

УДК 624.9

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2022.98.0.136

## ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОРТРЕТ КОНСТРУКТИВНОЇ СИСТЕМИ ЯК КРИТЕРІЙ ВАРІАНТНОГО ПРОЄКТУВАННЯ

Шмуклер В. С.<sup>1</sup>, Вознюк Л. І.<sup>2</sup>, Бережна К.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет міського господарства  
імені О. М. Бекетова

<sup>2</sup> Національний університет “Львівська політехніка”

<sup>3</sup> Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** Запропоновано використання енергетичного аналізу для опису особливостей деформування конструктивної системи, вказано критерії, які покладені в основу ВЕО-методу, що дозволяє виконувати інженерну оцінку якості запроєктованих несучих конструкцій. Для реалізації цього підходу виконано розрахунки трьох варіантів надбудови існуючої п'ятиповерхової споруди, яка виконана із збірного залізобетонного каркаса серії III-22...III-24. Як варіанти надбудови прийнято монолітний залізобетонний каркас, металевий рамний каркас, а також металевий каркас із перекриттям та покриттям сталезалізобетонною структурою нового типу. Досліджено включення у роботу зв'язків зсуву, що об'єднують верхній пояс структури із залізобетонною плитою. На основі розрахунків подано результати порівняння каркасів із різними варіантами надбудови. Представлено зіставлення полів щільності потенціальної енергії деформації у залізобетонних плитах варіантів надбудов при дії рівномірно розподіленого навантаження. Результати порівняння отриманих техніко-економічних показників для прийнятих варіантів визначили сформульовані висновки.

**Ключові слова:** енергетичний портрет, конструктивна система, щільність потенціальної енергії деформації, варіантне проєктування, ВЕО-метод.

### Вступ

Вже сьогодні можна сказати, що для післявоєнної відбудови України важливим стане фактор економічної доцільності використання сталевих несучих конструкцій при будівництві промислових та громадянських об'єктів. Особливо буде відчуватися потреба у конструкціях великих прогонів, при відновленні та будівництві автодорожніх, залізничних, пішохідних мостів, а також перекриття і покриття промислових та громадських споруд. Потрібно відзначити, що найбільш перспективним у цьому напрямку є сталезалізобетонні структурні конструкції, які мають більшу жорсткість та меншу будівельну висоту порівняно із класичними конструкціями покриття чи перекриття з ферм, що дозволяє зменшити загальну висоту будівлі та приводить до суттєвої економії при будівництві і подальшій експлуатації.

Враховуючи, що структурна конструкція є багаторазово статично невизначеною системою, то при ймовірному виключенні одного або декількох елементів із роботи, відбувається перерозподіл зусиль, що, у свою чергу, забезпечує надійність просторової конструкції і є актуальним при розрахунках на прогрес-

суюче руйнування будівель і споруд класів наслідків СС2 та СС3.

### Аналіз публікацій

Концепція, що основана на аналізі трансформації потенціальної енергії деформації твердого тіла, розподілу її щільності, може бути основою ідеології управління поведінкою конструктивної системи при її навантаженні [1]. Результатом є створені останнім часом методи формування її топології [4, 7, 8]. Крім того, ця парадигма знаходить застосування також при встановленні характеру та форми руйнування конструкції [5].

### Мета і постановка завдання

У цій статті поставлена *мета* реалізувати поширення та адаптацію проблеми варіантного проєктування.

### Енергетичний портрет конструктивної системи як критерій варіантного проєктування

Теоретичною основою підходу є введення поняття та побудова енергетичного портрету конструкції, який фундований такими критеріями [1]:

- першим: про вибір раціональних величин геометричних параметрів конструкції за умови:

$$U = \inf U(\alpha_k), k = 1, 2, 3 \dots, \quad (1)$$

де  $U$  – потенціальна енергія деформації (ПЕД);  $k$  – номер варіанта порівняння;  $\alpha \in M$ ,  $M$  – множина значень зовнішніх геометричних параметрів;

