

УДК 539.6

## АДЕКВАТНІСТЬ І МОЖЛИВОСТІ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ СПОРУДИ МІЖНАРОДНОГО ВИСТАВКОВОГО ЦЕНТРУ ДЛЯ ДИНАМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Віктор Гайдайчук, Олег Дєдов, Костянтин Котенко

Київський національний університет будівництва і архітектури,  
03680, Повітрофлотський просп., 31, Київ, Україна, e-mail: viktor\_gaydaychuk@bigmir.net

## ADEQUACY AND POSSIBILITIES FINITE-ELEMENT MODELS OF BUILDING'S INTERNATIONAL EXHIBITION CENTER

Victor Gaidaychuk, Oleg Dedov, Konstantin Kotenko

Kyiv National University of Construction and Architecture,  
03680, Povitroflotsky Prospect, 31, Kyiv, Ukraine, e-mail: viktor\_gaydaychuk@bigmir.net

**АНОТАЦІЯ.** Наведено приклад вдосконалення моніторингу будівельних об'єктів за допомогою математичного моделювання. Описуються результати перевірки можливості практичного використання створеної скінченно-елементної моделі конкретної споруди.

**Ключові слова:** скінченно-елементна модель будівельної споруди, напружено-деформований стан, статичні та динамічні характеристики, частота власних коливань.

**АННОТАЦИЯ.** Приведен пример усовершенствования мониторинга строительных объектов с помощью математического моделирования. Описываются результаты проверки возможности практического использования разработанной конечно-элементной модели конкретного сооружения.

**Ключевые слова:** конечно-элементная модель сооружения, напряжено-деформированное состояние, статические и динамические характеристики, частота собственных колебаний.

**ABSTRACT. Purpose.** Verification of the adequacy of created finite element model. The objective of the study is to assess the objectivity of the reflection of the finite-element models of the actual technical condition of the construction structures, the determination of the efficiency of use in models of indicators of static and dynamic characteristics of the structure, the assessment of the sensitivity of response to models for changes in the technical condition of the construction, and other. The purpose of the study is to identify the feasibility of the practical use of the created finite element model in the integrated system of dynamic monitoring of the large-scale construction of the International Exhibition Center. **Methodology/approach.** The computational and experimental analysis of finite-element model of IEC building was established. **Findings.** Adequacy and appropriateness of its practical use was installed.

**Key words:** Finite element model of the structure, stress-strained state, static and dynamic characteristics, natural frequency.

### ВСТУП

Сучасний стан теорії і практики моніторингу будівельних об'єктів має недостатню ефективність існуючих моніторингових систем і потребує розвитку цієї галузі контролю [1-3]. Одним із напрямків може бути використання математичного моделювання будівельних споруд в їх моніторингових системах [4-6, 10]. Даний підхід був використаний авторами [6, 7] при створенні скінченно-елементної моделі великорозмірної будівельної споруди Міжнародного виставкового центру (МВЦ).

Розроблена модель відтворює конструк-

ційні і експлуатаційні особливості споруди, вплив на неї внутрішніх та зовнішніх факторів та інше. Вона розрахована на можливість оперативної оцінки технічного стану конструкцій в реальному часі і дозволяє отримати величини показників статичних і динамічних характеристик споруди, її деформації та інше. Розрахунки виконуються за допомогою програмних комплексів NASTRAN і SCAD. Практично створено дві скінченно-елементні моделі.

Разом з тим інженерна практика показує [7], що створені таким чином моделі потребують верифікації на об'єктивність відображення ними реального стану споруди і при необхідності підлягають коригуванню.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Завдання дослідження полягає в оцінці об'єктивності відображення створеними скінченно-елементними моделями реально-го технічного стану конструкцій будівельної споруди, визначенні ефективності використання в моделях показників статичних і динамічних характеристик споруди, оцінці чутливості реагування моделями на зміни в технічному стані споруди та інше.

## МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є виявлення можливості практичного використання створеної скінченно-елементної моделі в комплексній системі динамічного моніторингу велико-розмірної будівельної споруди МВЦ.

## ВИКЛАД ЗМІСТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження виконувались розраунковим і експериментальним методами, визначались величини показників статичних і динамічних характеристик за допомогою скінченно-елементних моделей в програмних комплексах NASTRAN і SCAD. Отримані величини статичних і динамічних показників порівнювались між собою та з результатами натурних вимірювань. Оціночним критерієм була збіжність аналогічних показників в програмних комплексах і їх відповідність натурним вимірюванням. Вважалось, що збіжність таких показників, визначених в обох програмних комплексах, характеризує адекватність скінченно-елементної моделі, а натурні результати підтверджують або відхиляють правильність цього міркування.

Для аналізу статичних характеристик (осьових зусиль) була вибрана великопрольотна (60 м) підкроквяна ферма ПФБ (рис. 1). В розрахунках використовувалось найбільш несприятливе сполучення навантажень із наведених в табл. 1, 2.

Окремо обома програмними комплексами розраховувались максимальні та мінімальні переміщення вузлів скінчених елементів уздовж осі Z (вертикальні прогини).

Розрахунки виконувались при різних сполученнях навантажень (див. табл. 2). Аналіз отриманих результатів показує, що зусилля в елементах підкроквяної ферми (табл. 3) мало відрізняються за величинами в результатах обох програмних комплексів SCAD і NASTRAN. Максимальна різниця (2,14%) виявлена в розтягнутому розкосі 9 (див. рис. 1), а мінімальна (0,23%) в стисненому стояку (4). Мало відрізняються і величини переміщень (табл. 4). Як видно, найбільша різниця величин мінімальних переміщень 3,03% зафіксована при завантаженні власною вагою та при завантаженнях C1-C5 (3,59%), а найменша (2,45%) при сніговому навантаженні. Мінімальна різниця максимальних переміщень (0,4%) отримана при сполученнях навантажень C4 і C8.

**Таблиця 1.** Навантаження в скінченно-елементній моделі

**Table 1.** Load in a finite-element model

Номер	Навантаження
L1	Власна вага
L2	Власна вага огорожуючи конструкцій (покриття, стінового огороження)
L3	Технологічне (вага обладнання)
L4	Корисна (вага людей та обладнання в зонах обслуговування покрівлі)
L5	Снігове
L6	Вітрове по осі X
L7	Вітрове проти осі X
L8	Вітрове проти осі Y
L9	Вітрове по осі Y

**Таблиця 2.** Сполучення навантажень

**Table 2.** Combinations of the loads

Номер	Сполучення (комбінація) навантажень
C1	$1,0(L1)+1,0(L2)+0,95(L3)+0,9(L5)+0,9(L6)$
C2	$1,0(L1)+1,0(L2)+0,95(L3)+0,9(L5)+0,9(L7)$
C3	$1,0(L1)+1,0(L2)+0,95(L3)+0,9(L5)+0,9(L8)$
C4	$1,0(L1)+1,0(L2)+0,95(L3)+0,9(L5)+0,9(L9)$
C5	$C1*1.25$
C6	$C2*1.25$
C7	$C3*1.25$
C8	$C4*1.25$

Динамічні характеристики представлені величинами частот і формами власних коливань. Аналізувались три перші частоти

власних коливань, характеризуючих цілісний стан споруди [8, 9].

