

# Спрощена розрахункова оцінка сейсмостійкості будівель з використанням положень методу спектру несучої здатності

Денис Хохлін

Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037  
[den\\_a\\_khokh@meta.ua](mailto:den_a_khokh@meta.ua), <http://orcid.org/0000-0002-0128-8515>

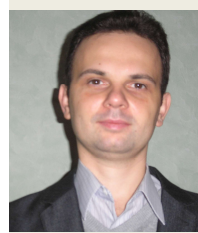
DOI: 10.32347/2522-4182.6.2020.42-46

**Анотація.** Згідно діючих ДБН передбачено можливість застосування нелінійного статичного розрахунку на основі методу спектру несучої здатності. Даний розрахунок визначається суттєвою спрощеністю у порівнянні з прямим динамічним методом, а також можливістю застосування у якості його альтернативи, враховуючи необхідність застосування прямого динамічного методу також й для будівель(споруд) класу відповідальності СС2.

В той же час повноцінний нелінійний статичний розрахунок є також достатньо трудомістким та чутливим до можливих помилок у моделюванні, адже потребує створення нелінійної моделі всієї будівлі.

Сукупні положення розрахунків на сейсмічні впливи спектральним методом та нелінійним статичним розрахунком на основі (на основі методу спектру несучої здатності) згідно діючих ДБН дозволяє виконати другий (нелінійний статичний розрахунок) з обґрунтованими спрощеннями щодо побудови графіку спектру несучої здатності конструктивної системи на основі результатів умовно лінійного спектрального розрахунку. В статті представлено пропонування методика такого розрахунку з відповідними поясненнями та обґрунтуваннями.

**Ключові слова:** будівля, сейсмостійкість, спрощена оцінка, метод спектру несучої здатності



**Хохлін Денис**  
доцент кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій  
к.т.н., с.н.с.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Згідно діючих ДБН [1] введено застосування т.з. нелінійного статичного розрахунку на основі методу спектру несучої здатності (СНЗ). Його цінність для прикладних завдань визначається суттєвою спрощеністю у порівнянні з прямим динамічним методом, а також можливістю застосування у якості його альтернативи згідно ДБН [1]. Останній пункт стає ще більш цінним, враховуючи необхідність застосування прямого динамічного методу також й для будівель(споруд) класу відповідальності СС2 (важливе нововведення у [1] порівняно з минулими нормами). В той же час повноцінний нелінійний статичний розрахунок є також достатньо трудомістким та чутливим до можливих помилок у моделюванні, адже потребує створення нелінійної моделі всієї будівлі(споруди). Таким чином, актуальним є пошук обґрунтованих спрощень такого розрахунку, які дозволили би робити попередні оцінки сейсмостійкості конструктивних систем, оцінювати адекватність повноцінних нелінійних розрахунків методом спектру несучої здатності (СНЗ) тощо.

Отже, метою дослідження є формулювання та обґрунтування положень спроще-

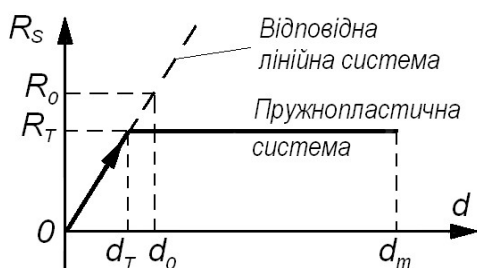
ної розрахункової оцінки сейсмостійкості конструктивних систем будівель на основі методу спектру несучої здатності (СНЗ).

## АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Сейсмичні розрахунки з застосуванням методу СНЗ (детально див. [2]) розглянуті у багатьох джерелах [3-8]. Даний метод дозволяє значно розширювати коло розглянутих навантажень і впливів, що можуть діяти разом [9-13] або послідовно [14-17] з сейсмичними. Але в цих випадках якщо й розглядається метод СНЗ, то передбачено застосування повноцінно нелінійних моделей будівель, що суттєво ускладнює розрахунки для широкого прикладного застосування, яке передбачено діючими ДБН [1].

## ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз положень нелінійного статичного розрахунку на основі методу СНЗ, приведеного у ДБН [1], показує, що ключовими для такого розрахунку є основні параметри дволінійного (еквівалентного до криволінійного) графіку СНЗ конструктивної системи будівлі (точніше її еквівалентної одномасової системи ЕОМС), а саме 2 точки: межі текучості ( $R_T$ ,  $d_T$ ) та граничної точки ( $R_T$ ,  $d_m$ ), див. рис. 1. Значення  $d_m$  може варіюватися в залежності від прийнятих допустимого ступеню пошкодження конструктивної системи в результаті землетрусу.



**Рис.1.** Залежності «навантаження - переміщення» пружно-пластичної системи і відповідної їй лінійної системи

**Fig.1.** The «load-displacement» dependencies of an elastic plastic system and its corresponding linear system

Щодо значення межі текучості  $R_T$ , то воно може бути визначено на основі лінійного спектрального методу розрахунку з застосуванням коефіцієнтів допустимих деформацій. Щодо загальних горизонтальних

переміщень конструктивної системи (узагальнено представлених значенням  $d_T$ ), то вони можуть бути визначені при розрахунку скінчено-елементної моделі даної системи тим же спектральним методом. При цьому мають бути застосовані зменшені модулі деформацій конструктивних елементів, які інтегровано відображають нелінійний характер їх деформацій в умовах сейсмічного навантаження. Наприклад, для кам'яної кладки рекомендується застосовувати величину такого модуля деформацій  $0,8E_0$ , де  $E_0$  – модуль пружності кладки [18].

Слід відмітити, що для суміщення графіків СНЗ та впливу застосовують єдину систему координат спектральне прискорення – спектральне переміщення  $S_a$ - $S_d$  з застосуванням формул (все параметри для яких можна визначити з скінчено-елементних моделей для розрахунку спектральним методом) [1]:

$$S_{d,j} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot d_{ij}^2}{\sum_{i=1}^n S_{ij} \cdot d_{ij}} S_{a,j} \quad (1)$$

$$S_{a,j} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot d_{ij}^2}{\left(\sum_{i=1}^n m_i \cdot d_{ij}\right)^2} \sum_{i=1}^n S_{ij} \quad (2)$$

де  $m_i$  – маса, зосереджена в  $i$ -му рівні (поверсі) розрахункової моделі;

$d_{ij}$  – горизонтальне нелінійне переміщення  $i$ -го рівня (поверху) розрахункової моделі при дії інерційних навантажень  $S_{ij}$  за  $j$ -ою формою коливань.

Отже, отримавши значення переміщення та загальні навантаження від сейсміки, а також значення загальних мас на кожному рівні моделі конструктивної системи при спектральному розрахунку, отримуємо точку – межу пружності системи в координатах  $S_a$ - $S_d$ . Для отримання другої точки  $S_{d,m}$  достатньо знати переміщення на межі пружності  $S_{d,T}$  та коефіцієнт пластичності (податливості)  $\mu$ :

$$S_{d,m} = \mu \cdot S_{d,T} \quad (3)$$

Коефіцієнт податливості  $\mu$  може бути визначений на основі загально прийнятих

та відомих параметрів конструктивних систем, залежних від їх особливостей: коефіцієнту  $k_1 = 1/R_{\mu}$  з таблиці 6.3 ДБН [1] та граничних значень нелінійних перекосів поверхів з табл. 6.8 ДБН [1], що детально розглянуто у роботах [15-17].

Узагальнюючи наведене вище, можна запропонувати наступну послідовність при виконанні спрощеного варіанту нелінійного статичного розрахунку на основі методу СНЗ:

1. Лінійний розрахунок конструктивної системи спектральним методом з використанням зменшених модулів деформації матеріалів несучих конструкцій, що враховують їх нелінійну роботу та наявні(або) потенційні пошкодження. Результат – точка ( $R_T, d_T$ ) на рис. 1 в координатах  $S_a-S_d$ , з застосуванням формул (1) та (2) з ДБН для ЕОМС. Обов'язково слід перевірити (чи підібрати) перерізи несучих конструкцій за результатами даного розрахунку з врахуванням положень ДБН [1].

2. Визначаємо положення точки ( $R_T, d_m$ ) в тих же координатах  $S_a-S_d$ , використовуючи значення коефіцієнтів допустимих деформацій  $k_1 = 1/R_{\mu}$  (з таблиці 6.3 ДБН [1]) та граничних значень нелінійних перекосів поверхів (з табл. 6.8 ДБН [1]) для відповідної конструктивної системи у ДБН (детально розглянуто у роботах [15-17]).