- другим: про ізоенергетичність напружено-деформованого стану конструкції, при якому:

$$e_n = \text{const}, \quad (2)$$

де  $e_n = \gamma \cdot e_u$  – нормоване значення щільності потенціальної енергії деформації (ЩПЕД), а величина  $e_u$  – гранична ЩПЕД, яка представлена третім критерієм [2,3]:

$$e_u = 0,5\psi_\varepsilon^2[(1 + \psi_\varepsilon)e_{cu} + (1 - \psi_\varepsilon)e_{tu}] + (1 - \psi_\varepsilon^2)e_{shu}, \quad (3)$$

де  $\psi_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$  – параметр Лоде-Надаї деформованого стану;

$|\varepsilon_1| \geq |\varepsilon_2| \geq |\varepsilon_3|$  – головні лінійні деформації;

$\gamma$  – статистично обґрунтований коефіцієнт запасу;

$e_{cu}, e_{tu}, e_{shu}$  – парціальні значення ЩПЕД на стиск, розтяг, зсув, які приймаються на основі відповідних діаграм деформування (вони рівні площі цих діаграм).

Критерії (1), (2), (3) у сукупності покладені в основу ВЕО-методу, за допомогою якого можна скласти інженерну оцінку якості проекту несучих конструкцій.

У зв'язку з цим розглянемо особливості реалізації цього підходу на прикладі проектування надбудови каркаса будівлі із збірного залізобетону (**постановка проблеми**). Існуюча споруда п'ятиповерхова, трипрогінна, виконана із використанням типового проекту збірного залізобетонного каркаса серії ІІІ-22...ІІІ-24. Сітка колон у поперечному напрямку має розміри (9+6+9) м, а у повздовжньому 6 м. Вузли з'єднання ригелів з колонами у площині рам жорсткі, створені за рахунок ванного зварювання арматури з подальшим бетонуванням вузла. З площини рам жорсткість будівлі забезпечується за рахунок встановлення сталевих порталних зв'язків. Зазначені рами, в сукупності зі збірним залізобетонним диском перекриття та згадуваними зв'язками, становлять несучий каркас будівлі (рис. 1, 2, 3).



Рис. 1. Загальний вигляд споруди до реконструкції



Рис. 2. Загальний вигляд існуючого каркаса після демонтажу конструкцій фасаду

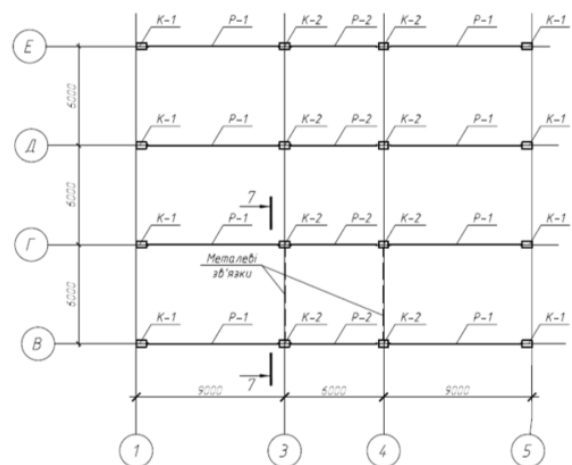


Рис. 3. Схема існуючого каркаса

Згідно із завданням необхідно розробити проект надбудови цього каркаса двома поверхами. У зв'язку з чим розглядаються три варіанти надбудови: монолітний залізобетонний каркас, металевий рамний каркас, при цьому ці дві конструктивні схеми повторюють сітку колон існуючого каркаса, а також третій варіант – металевий каркас, який містить колони, встановлені лише по периметру будівлі, та просторову сталезалізобетонну конструкцію нового типу, яка має прогін 24 м [2] (рис. 4–6).

