Doi: <https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v21i3.112>

УДК 624.042.7

ГОРОДЕЦЬКИЙ О.С.

Д-р технічних наук, проф.,
ТОВ «ЛІРА САПР»,
м. Київ, Україна,
e-mail: acegor.lira@gmail.com,
тел.: +38 (044) 590-58-90,
ORCID: 0000-0002-1070-7654

ГЕНЗЕРСЬКИЙ Ю.В.

Канд. технічних наук,
ТОВ «ЛІРА САПР»,
м. Київ, Україна,
e-mail: support.lira@gmail.com,
тел.: +38 (044) 590-58-85,
ORCID: 0000-0003-1957-1236

РІЗНІ ПІДХОДИ ДО РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКЦІЙ НА ДИНАМІЧНІ ВПЛИВИ

АНОТАЦІЯ

Метою роботи є порівняння різних підходів до розрахунку наслідків сейсмічного впливу на будівлі і споруди. Розглядаються три основні групи: методи, засновані на спектральному аналізі, наближені методи обліку фізичної нелінійності, «Pushover Analysis», методи прямого інтегрування рівнянь руху. Описано основні принципи реалізації «Pushover Analysis» в програмному комплексі «ЛІРА САПР». За всіма реалізованими методами були проведені порівняльні розрахунки для тестової моделі. Це рамно-в'язевий каркас з фундаментною плитою на пружній основі; кількість вузлів - 13 613; кількість елементів - 18 316; кількість рівнянь в матриці жорсткості - 71 575; час розрахунку - 0,78 хв. Проаналізовано результати, отримані за дев'ятьма різними методами обчислення сейсмічних навантажень. Для повного та достовірного опису напружено-деформованого стану будь-якої будівлі необхідно не тільки врахувати абсолютно всі фактори, що описують реальний об'єкт, такі, як його геометричні параметри, фізико-механічні властивості матеріалу, формування початкових напружень і деформацій при зведенні будівлі, але і з високим ступенем точності визначити зовнішні впливи та їх характер. Система «Динаміка плюс», що реалізована в ПК «ЛІРА САПР», дозволяє моделювати поведінку конструкції при динамічних впливах в часі. Проаналізовано результати, отримані за дев'ятьма різними методиками розрахунку сейсмічних навантажень. Перевірено збіг та

відмінності методів, основаних на різних передумовах. Показано, що за ДБН В.1.1-12:2014 «Будівництво в сейсмічних районах України» отримано менші значення зусиль і переміщень, тобто можемо спостерігати деяке «пом'якшення» нормативів, що давно очікують проектувальники.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: моделювання сейсмічних коливань, модель ґрунтової основи, динамічні характеристики, резонансні явища, сейсмостійке будівництво, спектральний метод, «Pushover Analysis», динаміка в часі.

РАЗЛИЧНЫЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ КОНСТРУКЦИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

ГОРОДЕЦКИЙ А.С. Д-р технических наук, проф.,
ООО «ЛИРА САПР»,
г. Киев, Украина,
e-mail: acegor.lira@gmail.com,
тел.: +38 (044) 590-58-90,
ORCID: 0000-0002-1070-7654

ГЕНЗЕРСКИЙ Ю.В. Канд. технических наук,
ООО «ЛИРА САПР»,
г. Киев, Украина,
e-mail: support.lira@gmail.com,
тел.: +38 (044) 590-58-85,
ORCID: 0000-0003-1957-1236

АННОТАЦИЯ

Целью работы является сравнение различных подходов к расчету последствий сейсми-

ческого воздействия на здания и сооружения. Рассматриваются три основные группы: методы, основанные на спектральном анализе; приближенные методы учета физической нелинейности «Pushover Analysis»; методы прямого интегрирования уравнений движения. Описаны основные принципы реализации «Pushover Analysis» в программном комплексе «ЛИРА САПР». По всем реализованным методам были проведены сравнительные расчёты для тестовой модели. Это рамно-связевый каркас с фундаментом плитой на упругом основании; количество узлов – 13 613; количество элементов – 18 316; количество уравнений в матрице жесткости – 71 575; время расчета – 0,78 мин. Проанализированы результаты, полученные по девяти различным методам учета сейсмических нагрузок. Для полного и достоверного описания напряженно-деформированного состояния любого здания необходимо не только учесть абсолютно все факторы, описывающие реальный объект, такие как его геометрические параметры, физико-механические свойства материала, учесть формирование начальных напряжений и деформаций при возведении здания, но и с высокой степенью точности определить внешние воздействия и их характер. Система «Динамика плюс», реализованная в ПК «ЛИРА САПР», позволяет моделировать поведение конструкции при динамических воздействиях во времени. Проверено совпадение (различие) методов основанных на различных предпосылках. Показано, что по ДБН В.1.1-12:2014 получены меньшие значения усилий и перемещений, т.е. можем наблюдать некоторое «смягчение» нормативов, которого давно ожидают проектировщики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: моделирование сейсмических колебаний, модель грунтового основания, динамические характеристики, резонансные явления, сейсмостойкое строительство, спектральный метод, «Pushover Analysis», динамика во времени.

