

пролетах. На сьогоднішній день питання прогнозування та компенсації деформацій елементів гібридних будівель освітлені в недостатній мірі. **Цель статьи** заключається в розробці методу компенсації нерівномірних вертикальних переміщень елементів гібридних дерево-железобетонних багатоповерхових будівель. **Результаты и выводы.** Розглянуті та проаналізовані основні існуючі методи компенсації нерівномірних деформацій, серед яких – абсолютна, рівномірна, груповая та оптимальна компенсація. З використанням основних положень методу групової компенсації запропоновано метод компенсації нерівномірних вертикальних переміщень гібридних дерево-железобетонних багатоповерхових будівель. Приведені основні залежності та описано процедуру для реалізації запропонованого методу. Визначені граничні величини нерівномірних вертикальних переміщень як критерій пошуку оптимальної кількості груп поверхів та кількості поверхів в групі. Практична цінність методу заключається в можливості визначення величини корекції висоти несучих конструкцій гібридних дерево-железобетонних багатоповерхових будівель для мінімізації негативних наслідків нерівномірного деформування.

**Ключевые слова:** *гібридні багатоповерхові будівлі; нерівномірні переміщення; деформація; компенсація; висота поверху; дерево-железобетон*

## COMPENSATION OF NON-UNIFORM VERTICAL DISPLACEMENTS OF HYBRID TIMBER-REINFORCED CONCRETE MULTI-STOUREY BUILDINGS

SHEKHORKINA S.Yev.<sup>1\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
SAVYTSKYI M.V.<sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

<sup>1\*</sup> Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 021-84-44, e-mail: [S\\_VT@ukr.net](mailto:S_VT@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4377-3746

<sup>2</sup> Department of reinforced concrete and masonry structures, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: [sav15@ukr.net](mailto:sav15@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

**Abstract. Problem statement.** The design of multi-storey buildings is based on the requirements of both load-bearing capacity and serviceability limit states. Criteria for serviceability include limiting the amount of displacements of the upper part of the building in the horizontal plane, oscillations of the floors, accelerations of the building caused by wind load, as well as non-uniform shortening of vertical elements. Uneven shortening occurs due to differences in deformation characteristics of the structural materials, cross-sectional areas, load-transfer areas of vertical elements in adjacent spans. For today the issues of forecasting and compensation of deformations of elements of hybrid buildings are insufficiently revealed. **The purpose of the article** is to develop a method of compensation for non-uniform vertical displacements of elements of hybrid wood-reinforced concrete high-rise buildings. **Results and conclusion.** The article considers and analyzes the main existing methods for compensating for non-uniform deformations, among which are absolute, uniform, group and optimal compensation. Using the basic principles of the group compensation method, a method for compensating for non-uniform vertical displacements of hybrid wood-reinforced concrete multi-storey buildings is proposed. The main dependencies are given and the procedure for implementing the proposed method is described. Limit values of non-uniform vertical displacements are determined as a criterion for finding the optimal number of floor groups and the number of floors in a group. The practical value of the method lies in the possibility of determining the height correction for the load-bearing structures of hybrid timber-reinforced concrete multi-storey buildings to minimize the negative consequences of uneven deformation.

**Keywords:** *hybrid multi-storey buildings; non-uniform displacement; deformation; compensation; floor height; timber-reinforced concrete*

**Постановка проблеми та мета дослідження.** Питання проектування багатоповерхових будівель включає забезпечення вимог за критеріями як несної здатності, так і експлуатаційної придатності. Вимоги до експлуатаційної придатності включають обмеження величин переміщень у горизонтальній площині верхньої частини

будівлі, коливань перекриттів, прискорень внаслідок вітрового навантаження та нерівномірного вкорочення вертикальних елементів. Серед вищенаведених критеріїв питання прогнозування та компенсації деформацій елементів гібридних будівель наразі висвітлені недостатньо.

Зі збільшенням висоти вертикальні

елементи (колони, стіни, діафрагми тощо) у багатоповерховій будівлі зазнають деформацій, які проявляються у поздовжньому вкороченні, яке спричинене навантаженнями з великої кількості поверхів.

У гібридних будівлях із несними конструкціями, виготовленими з різних матеріалів, останні вкорочуватимуться нерівномірно, через різні деформаційні характеристики, площі поперечного перерізу, вантажні площі тощо. Окрім цього, істотний вплив на деформування протягом терміну експлуатації спричиняє повзучість матеріалів [1].