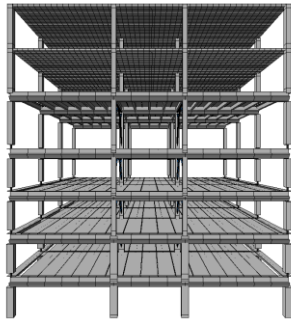


Рис. 4. Схема споруди із варіантом надбудови у монолітному каркасі

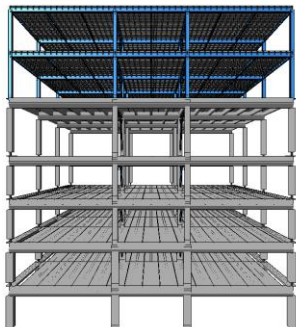


Рис. 5. Схема споруди із варіантом надбудови у сталевому каркасі із балочним перекриттям та покриттям

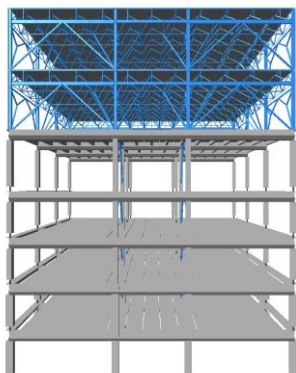


Рис. 6. Схема споруди із варіантом надбудови у сталевому каркасі із структурним перекриттям та покриттям

У якості навантажень на будівлю прийнято:

- власну вагу конструкції;
- корисне навантаження на перекриття  $3 \text{ кН/м}^2$ ;
- снігове навантаження  $1,31 \text{ кН/м}^2$ ;
- вітрове навантаження  $0,52 \text{ кН/м}^2$ ;
- сейсміка 7.

Розрахунки каркасів за вказаними варіантами виконані із використанням ПК “ЛІРА 10.6” [6]. Порівняння запропонованих рішень виконувалося шляхом зіставлення витрат матеріалів, які потрібні для надбудови, компонентів напружено-деформованого стану (НДС), а також величин введених енергетичних критеріїв. Останнє необхідне для демонстрації ефективності підходу, що постулюється.

З метою всебічного розгляду викладеного методу, а також для надання запропонованій конструкції перекриття позитивних якостей розглянемо допоміжну задачу.

Нехай дано фрагмент просторової конструкції структури у вигляді ферми, яка зчленована зв'язками зсуву із залізобетонною плитою [2] (рис. 7). Опирання ферми шарнірне за балочною схемою, прогоном 18 м. Навантаження рівномірно розподілене –  $10 \text{ кН/м}^2$ . Верхній пояс виконаний із  $\text{L}50 \times 5$ , нижній пояс із  $\text{L}100 \times 8$ , розкоси із гнутих квадратних труб  $60 \times 4$  під кутом  $45^\circ$ , товщина залізобетонної плити  $100 \text{ мм}$ , а ширина  $2 \text{ м}$ , висота структури  $1 \text{ м}$ .

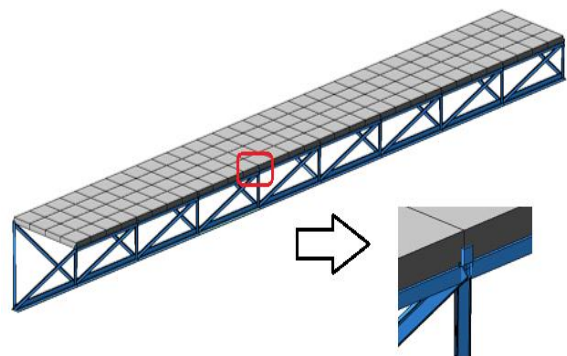
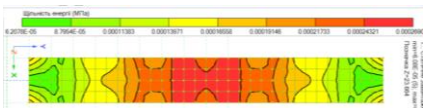
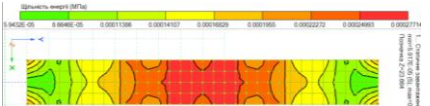

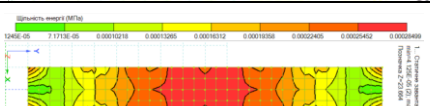
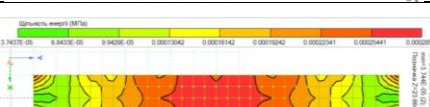