DIFFERENT APPROACHES TO DYNAMIC ANALYSIS OF STRUCTURES

GORODETSKY A.S. Dr., Prof., LIRA-SAPR, Kyiv, Ukraine,

e-mail: acegor.lira@gmail.com,

tel.: +38 (044) 590-58-90,

ORCID: 0000-0002-1070-7654

GENZERSKY Y.V. PhD, LIRA-SAPR,

Kyiv, Ukraine,

e-mail: support.lira@gmail.com,

tel.: +38 (044) 590-58-85,

ORCID: 0000-0001-6834-4203

ABSTRACT

The paper focuses on comparison between different approaches for account of earthquake load

on buildings and structures. Three main groups are considered: methods based on spectral analysis, approximate methods for account of physical nonlinearity «Pushover Analysis», methods for direct integration of motion equations. The authors describe main principals for pushover analysis provided in LIRA-SAPR program. For all above-mentioned methods, comparative analyses are carried out for the test problem. It is braced frame with foundation slab on elastic soil; number of nodes – 13 613; number of elements – 18 316; number of equations in the stiffness matrix – 71 575; time for analysis 0,78 min. Analysis results obtained from nine different methods for account of earthquake loads are evaluated. To provide complete and reliable description of the stress-strain state for any building, it is necessary not only to consider all factors that describe real object (such as its geometric properties, physical and mechanical properties of material, consider initial stress and strain during erection process), but to precisely determine external loads and their parameters as well. «Time History Analysis» module in LIRA-SAPR program enables the user to simulate behaviour of structure under dynamic loads in time. Consistency is tested for methods based on different approaches. The authors point out that DBN B.1.1-12:2014 provides smaller values for forces and displacements, that is, building codes become less strict and it was long-awaited by designers.

KEY WORDS: modelling of earthquake loads, soil model, dynamic properties, resonance phenomenon, earthquake-resistant buildings, spectrum method, pushover analysis, time history analysis.

ВВЕДЕНИЕ

В действующем нормативном документе [1] допускается производить расчет конструкций на динамические воздействия различными методами. Условно их можно разделить на три группы:

- 1) различные вариации методов, основанных на спектральном анализе;
- 2) приближенный метод учета физической нелинейности конструкций (Pushover);
- 3) расчёт методом прямого интегрирования уравнений движения (динамика во времени).

Теоретические основы спектрального анализа.

В основе метода разложения по собственным формам лежит модальный анализ [2]. Система дифференциальных уравнений

$$[K]\{U\} + [C]\{\dot{U}\} + [M]\{\ddot{U}\} = \{P(t)\},$$

где:

$[K], [C], [M]$ - матрицы жесткости, демпфирования, масс соответственно;

$\{U\}, \{\dot{U}\}, \{\ddot{U}\}$ - вектора перемещений, скоростей, ускорений соответственно;

$\{P(t)\}$ - вектор нагрузок от времени;
сводится к поиску собственных частот и форм системы

$$[K]\{\varphi\} - \lambda[M]\{\varphi\} = 0,$$

где:

$\{\varphi\}$ - собственный вектор (вектор форм);
собственные значения - $\lambda_i = \omega_i^2$.