Як правило, різниця у вертикальних переміщеннях між двома сусідніми вертикальними елементами має тенденцію до збільшення у міру збільшення висоти будівлі. Через різницю зміни довжини вертикальних елементів горизонтальні конструкції відхиляються від проектного положення, виникають додаткові зусилля в елементах [2; 3]. Крім того, також можуть бути пошкоджені неконструктивні елементи, такі як внутрішні перегородки, інженерно-технічні мережі, оздоблення тощо. Для запобігання наслідків нерівномірного деформування необхідне розроблення заходів із компенсації згаданих ефектів.

Мета роботи – розроблення методу компенсації нерівномірних вертикальних переміщень гібридних дерево-залізобетонних багатоповерхових будівель.

**Огляд методів компенсації нерівномірних вертикальних переміщень.** Наразі відомі чотири основні методи, особливості яких полягають у такому.

*Метод абсолютної компенсації* [4] передбачає визначення та регулювання необхідної висоти на кожному рівні. Перевага методу – висока точність, проте через значну трудомісткість визначення величини компенсації та вартість виготовлення великої кількості відправкових марок він не набув поширення.

*Метод рівномірної компенсації* [5] дозволяє мінімізувати кількість поправкових значень, завдяки чому усереднюється

величини корекції відповідно до загальної кількості поверхів у будівлі. Таким чином, довжина всіх вертикальних елементів збільшується на однакову величину. Проте в такому випадку не завжди вдається досягнути необхідного зменшення різниці в укороченнях елементів.

Замість коригування довжини вертикальних елементів на кожному поверсі, згідно з *методом групової компенсації* [6] довжина вертикальних елементів збільшується на рівні окремої групи на розрахункову величину корекції для кількох поверхів, об'єднаних у цю групу. Ефективність методу компенсації залежить від кількості поверхів у групі. Відмінності між прогнозованими значеннями і значеннями укорочення після компенсації збільшуються зі збільшенням кількості поверхів у групі.

*Метод оптимальної компенсації* [7] спрямований на зменшення кількості груп поверхів у будівлі. При цьому контролюється величина нерівномірного укорочення або кут нахилу перекриття шляхом визначення межі похибок компенсації для кожного поверху, а також у кожній групі як обмеження в задачі оптимізації. Оптимальний варіант отримується застосуванням алгоритмів розв'язання задач глобальної оптимізації.

Вищенаведені методи розроблені та апробовані для конструктивних систем із залізобетонними елементами, але на їх основі можливо розробити метод компенсації для гібридних багатоповерхових будівель.

**Виклад основного матеріалу.** Компенсація нерівномірних вертикальних переміщень полягає у визначенні величини корекції висоти вертикального елемента поверху (як правило, колони).

Прогнозовану величину вертикальних переміщень елемента  $i$ -го поверху можна визначити за формулою:

$$\Delta h_i = \varepsilon_i h, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_i$  – відносна деформація колони  $i$ -го поверху;  $h$  – висота поверху, для якого визначається величина переміщень.

Відносна деформація колони  $i$ -го

поверху дорівнює сумі деформацій колони поверху, для якого визначається величина переміщень, та всіх нижче розташованих колон:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 K + \varepsilon_n. \quad (2)$$

Відповідно до методу групової компенсації для зменшення кількості марок колон вони об'єднуються у групи по декілька поверхів.

Різниця між переміщеннями (нерівномірне переміщення)  $\delta_{i,j}$   $i$ -го поверху  $j$ -ї групи визначається як різниця в прогнозованих вертикальних переміщеннях між двома елементами у суміжних прогонах:

$$\delta_{i,j} = \Delta h_{i,j}^1 - \Delta h_{i,j}^2. \quad (3)$$

Якщо кількість поверхів в  $i$ -й групі дорівнює  $n$ , то усереднене значення коригування для вертикальних елементів кожного поверху в  $j$ -й групі можна визначити таким чином:

$$c_j = \frac{\delta_{1,j} + \delta_{2,j} + K + \delta_{n,j}}{n}. \quad (4)$$

Згідно з методом абсолютної компенсації похибка між сумою середніх значень корекції та сумою величин нерівномірного переміщення для  $n$  поверхів у  $j$ -й групі має дорівнювати нулю. Проте у випадку групової компенсації, коли призначається усереднене значення коригування, похибка становитиме:

$$\xi_j = n \cdot c_j - \sum_{i=1}^n \delta_{i,j} \neq 0. \quad (5)$$

Оскільки похибка попередньої групи впливає на наступну, середнє значення корекції для вертикальних елементів кожного поверху в  $j$ -й групі обчислюватиметься так:

$$c_j = \frac{\delta_{1,j} + \delta_{2,j} + K + \delta_{n,j} + \xi_{j-1}}{n}. \quad (6)$$