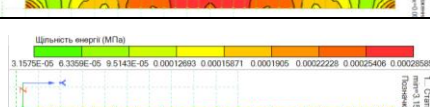
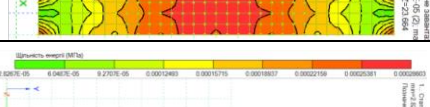
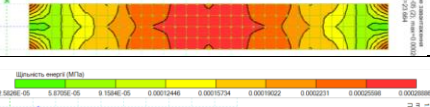
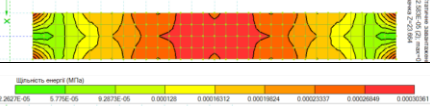
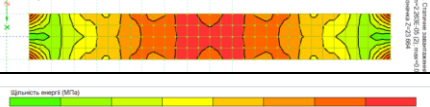
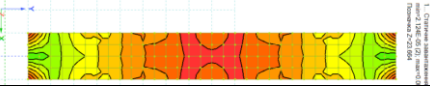


Рис. 7. До порівняння включення зв'язків зсуву в конструкції перекриття

Оцінка включення зв'язків зсуву, які забезпечують сумісну роботу залізобетонної та сталеві частин конструкції, демонструється інформацією, яка міститься у табл. 1 (кутники змінюються від  $\text{L}20 \times 4 \dots \text{L}100 \times 6$ ).

Таблиця 1 - Оцінка включення в роботу зв'язків зсуву

№ з/п	Зв'язок зсуву	ПЕД (системи), кН*м	min ПЕД у плиті, МПа	max ПЕД у плиті, МПа	Мозаїка розподілу щільності ПЕД у залізобетонній плиті
1	L20x4	7,635	6,21 E-5	0,0002690	
2	L25x4	6,910	5,94 E-5	0,0002771	
3	L35x4	6,399	5,02 E-5	0,0002831	
4	L45x4	6,218	4,12 E-5	0,0002849	
5	L50x4	6,166	3,74 E-5	0,0002854	
6	L50x6	6,120	3,36 E-5	0,0002857	
7	L56x5	6,098	3,15 E-5	0,0002858	
8	L63x5	6,063	2,82 E-5	0,0002860	
9	L70x5	6,037	2,58 E-5	0,0002888	
10	L80x6	6,004	2,26 E-5	0,0003036	
11	L90x6	5,990	2,12 E-5	0,0003107	
12	L100x6	5,981	2,03 E-5	0,000316	

Як видно із табл. 1, результати розрахунку повністю відповідають фізичній стороні проблеми і достатньо точно демонструють репрезентативність та доцільність енергетичного аналізу. Так, збільшення жорсткості

зв'язків зсуву приводить до вирівнювання полів ЩПЕД, зменшення її пікових значень, розвантаження стиснутих поясів і т.ін.

Перераховане вище дає підставу для експлуатації наданої ідеології при порівнянні розглянутих варіантів надбудов (табл. 2, 3, 4).

Таблиця 2 – Результати порівняння варіантів надбудови

№ з/п	Показники надбудови 2-х пов.	Монолітний каркас	Сталевий каркас із балочним перекриттям та покриттям	Сталевий каркас із структурним перекриттям та покриттям
1	Загальна маса каркаса, т	469,2	222,314	198,33
2	Загальна витрата металу, т	-	32,76	29,85
3	Маса перекриття, т	210,6	107,65	94,06
4	Маса 1 м <sup>2</sup> перекриття, т/м <sup>2</sup>	0,48	0,26	0,22
5	Витрата металу на перекриття, т	-	12,57	9,82
6	Витрата металу на 1 м <sup>2</sup> перекриття, т/м <sup>2</sup>	-	0,030	0,023
7	Маса покриття, т	210,6	106,67	93,44
8	Маса 1 м <sup>2</sup> покриття, т	0,48	0,25	0,22
9	Витрата металу на покриття, т	-	11,90	9,20
10	Витрата металу на 1 м <sup>2</sup> покриття, т/м <sup>2</sup>	-	0,028	0,022

