. 6.

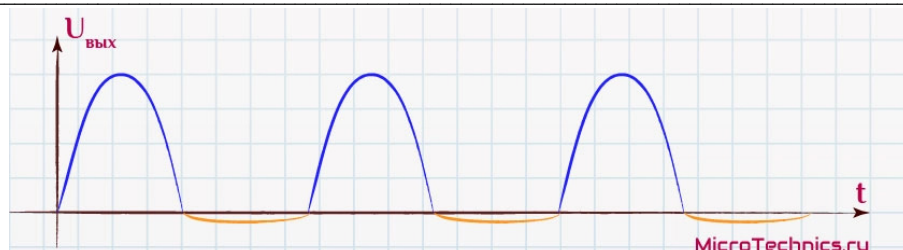


Рис. 6. Диод, пропускающий ток только в одном направлении¹⁰

Уравнения движения диффузора и модели в емкости с песком во времени составлены с учетом меры скорости вращения — угловой частоты ω . Скаляр ω относится к скорости изменения фазы синусоидальной формы волны или к скорости изменения аргумента синусоидальной функции.

Диффузор осуществляет движение вверх на частотах 6, 20, 40 и 80 Гц с ускорением за время $t_1 = T / 4$ с, по уравнению $y(f) = 0,0576(f) - 1,314$. Перемещение $s_{\text{диф}}$, м, скорость $v_{\text{диф}}$, м/с, ускорение $a_{\text{диф}}$, м/с², диффузора вычисляются в момент времени t_1 . Сила действия диффузора $F_{\text{диф}}$, Н, зависит от ускорения $a_{\text{диф}}$ и массы катушки $m_{\text{диф}} = 0,009$ кг. Давление диффузора вверх $P_{\text{диф}}$, Па, определяется силой $F_{\text{диф}}$ и площадью диффузора $S_{\text{мод}} = 0,000314$ м², значение выражается и в dB.

Движение модели определяется под действием силы тяжести $F_{\text{мод}}$, Н, зависит от массы модели $m_{\text{мод}} = 0,15$ кг. Скорость движения модели $v_{\text{мод}}$, м/с, определяется от g за время t_1 . Давление модели вниз $P_{\text{мод}}$, Па, зависит от ее площади опирания $S_{\text{мод}}$, м². Движение емкости с песком осуществляется под действием силы тяжести $F_{\text{пес}}$, Н, и зависит от массы $m_{\text{пес}} = 2,96$ кг. Скорость движения $v_{\text{пес}}$, м/с, определяется от g за время t_1 . Давление емкости с песком вниз $P_{\text{пес}}$, Па, зависит от площади опирания $S_{\text{пес}}$, м². На всех генерируемых частотах давление вверх диффузора превышало давление вниз модели и емкости с песком.

Уравнения движения модели за время t_1 с учетом угловой частоты ω получены аппроксимацией¹¹. Значения максимальной амплитуды $s_{\text{диф}}$ в этих уравнениях получены из уравнения $y(f) = 0,0576(f) - 1,314$ при исследуемой частоте f . Уравнение движения диффузора с учетом угловой частоты $x(t) = s_{\text{диф}} \sin \omega \cdot t$. По аппроксимации [17] составляется уравнение движения модели или модели в емкости с песком в момент времени t_1 при скорости $v_{\text{мод}}$ при максимальной амплитуде $s_{\text{пес}} = s_{\text{мод}}$, так как скорости и время их движения одинаковы по величине и направлению (табл. 5, 6).

Уравнения движения объектов на 80 Гц:

- диффузора $x(t) = 0,00335 \sin 160 \pi \cdot t$ при $t = t_1$;
- модели при $t = t_1$ по левому каналу:

$$x(t) = 491,52 \cdot t^3 - 10,3167 \cdot t^2 + 0,05268 \cdot t + 9,74 \cdot 10^{-6};$$

по правому каналу модели со сдвигом фаз при $t = t_1 + 0,0003$:

¹⁰ URL: <https://microtechnics.ru/odnopoluperiodnyj-vypryamitel-toka-shema-i-princip-raboty>.