3. Будуємо на тому ж графіку спектр впливу згідно ДБН, обираючи відповідний графік з врахуванням актуального значення коефіцієнту редукції  $R_{\mu}$  та відповідного коефіцієнту пластичності  $\mu$ , що не повинні перевищувати для даної конструктивної системи, виходячи з коефіцієнту  $k_1$  та граничних значень нелінійних перекосів поверхів (див. вище).

4. Визначаємо місце перетину графіку впливу та СНЗ.

В залежності від точки місця розташування точки впливу формулюємо висновок за результатами розрахунку:

- перетин на лінії пружності на суттєвій відстані від точки текучості (орієнтовно не менше 5-10% нижче даної точки): 1 категорія технічного стану (КТС) конструктивної системи щодо сейсмостійкості, необхідність у суттєвому ремонті після землетрусу не очікується.

- перетин на лінії пружності близько точки текучості (орієнтовно менше 5-10% від даної точки): 2 КТС конструктивної системи щодо сейсмостійкості, очікується необхідність у суттєвому або капітальному ремонті після землетрусу.

- перетин на лінії пластичності в допустимих межах (згідно коефіцієнтів допустимих деформацій та граничних значень нелінійних перекосів поверхів): 2-2/3 [19] КТС конструктивної системи щодо сейсмостійкості, очікується необхідність у капітальному ремонті після землетрусу.

- перетин на лінії пластичності за допустимими межами (згідно коефіцієнтів допустимих деформацій та граничних значень нелінійних перекосів поверхів), але в границях максимальної межі  $d_m$  (відповідний до максимально можливого для даної конструктивної системи коефіцієнту допустимих деформацій в табл. 6.8 ДБН [1]): 3-3/4 [19] КТС конструктивної системи щодо сейсмостійкості, очікується стан близький до аварійного на час землетрусу та необхідність розбирання будівлі після.

- відсутність перетину графіків: 4 КТС конструктивної системи щодо сейсмостійкості, наявна велика ймовірність руйнування будівлі при землетрусі, на який розраховується.

Використання запропонованої межі 5-10% пов'язано з наявними коефіцієнтами надійності більшості основних видів матеріалів несучих конструкцій [18, 20, 21].

## ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

На основі вищенаведеного можливо зробити наступні висновки. Сукупні положення розрахунків на сейсмічні впливи спектральним методом та нелінійним статичним розрахунком на основі (на основі методу спектру несучої здатності) згідно діючих ДБН [1] дозволяє виконати 2-й (нелінійний статичний розрахунок) з обґрунтованими спрощеннями щодо побудови графіку спектру несучої здатності конструктивної системи на основі результатів умовно лінійного спектрального розрахунку. В статті представлено пропонується методика такого розрахунку з відповідними поясненнями та обґрунтуваннями.