При этом система распадается на множество независимых уравнений движения узлов модели.

$$\{U(t)\} = \sum_{i=0}^N y_i(t) \varphi_i;$$

$$\frac{d^2}{dt^2} y_i(t) + 2\xi_i \omega_i \frac{d}{dt} y_i(t) + \omega_i^2 y_i(t) = P_i(t).$$

Решение уравнения имеет вид:

$$y_i = e^{-\xi_i \omega_i t} \left(\frac{\dot{y}_i^0 + y_i^0 \xi_i \omega_i}{\omega_i} \sin \bar{\omega}_i t + y_i^0 \cos \bar{\omega}_i t \right) + \frac{1}{\bar{\omega}_i} \int_0^t P_i(t) e^{-\xi_i \omega_i (t-\tau)} \sin \bar{\omega}_i (t-\tau) d\tau$$

$$\text{где } \bar{\omega}_i = \omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2}, \quad y_i^0 = y_i(0), \quad \dot{y}_i^0 = \dot{y}_i(0).$$

В ПК «ЛИРА САПР» модальный анализ выполняется модифицированным методом итерации подпространства.

При решении задачи спектральным методом для каждой формы вычисляются инерционные силы по формуле [3]:

$$S_i(t) = \omega_i^2 y_i(t) M \varphi_i.$$

$$\text{Амплитудное значение } S_{i,0} = \max(|\omega_i^2 y_i(t)|).$$

Теоретические основы метода Pushover.

Pushover Analysis - методика упрощенного нелинейного статического расчета здания на сейсмические воздействия. Она состоит в пошаговом приложении нагрузки от горизонтальных сейсмических сил до достижения заданного перекоса этажей, разрушения здания либо достижения максимального значения сил, если предыдущие критерии не сработали. Дает возможность учесть нелинейные свойства материалов за счет переопределения интегральных жесткостных характеристик конечных элементов модели на каждом шаге приложения нагрузки. При этом происходит поиск точки пересечения расчетного графика зависимости спектрального ускорения от спектрального перемещения с редуцированным нормативным графиком.

Реализованный в ПК «ЛИРА САПР» алгоритм Pushover Analysis есть универсальным и может быть применен ко всем возможным спектрам реакций. Это зависимости «коэффициент динамично-

сти β - период колебаний T » (в Украине –ДБН, в Грузии, Армении, РФ – СП, СНиП, Узбекистана, Таджикистана). Это и зависимости «ускорение S_a – перемещение S_d » в нормах Казахстана, стран Европы (Eurocode 8), а также США (IBC-2006, ASCE 7-05). Также возможно задать произвольные пользовательские спектры реакций и вычисленные спектры реакций от пользовательских акселерограмм.

Сначала модель загружается определяющим нагружением для пересчета интегральных жесткостных характеристик неупругой модели и определения начального напряженно-деформированного состояния (НДС).

На следующем этапе прикладывается горизонтальное сейсмическое нагружение.

На каждом шаге нагружения на основе обобщенных спектральных перемещений S_d и обобщенных спектральных ускорений S_a строится нелинейный спектр несущей способности для многомассовой расчетной модели с учетом нелинейных характеристик материалов:

$$S_{ai} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i d_{ij}^2}{(\sum_{i=1}^n m_i d_{ij})^2} \sum_{i=1}^n S_{ij},$$

$$S_{di} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i d_{ij}^2}{\sum_{i=1}^n S_{ij} d_{ij}} S_{aj}.$$

В соответствии с ним строится идеализированная билинейная диаграмма.

С помощью идеализированной билинейной диаграммы находится коэффициент податливости модели (рис. 1), с помощью которого впоследствии будет выполняться редуцирование нормативного (либо же заданного) спектра реакций для последующего расчета:

$$\mu = \frac{d_m}{d_T},$$

Рис. 1. График податливости.

где d_m – максимальное перемещение многомассовой расчетной модели по результатам нелинейного статического расчета, d_T – перемещение многомассовой расчетной модели, соответствующее границе текучести многомассовой расчетной модели.

Реализованы два метода редукции:

1) метод Ньюмарка-Холла (рис. 2);

$$R_\mu = \begin{cases} 1, & T < T_a \\ \sqrt{2\mu-1}, & T_b < T < T_c \\ \mu & T > T_c \end{cases}$$

Рис. 2. Графики податливости для метода Ньюмарка-Холла.

2) метод N2 (Видик-Файфар-Фишингер) (рис. 3).

$$R_\mu = \begin{cases} 1, & T < T_a \\ (\mu-1) \frac{T}{T_c} + 1, & T_b < T < T_c \\ \mu & T > T_c \end{cases}$$

Расчет зданий по государственным нормам [1]

предусматривает расчет с использованием метода редуцирования (Ньюмарка-Холла).