¹¹ URL: http://www.wolframalpha-ru.com/2011/10/wolframalpha_18.html.

$$x(t) = 491,52 \cdot t^3 - 9,8743 \cdot t^2 + 0,04663 \cdot t + 5,14 \cdot 10^{-6}.$$

Уравнения движения диффузора и модели представлены в табл. 7.

Таблица 5

Вычисленные характеристики движения объектов

Частота, движения диффузора, Гц	Время движения диффузора вверх t_1 , с	Объект	Смещение объекта x , м	Скорость объекта v , м/с	Ускорение объекта a , м/с ²
6	0,042	Диффузор	$-9,6e^{-4}$	$4,5e^{-4}$	1,36
		Модель	$9,2e^{-4}$	$4,0e^{-3}$	-0,52
20	0,0125	Диффузор	$-1,6e^{-4}$	0	2,55
		Модель	$8,2e^{-5}$	$5,5e^{-4}$	-0,58
40	0,062	Диффузор	$9,9e^{-4}$	0	-62,4
		Модель в емкости с песком	$1,0e^{-4}$	$8,6e^{-4}$	-2,38

Таблица 6

Уравнения движения объектов на 80 Гц

Объект	Смещение объекта x , м	Скорость объекта v , м/с	Ускорение объекта a , м/с ²
Диффузор	$3,34e^{-3}$	$0,2e^{-2}$	-845,5
Модель в емкости с песком	$5,46e^{-5}$	$2,6e^{-3}$	-11,417
	$6,91e^{-5}$	$-3,7e^{-3}$	-10,53

Таблица 7

Уравнения движения диффузора и модели

Частота, Гц	Время движения диффузора t_1 , с	Объект	Давление диффузора $P_{диф}$, Па	Давление модели $P_{мод}$, Па	Реакция модели по каналам (лк), (пк), mV
6	0,042	Диффузор	15,7	—	—
		Модель	—	11,7	0,957(лк), 0,442(пк)
20	0,0125	Диффузор	28,7	—	—
		Модель	—	11,7	1,583(лк), 1,472(пк)
40	0,062	Диффузор	732,5	—	—
		Модель	—	256,7	2,080(лк), 1,910(пк)
80	0,031	Диффузор	9808,0	—	—
		Модель	—	256,7	2,577(лк), 2,319(пк)

Сдвиг фаз при движении модели на резонансной частоте 80 Гц

Как видно из табл. 6, при измерениях по каналам осциллографа — левому и правому — реакции моделей в mV имеют разные значения. По осциллограмме на резонансной частоте 80 Гц разница во времени амплитуд левого и

правого каналов составляет $3,0e^{-4}$ с. По уравнениям движения модели со сдвигом фаз полученная разница в перемещениях торцов модели составит $1,45e^{-2}$ мм, что для полномасштабного объекта составит 2,9 мм.

Метод реновации

Исследован метод реновации [17] с заменой в каркасном здании самонесущих каменных стен и витражей у наружных осей на монолитные железобетонные стены. В программном комплексе SolidWorks исследованы собственные частоты полномасштабной и малоразмерной (из пластика ABS, М 1 : 200) (рис. 7, табл. 8). Для калибровки создана физическая модель (см. рис. 3). Реакции представлены на рис. 8.

Таблица 8

Результаты определения собственных частот модели здания

Форма колебаний	Расчет в ПК ЛИРА		Расчет в SolidWorks
	Каркасная модель, М 1 : 1, на жестком основании, Гц	Каркасная модель, М 1 : 1, на суглинке, Гц	Модель с наружными стенами, М 1 : 1, на жестком основании, Гц
1	4,23	3,79	0,59
2	4,25	4,38	0,64
3	4,30	4,49	0,84