Таблиця 3 – Результати порівняння каркасів із різними варіантами надбудови

№ з/п	Показники	Варіанти надбудови		
		монолітний каркас	сталевий каркас із балочним перекриттям та покриттям	сталевий каркас із структурним перекриттям та покриттям
1	2	3	4	5
1	Горизонтальне переміщення каркаса по X від вітрового навантаження (у рамі), мм	11,5	12,1	8,52
2	Горизонтальне переміщення каркаса по Y від вітрового навантаження (з площини рами), мм	69,9	63,7	64,9
3	Горизонтальне переміщення каркаса по X від (сейсміка 7), у рамі, мм	10,7	5,4	3,94
4	Горизонтальне переміщення каркаса по Y від (сейсміка 7), з площини рами, мм	23,7	37,6	22,2
5	Період вільних коливань (1-ша форма), с	2,2437	1,797	1,7016
6	Частота вільних коливань (1-ша форма), Гц	0,4456	0,557	0,588
7	Завантаження 1 (власна вага) ПЕД (робота зовнішніх сил), кН·м	26,12	16,81	14,12
8	Завантаження 2 (постійне + довготривале навантаження) ПЕД (робота зовнішніх сил), кН·м	61,83	65,68	55,64
9	Завантаження 3 (корисне навантаження) ПЕД (робота зовнішніх сил), кН·м	13,43	15,88	14,14
10	Завантаження 4 (вітер по X) ПЕД (робота зовнішніх сил), кН·м	1,48	1,53	1,84
11	Завантаження 5 (вітер по Y) ПЕД (робота зовнішніх сил), кН·м	16,25	16,43	27,24


Закінчення табл. 3

1	2	3	4	5	
12	Завантаження 6 (сейсміка 7, по X) ПЕД (робота зо- внішніх сил), кН·м	1-форма	1,679	1,373	1,358
		2-форма	0,6328	0,5385	0,6541
		3-форма	2,722	2,517	2,531
		4-форма	0,004615	0,0005623	0,00058
		5-форма	0,05641	0,04402	0,03161
		6-форма	0,1873	0,1869	0,03822
13	Завантаження 7 (сейсміка 7, по Y) ПЕД (робота зо- внішніх сил), кН·м	1-форма	5,679	5,106	5,079
		2-форма	0,2932	0,2575	0,2878
		3-форма	0,8525	0,7249	0,6993
		4-форма	0,1898	0,1449	0,1244
		5-форма	0,02584	0,03469	0,01212
		6-форма	0,023	0,01709	0,00084

Таблиця 4 – Розподіл ЦПЕД у плитах перекриття варіантів надбудов

№ з/п	Варіант перекриття надбудови	ПЕД у плиті (фонове значення), МПа	Мозаїка розподілу ЦПЕД у залізобетонній плиті перекриття при дії рівномірно розподіленого навантаження від власної ваги
1	2	3	4
1	Монолітний каркас	4,081 E-7	
2	Сталевий каркас із балочним перекриттям та покриттям	6,23 E-7	

Закінчення табл. 4

1	2	3	4
3	Сталевий каркас із структурним перекриттям та покриттям	2,51 E-7	

Аналіз результатів розрахунків, які наведені у табл. 2, 3 та 4, дозволяє зробити деякі **висновки:**

- енергетичний портрет системи достатньо повно відображає її позитивні характеристики;
- оцінка зовнішніх параметрів запропонованих варіантів на основі зіставлення величин ПЕД уявляється достатньою мірою репрезентативною та умовно інтегральною;
- використання просторової сталезалізобетонної конструкції перекриття приводить до суттєвого вирівнювання полів щільності потенціальної енергії деформації;
- забезпечення ізоенергетичності НДС (оцінка внутрішніх параметрів) підвищує рівень надійності конструкції;
- вивчення полів щільності потенціальної енергії в межах експлуатації ВЕО-методу дозволяє судити про характер і ступінь віртуального руйнування системи.