Конечным этапом есть поиск точки пересечения редуцированного спектра реакций со спектром несущей способности. Эта точка называется точкой состояния (рис. 4). Именно для нее определяется НДС всей схемы и оценивается несущая способность конструкции при сейсмических воздействиях.

Теоретические методы прямого интегрирования уравнений движения.

Для полного и достоверного описания напряженно-деформированного состояния любого здания, необходимо не только учесть абсолютно все факторы, описывающие реальный объект, такие как его геометрические параметры, физико-механические свойства материала, учесть формирование начальных напряжений и деформаций при возведении здания, но и с высокой точностью определить внешние воздействия и их характер. К числу характерных примеров взаимодействия нагрузки с объектом относятся многие режимы динамического нагружения.

В большинстве случаев достаточно выполнить статический расчет здания, учитывая динамические нагружения как статические с некоторым коэффициентом динамичности, либо же воспользо-

Рис. 4. Нахождение предельной гибкости.

Рис. 3. Графики податливости для метода N2 Видик-Файфар-Фишингер.

зоваться спектральными методами расчета на нормативные сейсмические воздействия. Но иногда интерес представляет характер движения конструкции и изменение НДС здания во времени. В таких случаях необходимо производить динамический расчет здания в прямом времени.

Система «Динамика плюс» позволяет моделировать поведение конструкции при динамических воздействиях во времени.

Дифференциальное уравнение движения конструкции в МКЭ записывается в виде:

$$([K] - [K_G])\{U\} + [C]\{\dot{U}\} + [M]\{\ddot{U}\} = \{P(t)\},$$

где

$[K]$ – касательная матрица жесткости системы;

$[K_G]$ – матрица геометрической жесткости;

$[C]$ – матрица демпфирования;

$[M]$ – матрица масс;

$\{U\}, \{\dot{U}\}, \{\ddot{U}\}$ – неизвестные векторы узловых перемещений, скоростей, ускорений;

$\{P(t)\}$ – вектор узловых нагрузок.

Интегрирование дифференциальных уравнений движения узлов конечно-элементной модели конструкции сводится к поиску коэффициентов в разнообразных разностных методах – Ньюмарка, Вильсона, Рунге-Кутты, Хоболта, центральных разностей, линейного ускорения и др. Также возможен учет геометрической, физической и конструктивной нелинейностей. При этом переопределение матриц касательной и геометрической жесткостей элементов необходимо производить на каждом шаге интегрирования по времени.

Считается, что начальные скорости $\{\dot{U}\}$ нулевые, а начальные перемещения $\{U\}$ получены из результатов решения при статическом нагружении (предистории).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В ПК ЛИРА-САПР были реализованы все методы, рекомендованные в [1], а также некоторые методы, рекомендованные другими нормативами.

По всем реализованным методам были проведены сравнительные расчеты для тестовой задачи. На рис. 5 представлена схема тестовой задачи. Это рамно-связевый каркас с фундаментной плитой на упругом основании; количество узлов – 13 613; количество элементов – 18 316; количество уравнений в матрице жесткости – 71 575; время расчета – 0,78 мин.

На рис. 6 представлены первые шесть формы колебаний рассматриваемой конструкции.

Ниже приводятся основные результаты расчета на сейсмические воздействия по различным методам для тестовой задачи. В качестве основных критериев для сравнения приняты:

- перемещение в узле А (рис. 5);
- усилие в элементе В;
- суммарная определяющая сейсмическая нагрузка.

В таблице 1 приведены основные результаты расчетов по различным методам:

1. Модуль 20 – в соответствии со СНиП II-7-81;
2. Модуль 36 – в соответствии с ДБН В.1.1-12:2006 раздел 2.3;

Рис. 5. Расчетная модель тестовой задачи.

Завантаження 3
Форма коливань ул. с. 1
Маса зібрана із завантажень: 2

Завантаження 3
Форма коливань ул. с. 2
Маса зібрана із завантажень: 2

Завантаження 3
Форма коливань ул. с. 3
Маса зібрана із завантажень: 2

Завантаження 3
Форма коливань ул. с. 4
Маса зібрана із завантажень: 2

Завантаження 3
Форма коливань ул. с. 5
Маса зібрана із завантажень: 2

Завантаження 3
Форма коливань ул. с. 6
Маса зібрана із завантажень: 2

Рис. 6. Первые шесть форм собственных колебаний.