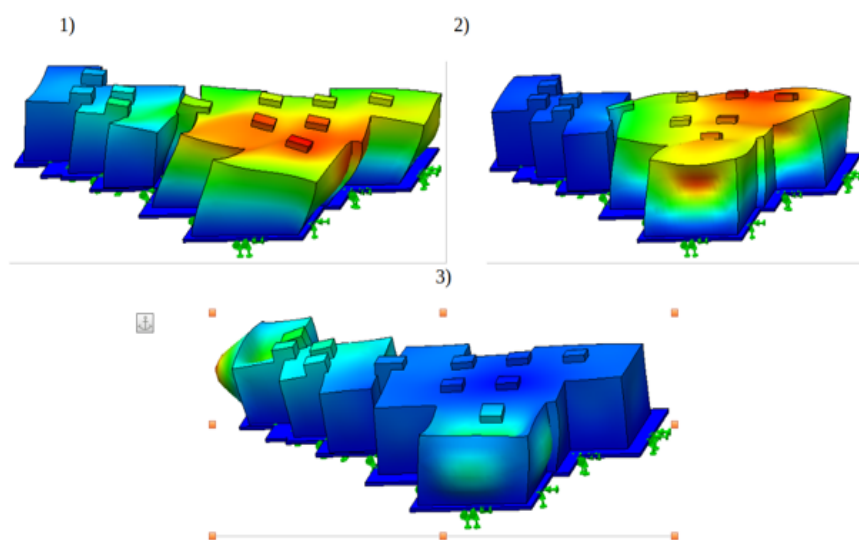


Рис. 7. Формы колебаний в SolidWorks

Анализируя данные табл. 8, заключаем, что частоты кручения (3-я форма колебаний) для каркасной модели и поступательного движения (1-я и 2-я формы колебаний) близки по значениям, следовательно, вклад реакции на кручение в общей реакции здания достаточно велик. В модели с наружными стенами из железобетона значения частот во всех формах ниже, кручение отсутствует. Таким образом, предлагаемый метод реновации с заменой наружных кирпичных или витражных стен на монолитные железобетонные для асимметричных зданий является эффективным.

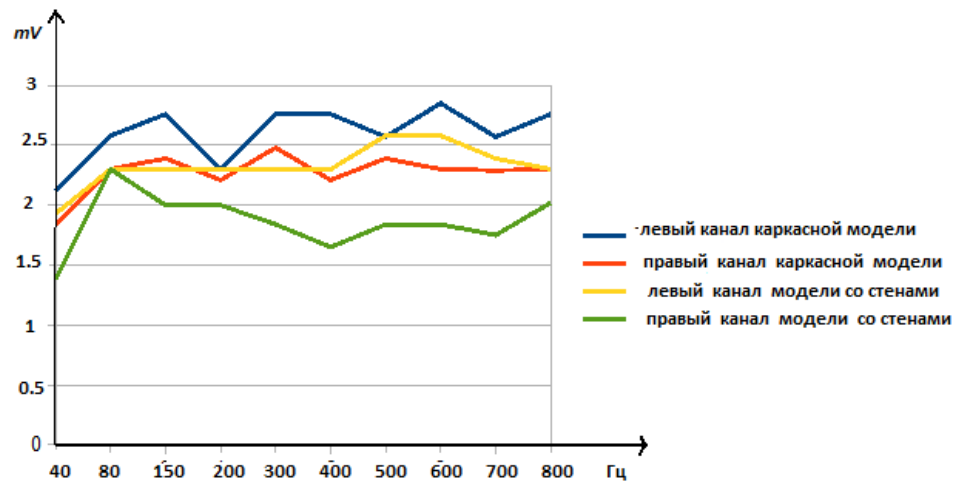


Рис. 8. Реакции каркасной и каркасной со стенами по наружным осям моделей, mV

Заклучение

1. Разработан метод испытаний малоразмерных физических моделей асимметричных зданий, кинематически подобных математическим полномасштабным. По значениям собственных частот установлен критерий подобия при вращении.

2. По измеренным реакциям моделей составлены уравнения движения, вычислены величины перемещений, скоростей и ускорений во времени.