## ЛІТЕРАТУРА

- ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України [На заміну ДБН В.1.1-12:2006; Чинні від 2014-10-01]. Офіц. вид. Київ : Укрархбудінформ: Мінрегіон України, 2014. 110 с.
- Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости : монография / Ю.И. Немчинов, Н.Г. Марьенков, А.К. Хавкин, К.Н. Бабик. Київ : Гудименко С.В., 2012. 384 с.
- Paulay T., Priestley M.J.N., 1992. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. New York, *A Wiley Interscience Publication*, 744.
- Anil K. Chopra A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings / Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel // *Earthquake engineering and structural dynamics*. – 2002; 31. – P.: 561-582.
- R. Hasan, L. Xu, D.E. Grierson, 2002. Pushover analysis for performance-based seismic design. *Computers and Structures* 80, 2483–2493.
- ATC-40. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings – Volume 1 and 2 Applied Technology Council. Report No. SSC 96-01, Seismic Safety Commission, Redwood City, CA. – November 1996.
- EN 1998-3. Eurocode 8: Design of structures for Earthquake resistance – Part 3 : Assessment and retrofitting of buildings. - Ref. EN 1998- 3: 2005. E. – 89 p.
- Chopra A. K. Capacity-demand diagram methods based on inelastic design spectrum. / Chopra A. K., Goel R. K. – 12WCEE-2000/1612. – P. 1-8.
- Сапожников А.И. Основы конструирования и обеспечения карсто-сейсмоустойчивости многоэтажных зданий: Учебное пособие для вузов. Астрахань : АИСИ, 2001. 108 с.
- Кусбекова М.Б. Особенности проектирования объектов в сейсмических районах на просадочных грунтах : *Подготовка инженерных кадров в контексте глобальных вызовов XXI века: Труды Междунар. науч.-практ. конф. (IV том)*, Алматы, 2013. С. 27-30.
- Матвеев И.В., Кравченко В.И. Сочетание воздействий просадки оснований и сейсмике в расчетах зданий. *Строительная механика и расчет сооружений*, 1990. №4/1990. С. 28-32.
- Хохлін Д. О. Конструктивний захист житлових будинків масових серій, що експлуатуються в умовах просідаючих ґрунтів сейсмонезбезпечних територій : дис. ...канд. техн. наук : 05.23.01. – Київ, 2009. 204 с.
- Барашиков А.Я., Хохлін Д.О. Проблеми експлуатаційного стану будівель і споруд при сумісній дії сейсмічного навантаження та нерівномірних деформацій основи. *Ресурсоekonomні матеріали, їх властивості та технології виготовлення*. Рівне, 2011. Вип. 21. С. 413-419.
- Khokhlin D.O. Building protection in conditions of simultaneous availability of soil base substantial differential settlements and seismic hazard origins. *Міжнародний науково-виробничий журнал «Підводні технології»*. Київ, 2017. Вип. 05/2017. С. 54-60.
- Хохлін Д.О. Розрахунок конструктивних систем будівель на основі методу спектру несучої здатності. *Науково-технічний збірник «Містобудування та територіальне планування»*. Київ, 2016. Вип. 61 (спеціальний). С. 386-387.
- Khokhlin D.O. Influence of base substantial differential settlements on structural systems seismic stability level. *Proceedings of National Aviation University*, 2016. № 3 (68). P. 54-61.
- Khokhlin D.O. Features of base substantial differential settlements influence on structural system seismic stability *Motrol: kom. Mot. Energ. Roln.*, OL PAN, Vol.18, №10, 65-73.
- ДСТУ Б В.2.6-207:2015 Розрахунок і конструювання кам'яних та армокам'яних конструкцій будівель та споруд [Чинний від 2016-04-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2015. 356 с.
- Хохлін Денис Розвиток системи категорій технічного стану будівель і споруд та їх конструкцій : *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. Київ, 2019. Вип. № 5. С. 8-14.
- ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [На заміну СНиП 2.03.01-84\*; Чинні від 2011-07-01]. Офіц. вид. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.
- ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування [На заміну ДСТУ Б В.2.6-194:2013 та ДБН В.2.6-163:2010 у частині розділу 1; Чинні від 2015-01-01]. Офіц. вид. Київ : Мінрегіон України, 2014. 199 с.

## REFERENCES

- Budivnytstvo u seismichnykh raionakh Ukrainy: DBN V.1.1-12:2014, 2014. Kyiv, *Minrehion Ukrainy*, 110 (in Ukrainian).
- Nemchinov Ju.I., Mar'enkov N.G., Havkin A.K., Babik K.N., 2012. Proektirovanie zdaniy s zadannyim urovnem obespecheniya seysmостойкости: *monografiya*. Kyiv, *Gudimenko S.V.*, 384 (in Russian).
- Paulay T., Priestley M.J.N., 1992. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. New York, *A Wiley Interscience Publica-*