Різниця у величині вертикальних переміщень для вертикального елемента на рівні  $i$ -го поверху в  $j$ -й групі з урахуванням компенсації може бути записана в такий спосіб:

$$\delta_{i,j}^c = \Delta h_{i,j}^1 - \Delta h_{i,j}^2 + c_j. \quad (7)$$

Пошук оптимальної кількості груп поверхів та кількості поверхів у групі, а також значень компенсації нерівномірних вертикальних переміщень виконується за критерієм граничної величини нерівномірних вертикальних переміщень:

$$\delta_{i,j}^c \leq [\delta_{i,j}]. \quad (8)$$

Узагальнена схема запропонованого методу наведена на рисунку.

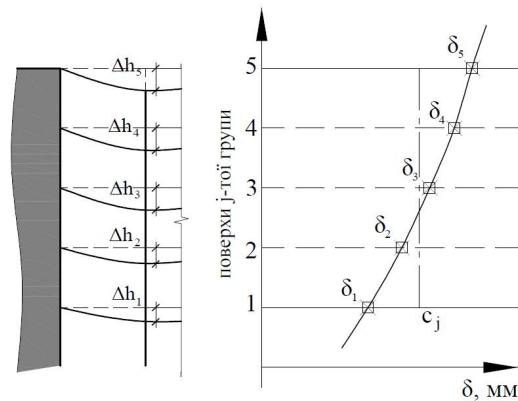


Рис. Схема методу компенсації нерівномірних вертикальних переміщень гібридних дерево-залізобетонних багатопверхових будівель

Обмеження нерівномірних вертикальних переміщень суміжних конструкцій в нормах напряму не регламентовані. Граничні величини можуть бути отримані виходячи з вимог до прогинів для елементів перекриттів та покриттів. Базовим обмеженням нерівномірних вертикальних переміщень згідно з вимогами ДСТУ Б В.1.2-3:2006 «Прогини і переміщення», регламентується співвідношення прогину до прогону, яке формулюється так:

$$[\delta_{i,j}] = \begin{cases} l/150 & \text{при } l = 3\text{ м} \\ l/200 & \text{при } l = 6\text{ м} \\ l/250 & \text{при } l = 12\text{ м} \end{cases}, \quad (9)$$

де  $l$  – довжина прогону.

Загалом запропонований метод полягає у виконанні таких операцій:

– визначаються прогнозовані величини вертикальних переміщень елементів кожного поверху та розраховується різниця в цих значеннях;

– задається початкова кількість поверхів у групі, розраховується усереднене значення коригування та нове значення різниці вертикальних переміщень;

– попередні операції виконуються доти, поки виконується умова (8), при цьому з кожним повтором збільшується кількість поверхів у групі. В момент, коли умова (8) не виконується, переходять до наступної групи поверхів.

Таким чином, визначається раціональна кількість груп поверхів та поверхів у групі, а також величина компенсації нерівномірних вертикальних переміщень, що забезпечує відповідність будівлі критеріям експлуатаційної придатності.

**Висновки.** Проаналізовано існуючі методи компенсації нерівномірних вертикальних переміщень, до яких належать абсолютна, рівномірна, групова та

оптимальна компенсації.

Із застосуванням основних положень методу групової компенсації запропоновано метод компенсації нерівномірних вертикальних переміщень гібридних дерево-залізобетонних багатоповерхових будівель, який полягає у визначенні величини корекції висоти поверхів із метою компенсації нерівномірних вертикальних переміщень протягом терміну експлуатації.

Наведено основні залежності та описано процедуру реалізації запропонованого методу. Визначено граничні величини нерівномірних вертикальних переміщень.