3. По двум каналам измерений зафиксирована неодновременность амплитуд реакций по длине модели с задержкой на 0,0003 с на резонансной частоте, что свидетельствует о наличии вращательных форм колебаний.

4. Практически одинаковые значения собственных частот первых четырех форм колебания полномасштабной модели в программном комплексе подтверждают вращательный характер движения исследуемого асимметричного объекта.

5. Примененный при математическом моделировании в программном комплексе SolidWorks, метод реновации с заменой наружных витражей железобетонными стенами исключает вращение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pachla F., Kowalska-Koczwara A., Tatara T., Stypula K. The influence of vibration duration on the structure of irregular RC buildings // Bulletin of Earthquake Engineering. 2019. Vol. 17. Pp. 3119—3138. DOI: 10.1007/s10518-018-00546-4.
2. Belejo A., Barbosa A. B., Bento R. Influence of ground motion duration on damage index-based fragility assessment of a plan-asymmetric non-ductile reinforced concrete // Eng. Struct. 2017. Vol. 151. Pp. 682—703. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.08.042.
3. Bencaat J. Numerical and experimental prediction methods for assessment of induced vibrations in irregular buildings // Seismic behaviour and design of irregular and complex civil structures II, geotechnical, geological and earthquake engineering / Eds.: Z. Zembaty, M. de Stefano. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. Pp. 289—302. DOI: 10.1007/978-3-319-14246-3_26.
4. Köber D., Zamfirescu D. Seismic response trends of SDOF plan irregular structures. Simplified approach // Seismic behaviour and design of irregular and complex civil structures II, geotech-

nical, geological and earthquake engineering / Eds.: Z. Zembaty, M. de Stefano. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. Pp. 233—242. DOI: 10.1007/978-3-319-14246-3_21.

5. Lu Z., Chen X., Lu X., Yang Z. Shaking table test and numerical simulation of an RC frame-core tube structure for earthquake-induced collapse // Earthq. Eng. Struct. Dyn. 2016. Vol. 45. Pp. 1537—1556. DOI: 10.1002/eqe.2723.

6. Tatara T., Pachla F., Kubon P. Experimental and numerical analysis of an industrial RC tower // Bull. Earthq. Eng. 2017. Vol. 15. Pp. 2149—2171. DOI: 10.1007/s10518-016-0053-y.

7. Tabatabaei R. Torsional vibration of eccentric building systems // Recent Advances in Vibrations Analysis. 2011. Sept. DOI: 10.5772/21997.

8. Raheem S. E. A., Fooley M. Y. M., Omar M., Zaher A. K. A. Seismic pounding effects on the adjacent symmetric buildings with eccentric alignment // Earthquakes and Structures. 2019. Vol. 16. No. 6. Pp. 715—726. DOI: 10.12989/eas.2019.16.6.715.

9. Розенштейн М. М., Недоступ А. А. Механика орудий рыболовства. М.: Моркнига, 2011. 528 с.

10. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 440 с.

11. Makarov K. N., Yurchenko E. E., Biryukbaev E. K., Yurchenko V. E. A study on resonance characteristics of hydraulic structures and buildings conducted using small-size models // Vestnik MGSU (Monthly Journal on Construction and Architecture). 2021. Vol. 16. No. 11. Pp. 1452—1461. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1452-1461.

12. Minin I., Minin O. Mesoscale acoustical cylindrical superlens // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 155. P. 01029. DOI: 10.1051/mateconf/201815501029.

13. Yang W. D., Li Y. Sound absorption performance of natural fibers and their composites // Science China Technological Sciences. 2012. Vol. 55. Iss. 8. DOI: 10.1007/s11431-012-4943-1.

14. Bourell D. L. Perspectives on additive manufacturing // Annual Review of Materials Research. 2016. Vol. 46. Pp. 1—18. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070115-031606.