**Резюме:** Енергетичний аналіз поведінки конструктивної системи, при дії сукупності навантажень різного характеру, є ефективною процедурою при оцінці й експертизі проектних рішень (варіантне проектування), їх раціональності і побудові прогнозу довговічності. Остаточне викладене дозволяє констатувати факт інтегральної позитивності використання запропонованої конструкції у складі системи надбудови поверхів. Причому, дана обставина стосується як вільного об'ємно-планувального рішення надбудованих поверхів будівлі, так і надійності конструкції та її економічної доцільності.

### Література

1. Васильков Г.В. Эволюционные задачи строительной механики. Синергетическая парадигма. Ростов-на-Дону: Инфосервис, 2003.
2. V. Babaev, I. Ievzerov, S. Evel, A. Lantoukh-Liashchenko, V. Shevetovsky, O. Shimanovskyi, V. Shmukler, M. Sukhonos. Rational Design of Structural Building Systems. ISBN 978-3-86922-733-7. 2019 by Dom Publishers, Berlin/Germany - [www.dom-publishers.com](http://www.dom-publishers.com)
3. Бабаев В.М., Бугаєвський С.О., Євель С.М., Євзеров І.Д., Латнук-Лященко А.І., Шеветовський В.В., Шимановський О.В., Шмуклер В.С. Чисельні та експериментальні методи раціонального проектування та зведення конструктивних систем. Київ: Сталь, 2017.
4. Шмуклер В.С. Біоніко-енергетична раціоналізація будівельних систем. *Тренди та тенденції розвитку будівельної галузі: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (18-19 листопада 2020 р.)*. 2020. С.12-13.
5. Шмуклер В.С., Резнік П.А., Мохамад А. Про одну можливість оцінювання прогресивного обвалення конструкцій при пожежі. *Збірник наукових праць УкрД46шУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2020. Вип. 191. С. 37-48. <http://csw.kart.edu.ua/article/view/217291>
6. ЛІРА 10.6: Розрахунок та проектування конструкцій. <https://lira10.com/uk>
7. Zuo, Z.H., Xie, Y.M. & Huang, X. Combining genetic algorithms with BESO for topology optimization. *Struct Multidisc Optim* 38, 511–523 (2009).
8. Tcherniak D. Topology optimization of resonating structures using SIMP method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2002. Vol.54(11). p.1605 — 1622.

### References

1. Vasylykov H.V. Evoliutsyonnye zadachy stroytelnoy mekhanyky. Synerhetycheskaia paradyhma. Rostov-na-Donu: Ynfoservys; 2003. 42 [in russian].

2. V. Babaev, I. Ievzerov, S. Evel, A. Lantoukh-Liashchenko, V. Shevetovsky, O. Shimanovskiy, V. Shmukler, M. Sukhonos. Rational Design of Structural Building Systems. ISBN 978-3-86922-733-7. 2019 by Dom Publishers, Berlin/Germany - [www.dom-publishers.com](http://www.dom-publishers.com)
3. Babaiev V.M., Buhaiievskiy S.O., Yevel S.M., Yevzerov I.D., Latnukh-Liashchenko A.I., Shevetov-skiy V.V., Shymanovskiy O.V., Shmukler V.S. Chyselni ta eksperymentalni metody ratsionalnoho proektuvannya ta zvedennia konstruktyvnykh system. Kyiv: Stal; 2017. 42 [in Ukrainian].
4. V.S. Shmukler Bioniko-enerhetychna ratsionalizatsiia budivelnykh system. Materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Trendy ta tendentsii rozvytku budivel-noi haluzi» 18-19 lystopada 2020. s.12-13 [in Ukrainian].
5. Shmukler V.S., Reznik P.A., Mokhamad A. Pro odnu mozhlyvist otsiniuvannya prohresyvnoho obvalennia konstruktsii pry pozhezhi // Zbir-nyk naukovykh prats UkrD46shUZT. Kharkiv: UkrDUZT, 2020. Vyp. 191. S. 37-48. <http://csw.kart.edu.ua/article/view/217291> [in Ukrainian].
6. LIRA 10.6: Calculation and design of structures. <https://lira10.com/uk>
7. Zuo, Z.H., Xie, Y.M. & Huang, X. Combining genetic algorithms with BESO for topology optimization. Struct Multidisc Optim 38, 511–523 (2009).
8. Tcherniak D. Topology optimization of resonating structures using SIMP method. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2002.Vol.54(11). p.1605 — 1622.