- tion, 744.
4. Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel, 2002. A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 561–582.
  5. R. Hasan, L. Xu, D.E. Grierson, 2002. Pushover analysis for performance-based seismic design. *Computers and Structures* 80, 2483–2493.
  6. ATC-40. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings – Volume 1 and 2 Applied Technology Council. *Report No. SSC 96-01, Seismic Safety Commission, Redwood City, CA. – November 1996.*
  7. EN 1998-3. Eurocode 8: Design of structures for Earthquake resistance – *Part 3 : Assessment and retrofitting of buildings. - Ref. EN 1998- 3: 2005. E. – 89 p.*
  8. Chopra A. K. Capacity-demand diagram methods based on inelastic design spectrum. / *Chopra A. K., Goel R. K. – 12WCEE-2000/1612. – P. 1-8.*
  9. Sapozhnikov A.I., 2001. Osnovy konstruirovaniya i obespecheniya karstoseismoustoychivosti mnogoetazhnykh zdaniy: Uchebnoe posobie dlya vuzov. *Astrakhan, AISI, 108 (in Russian).*
  10. Kusbekova M. B., 2013. Osobennosti proektirovaniya ob'ektov v seismicheskikh rayonah na prosadochnykh gruntah. Podgotovka inzhenernykh kadrov v kontekste globalnykh vyizovov XXI veka: *Trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (IV tom), Almaty, KazNTU named after K.I. Satpaev, Vol. IV, 27-30 (in Russian).*
  11. Matveev I.V., Kravchenko V.I., 1990. Sochetanie vozdeystviy prosadki osnovaniy i seismiki v raschetah zdaniy. *Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzheniy, Moscow, Strojizdat, Vol. 4/1990, 28-32 (in Russian).*
  12. Khokhlin D.O., 2009. Konstruktyvnyi zakhyst zhytlovykh budynkiv masovykh serii, shcho ekspluatuiutsia v umovakh prosidaiuchykh hruntiv seismonebezpechnykh terytorii. *Dissertation Ph. D. in Engineering sciences, Candidate of Sciences in Engineering sciences: 05.23.01, Kyiv, KNUCA, 204 (In Ukrainian).*
  13. Barashykov A.Ya., Khokhlin D.O., 2011. Problemy ekspluatatsiinoho stanu budivel i sporud pry sumisnii dii seismichnoho navantazhennia ta nerivnomirnykh deformatsii osnovy. Resursoekonomni materialy, yikh vlastyvoli ta tekhnologii vyhotovlennia, Rivne, NUVHP, Vol. 21, 413-419 (In Ukrainian).
  14. Khokhlin D.O., 2017. Building protection in conditions of simultaneous availability of soil base substantial differential settlements and seismic hazard origins. *Underwater Technologies, Vol. 05, 54-60.*
  15. Khokhlin D.O., 2016. Rozrakhunok konstruktyvnykh system budivel na osnovi metodu spektru nesuchoi zdatnosti. *Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk «Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia», Vol. 61, 386-387 (In Ukrainian).*
  16. Khokhlin D.O., 2016. Influence of base substantial differential settlements on structural systems seismic stability level. *Proceedings of National Aviation University, Vol. 3(68), 54-61.*
  17. Khokhlin D.O., 2016. Features of base substantial differential settlements influence on structural system seismic stability Motrol: kom. *Mot. Energ. Roln., OL PAN, Vol.18, №10, 65-73.*
  18. Rozrakhunok i konstruiuvannia kam'ianykh ta armokamianykh konstruktsii budivel ta sporud: *DSTU B V.2.6-207:2015, 2015. Kyiv, Minrehion Ukrainy, 356 (in Ukrainian).*
  19. Khokhlin Denys, 2019. Rozvytok systemy katehorii tekhnichnoho stanu budivel i sporud ta yikh konstruktsii : Budivelni konstruktsii. *Teoriia i praktyka, Vol. № 5, 8-14 (in Ukrainian).*
  20. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia: *DBN V.2.6-98:2009, 2011. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy, 71 (in Ukrainian).*
  21. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia: *DBN V.2.6-198:2014, 2014. Minrehion Ukrainy, 199 (in Ukrainian).*

### SIMPLIFIED ANALYSIS OF BUILDING SEISMIC STABILITY USING PRINCIPLES OF SPECTRUM CAPACITY METHOD

*Denys Khokhlin*

**Summary.** According to the current DBN, it is possible to apply the nonlinear static analysis based on the load-bearing capacity spectrum method. This analysis is allocated by essential simplicity in comparison with the direct dynamic method and also possibility of application as its alternative, considering necessity of application of a direct dynamic method also for buildings (constructions) of the responsibility class SS2.

At the same time the complete nonlinear static analysis is also enough complex and sensitive to possible errors in modelling, after all it needs creation of nonlinear model of entire building.

Aggregate points of analysis on seismic influences by the spectral method and the nonlinear static analysis (on the basis of the method of bearing capacity spectrum) according to the current DBN allow to execute the last (nonlinear static analysis) with proved simplifications regarding creation of spectrum load-bearing capacity diagram for constructive system on the basis of results conditionally linear spectral analysis.

**Keywords:** building; seismic stability; simplified analysis; spectrum capacity method.