15. Rodrigues G. K., Da Silva M. M., De Oliveira L. P. R. Modular modeling approach for FDM printed structures and piezo disks for metamaterial design // Lat. Am. j. solids struct. 2019. Vol. 16. DOI: 10.1590/1679-78255310.

16. Makarov K., Yurchenko E., Yurchenko E. Application of additive technology for the study of resonance oscillations in structures // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 04001. DOI: 10.1051/mateconf/201825104001.

17. Макаров К. Н., Юрченко Е. Е., Волков А. Н., Юрченко В. Е. Моделирование ассиметричных зданий общественных центров при реновации с использованием электроупругих свойств пластика ABS // Строительные материалы и технологии XXI века. 2022. № 3.

© Макаров К. Н., Юрченко Е. Е., Погорельцев Ю. Р., Юрченко В. Е., Волков А. Н., 2023

Поступила в редакцию
в декабре 2022 г.

Ссылка для цитирования:

Кинематически подобные зданиям модели из электроупругих материалов / К. Н. Макаров, Е. Е. Юрченко, Ю. Р. Погорельцев, В. Е. Юрченко, А. Н. Волков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 1(90). С. 346—360.

Об авторах:

Макаров Константин Николаевич — д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительства, Сочинский государственный университет. Российская Федерация, 354000, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Пластунская, 94; ktk99@mail.ru@mail.ru

Юрченко Елена Евгеньевна — канд. техн. наук, доц. каф. строительства, Сочинский государственный университет. Российская Федерация, 354000, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Пластунская, 94; wsonormalno@yandex.ru

Погорельцев Юрий Романович — старший преподаватель каф. строительства, Сочинский государственный университет. Российская Федерация, 354000, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Пластунская, 94; mscontrolprogram@mail.ru

Юрченко Василиса Евгеньевна — магистрант, Сочинский государственный университет. Российская Федерация, 354000, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Пластунская, 94; wsonormalno@yandex.ru

Волков Александр Николаевич — канд. техн. наук, декан Инженерно-экологического фак-та, Сочинский государственный университет. Российская Федерация, 354000, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Пластунская, 94; volkovsochi@gmail.com

**Konstantin N. Makarov, Elena E. Yurchenko, Yuri R. Pogoreltsev,
Vasilisa E. Yurchenko, Aleksandr N. Volkov**

Sochi State University

KINEMATICALLY BUILDING-LIKE MODELS MADE OF ELECTROELASTIC MATERIALS

Kinematically similar small-sized building models were tested on a laboratory bench capable of exciting and recording harmonic vibrations due to the electroelastic properties of the model materials. The similarity criteria are determined by the natural frequencies of a large-scale object in the software package. The equations of influences and reactions are received at physical modeling, necessary for the analysis of dynamic characteristics of buildings. The results allow you to choose renovation methods.

Key words: kinematic similarity, simulation, resonant frequency, asymmetric buildings, electroelastic materials, dynamic effects.

For citation:

Makarov K. N., Yurchenko E. E., Pogoreltsev Yu. R., Yurchenko V. E., Volkov A. N. [Kinematically building-like models made of electroelastic materials]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2023, iss. 1, pp. 346—360.

About authors:

Konstantin N. Makarov — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Sochi State University. 94, Plastunskaya st., Sochi, 354000, Russian Federation; ktk99@mail.ru@mail.ru

Elena E. Yurchenko — Candidate of Engineering Sciences, Sochi State University. 94, Plastunskaya st., Sochi, 354000, Russian Federation; wsonormalno@yandex.ru

Yuri R. Pogoreltsev — Senior Lecturer, Sochi State University. 94, Plastunskaya st., Sochi, 354000, Russian Federation; mscontrolprogram@mail.ru

Vasilisa E. Yurchenko — Master's Degree student, Sochi State University. 94, Plastunskaya st., Sochi, 354000, Russian Federation; wsonormalno@yandex.ru

Aleksandr N. Volkov — Candidate of Engineering Sciences, Sochi State University. 94, Plastunskaya st., Sochi, 354000, Russian Federation; volkovsochi@gmail.com