Подальшим напрямком досліджень бачиться апробація запропонованого методу на прикладі поперечних рам гібридних дерево-залізобетонних будівель.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шехоркіна С. Є., Буцька О. Л., Бордун М. В., Шляхов К. В. Напружено-деформований стан гібридних дерево-залізобетонних багатоповерхових будівель з урахуванням деформацій повзучості. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 3. С. 100–108.
2. Yi T., Tong X. Differential Column Shortening Effects in Typical Medium-to High-Rise Buildings. *New Horizons and Better Practices*. 2007. URL: [https://doi.org/10.1061/40946\(248\)97](https://doi.org/10.1061/40946(248)97) (дата звернення : 20.06.2020).
3. Kim H.-S., Jeong S.-H., Shin S.-H., Park J.-P. Simplified column shortening analysis of a multi-storey reinforced concrete frame. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2010. Vol. 21 (6). Pp. 405–415. URL: <https://doi.org/10.1002/tal.607> (дата звернення : 20.06.2020).
4. Woo Park S., Woon Choi S., Seon Park H. Moving average correction method for compensation of differential column shortenings in high-rise buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2011. Vol. 22 (9). Pp. 718–728. URL: <https://doi.org/10.1002/tal.722> (дата звернення : 20.06.2020).
5. Samarakkody D. I., Thambiratnam D. P., Chan T. H. T., Moragaspitaya P. H. N. Differential axial shortening and its effects in high rise buildings with composite concrete filled tube columns. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 143. Pp. 659–672. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.091> (дата звернення : 20.06.2020).
6. Cargino A., Debernardi P. G., Guiglia M., Taliano M. Axial Shortening Compensation Strategies in Tall Buildings. A Case Study: The New Piedmont Government Office Tower. *Structural Engineering International*. 2011. № 22 (1). Pp. 121–129. URL: <https://doi.org/10.2749/101686612X13216060213752> (дата звернення : 20.06.2020).
7. Park H. S. Optimal compensation of differential column shortening in high-rise buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2003. Vol. 12 (1). Pp. 49–66. URL: <https://doi.org/10.1002/tal.212> (дата звернення : 20.06.2020).

## REFERENCES

1. Shekhorkina S.Ye., Butska O.L., Bordun M.V. and Shliakhov K.V. *Napruzhenno-deformovanyi stan hibrydnykh derevo-zalizobetonnykh bahatopoverkhovykh budivel z urakhuvanniam deformatsii povzuchosti* [Stress-strain state of hybrid timber-reinforced concrete multy-storey buildings considering creep deformation]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020, no. 3, pp. 100–108. (in Ukrainian).
2. Yi T. and Tong X. Differential Column Shortening Effects in Typical Medium-to High-Rise Buildings. *New Horizons and Better Practices*. 2007. URL: [https://doi.org/10.1061/40946\(248\)97](https://doi.org/10.1061/40946(248)97) (Accessed on : 20 June 2020).
3. Kim H.-S., Jeong S.-H., Shin S.-H. and Park J.-P. Simplified column shortening analysis of a multi-storey reinforced concrete frame. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2010, vol. 21 (6), pp. 405–415. URL: <https://doi.org/10.1002/tal.607> (Accessed on : 20 June 2020).
4. Woo Park S., Woon Choi S. and Seon Park H. Moving average correction method for compensation of differential column shortenings in high-rise buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2011, vol. 22 (9), pp. 718–728. URL: <https://doi.org/10.1002/tal.722> (Accessed on : 20.06.2020).

5. Samarakkody D.I., Thambiratnam D.P., Chan T.H.T. and Moragaspiya P.H.N. Differential axial shortening and its effects in high rise buildings with composite concrete filled tube columns. *Construction and Building Materials*. 2017, vol. 143, pp. 659–672. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.091> (Accessed on: 20 June 2020).
6. Cargino A., Debernardi P.G., Guiglia M. and Taliano M. Axial Shortening Compensation Strategies in Tall Buildings. A Case Study: The New Piedmont Government Office Tower. *Structural Engineering International*. 2012, no. 22 (1), pp. 121–129. URL: <https://doi.org/10.2749/101686612X13216060213752> (Accessed on : 20 June 2020).
7. Park H.S. Optimal compensation of differential column shortening in high-rise buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2003, vol. 12 (1), pp. 49–66. URL: <https://doi.org/10.1002/tal.212> (Accessed on : 20 June 2020).

Надійшла до редакції: 30.06.2020.