**Шмуклер Валерій Самуїлович**<sup>1</sup>, д.т.н., професор, зав. каф. будівельних конструкцій, e-mail: [v\\_shmukler@hotmail.com](mailto:v_shmukler@hotmail.com),

**Вознюк Леонід Іванович**<sup>2</sup>, к.т.н., старший викладач каф. архітектурного проектування та інженерії e-mail: [vozniukleonid@gmail.com](mailto:vozniukleonid@gmail.com)

**Бережна Катерина Вікторівна**<sup>3</sup>, к.т.н., доц. каф. мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В.О. Російського, e-mail: [beregna@gmail.com](mailto:beregna@gmail.com)

<sup>1</sup> Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17 м. Харків, 61002, Україна

<sup>2</sup> Національний університет «Львівська політехніка», 79000, Україна, м. Львів, вул. Степана Бандери, 12.

<sup>3</sup> Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна,

### Energy portrait of the structural system as a criteria for option design

**Abstract. Problem.** The article proposes the use of energy analysis to describe the deformation characteristics of the structural system, and specifies the criteria that form the basis of the BEO method,

which allows for an engineering assessment of the quality of the designed load-bearing structures. **Goal.** The goal is to implement the spread and adaptation of the variant design problem. The theoretical basis of the approach is the construction of an energy portrait of the structure. **Methodology.** To implement this approach, calculations were made for three variants of the superstructure of the existing five-story building, which is made of a prefabricated reinforced concrete frame of the II-22...II-24 series. A monolithic reinforced concrete frame, a metal frame, as well as a metal frame with an overlap and covered with a steel-reinforced concrete structure of a new type are adopted as superstructure options. In order to comprehensively consider the described method, as well as in order to give the proposed structure of the overlap positive qualities, an auxiliary task was additionally considered, namely, the inclusion of shear ties connecting the upper belt of the structure with a reinforced concrete slab. **Results.** The comparison of the proposed solutions was carried out by comparing the consumption of materials required for the superstructure, components of the stress-strain state, as well as the values of the introduced energy criteria. **Originality.** On the basis of calculations, the results of the comparison of frames with different superstructure options are presented. A comparison of the potential energy density fields of deformation in reinforced concrete slabs of superstructure variants under the action of a uniformly distributed load is presented. The results of the comparison of the received technical and economic indicators for the accepted options determined the formulated conclusions. **Practical value.** Energy analysis of the behavior of the structural system, under the action of a set of loads of different nature, is an effective procedure for evaluating and examining project solutions (variant design), their rationality, and building a durability forecast.

**Key words:** energy portrait, structural system, potential energy density of deformation, variant design, BEO method.

**Shmukler Valeriy S**<sup>1</sup>, Dr. of sciences, professor department of building structures, e-mail: [v\\_shmukler@hotmail.com](mailto:v_shmukler@hotmail.com)

**Vozniuk Leonid I**<sup>2</sup>, Ph.D., senior lecturer department of architectural design and engineering, e-mail: [vozniukleonid@gmail.com](mailto:vozniukleonid@gmail.com)

**Berezhna Kateryna V**<sup>3</sup>, Ph.D., associate professor department of bridges and structures and structural mechanics, e-mail: [beregna@gmail.com](mailto:beregna@gmail.com)

<sup>1</sup> O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, Marshal Bazhanov Street, Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>2</sup> Lviv Polytechnic National University, 12, Stepana Bandery str., Lviv, 79000, Ukraine.

<sup>3</sup> Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.