Таблица 1. Сравнение результатов расчетов

№ периода	Сейсмическая нагрузка X (т)								
	1 (20-й Модуль)	2 (36-й модуль)	3 (38-й модуль)	4 (29-й модуль)	5 (46-й модуль)	6 (49-й модуль)	7 (57-й модуль)	8 (Pushover Analysis)	9 (Динамика во времени)
1	-1141.91	-1366	-1404	-1421.97	-2337.3	3014.65	-1138.4		
2	-17.4507	-21.4	-22.11	-22.37	-37.009	46.0699	-17.828		
4	-314.843	-358	-179.6	-75.14	-381.04	323.707	-298.27		
5	-276.205	-308	-156.2	-58.56	-334.19	258.244	-256.71		
9	-141.445	-126	-69.43	-18.99	-152.2	65.9962	-104.77		
10	-92.0496	-81.8	-50.91	-12.32	-110.98	42.6704	-68.185		
Итого	1228.07	1453.26	1427.3	1425.49	2399.98	3044.32	1211.05	1690,9	
Перемещение (мм)									
Уз № 13147	152.85	169.07	176.8	174.95	276.8	345.06	153.22	212.74	(τ=27с) 369.22
Усилия (т)									
Эл № 23	-793.53	-824.02	-826.45	-823.91	-941.46	-1017.33	-796.28	-1063.85	(τ=58с) -917.23

3. Модуль 38 – в соответствии с ДБН В.1.1-12:2006 приложение В;
4. Модуль 29 – в спектральный расчет по акселерограммам;
5. Модуль 46 – в соответствии с ДБН В.1.1-12:2006, приложение “Г”;
6. Модуль 49 – в соответствии с ДБН В.2.2-24:2009;
7. Модуль 57 – в соответствии с ДБН В.1.1-12:2014;
8. Модуль “Pushover Analysis” – в соответствии с ДБН В.1.1-12:2014;
9. Модуль “Динамика во времени” – прямое интегрирование уравнений движения в соответствии с ДБН В.1.1-12:2014.

ВЫВОДЫ

Все методы, основанные на спектральном анализе, дают примерно одинаковые результаты. Наиболее близкие результаты дают методы, реализующие нормы: СНиП II-7-81; ДБН В.1.1-12:2006; ДБН В.1.1-12:2014. Следует отметить, что ДБН В.1.1-12:2014 дает меньшее значение усилий и перемещений, т. е. можем наблюдать некоторое «смягчение» нормативов, которого давно ожидают проектировщики. Метод «Pushover Analysis» дает несколько завышенное значение перемещений и усилий. Метод прямого интегрирования уравнений движения в соответствии с ДБН В.1.1-12:2014 можно осторожно рассматривать как наиболее адекватный, так как по сути это моделирование во времени процесса динамического воздействия. Несколько завышенные значения усилий и перемещений можно рассматривать как случайные выбросы. Этот метод можно рекомендовать как наиболее приемлемый для динамических расчетов строительных конструкций и сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ДБН В.1.1-12:2014 Будівництво у сейсмічних районах України. – Чинні від 2014-10-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2014. – VI, 110 с.
2. Городецкий А.С., Евзеров И.Д., Стрелец-Стрелецкий Е.Б., Боговис В.Е., Гензерский Ю.В., Городецкий Д.А. Метод конечных элементов. Теория и численная реализация. — Киев: Факт, 1997. — 140 с.
3. Городецкий А.С., Батрак Л.Г., Городецкий Д.А., Лазнюк М.В., Юсипенко С.В. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона. — Киев: Факт, 2004. — 105 с.

REFERENCES

1. Construction in seismic regions of Ukraine. (2014). DBN V.1.1-12-2014 from 01st October 2014. SE “Ukrarkhbudinform” [in Ukrainian].
2. Gorodetskyi, A.S., Yevzerov, I.D., Strelets-Streletskyi, E.B., Bohovis, V.E., Genzerskyi, Yu.V. & Gorodetskyi, D.A. (1997). Finite elements method. Theory and numerical implementation. Kiev: Fakt [in Russian].
3. Gorodetskyi, A.S., Batrak, L.H., Gorodetskyi, D.A., Lazniuk M.V. & Yusipenko S.V. (2004). High-rise building structures calculation and design of cast-in-situ reinforced concrete. Kiev: Fakt [in Russian].

Статья поступила в редакцию 20.03.2019 года.