Дієздатність моделі характеризувалась

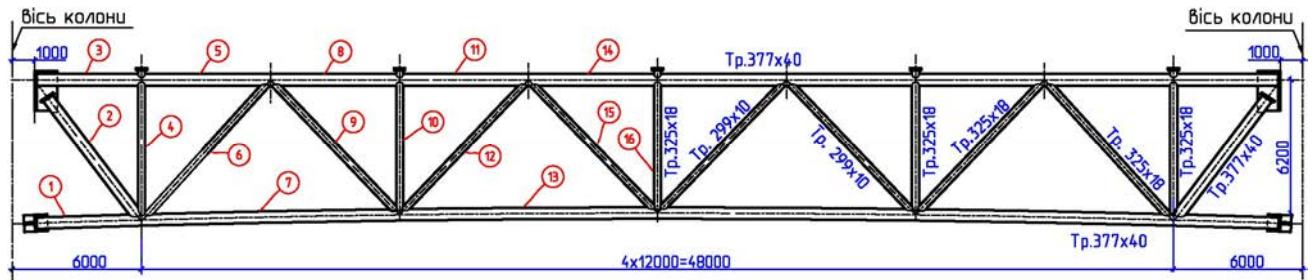


Рис. 1. Ферма підкроквяна ПФ-6

Fig. 1. Subframe farm PF-6

**Таблиця 3.** Порівняння зусиль в елементах підкроквяної ферми ПФ-6 під дією сполучення навантажень С1, розрахованих у програмних комплексах SCAD та NASTRAN

**Table 3.** Comparison of efforts in the elements of the subframe farm PF-6 under the action of the coupling of loading C1 are calculated in the software complexes SCAD and NASTRAN

Номер	Навантаження та сполучення навантажень	Переміщення вузлів по Z, (мм) (вертикальні прогини)			
		SCAD		NASTRAN	
		min	max	min	max
L1	Власна вага	-37.04	7.59	-34.86	7.48
L5	Снігове	-127.05	28.57	-133.41	28.32
C1	$1,0x(L1)+1,0(L2)+0,95(L3)+0,9(L5)+0,9(L6)$	-174.04	39.24	-187.00	39.86
C2	$1,0x(L1)+1,0(L2)+0,95(L3)+0,9(L5)+0,9(L7)$	-174.46	39.39	-187.26	39.92
C3	$1,0x(L1)+1,0(L2)+0,95(L3)+0,9(L5)+0,9(L8)$	-182.41	41.14	-193.37	41.26
C4	$1,0x(L1)+1,0(L2)+0,95(L3)+0,9(L5)+0,9(L9)$	-182.75	41.22	-193.01	41.19
C5	C1*1.25	-217.55	49.05	-233.75	49.83
C6	C2*1.25	-218.08	49.24	-234.08	49.90
C7	C3*1.25	-228.01	51.42	-241.71	51.57
C8	C4*1.25	-228.44	51.53	-241.27	51.49

**Таблиця 4.** Переміщення вузлів по Z, мм, в моделях, створених у SCAD та NASTRAN

**Table 4.** Moving nodes by Z, mm in models created with SCAD and NASTRAN

Поздовжні зусилля в елементах ферми							
№ елемента	SCAD	NASTRAN	Різниця, %	№ елемента	SCAD	NASTRAN	Різниця, %
	Зусилля N, т	Зусилля N, т			Зусилля N, т	Зусилля N, т	
1	-99,00	-100,51	0,75	9	187,38	195,58	2,14
2	261,52	271,46	1,87	10	-81,80	-84,97	1,89
3	-86,90	-84,85	1,19	11	-302,77	-311,43	1,40
4	-73,55	-73,89	0,23	12	72,39	75,85	2,33
5	-75,23	-73,66	1,05	13	341,32	351,92	1,45
6	-200,08	-207,70	1,86	14	383,55	395,04	1,47
7	173,91	176,94	0,86	15	57,66	59,31	1,41
8	-313,69	-311,43	0,36	16	-73,39	-76,01	1,79

оперативністю реагування моделлю на зміни в напружено-деформованому статі споруди, діапазоном розрахункових показників, можливістю виконання окремих практичних завдань та функціонуванням в системі моніторингу. Збіжність засвідчили і величини характеристик власних коливань (табл. 5).

**Таблиця 5.** Частоти власних коливань  
**Table 5.** Frequencies of natural vibrations

Номер тона частоти	Частота власних коливань, Гц		
	Розрахункова за даними результатів розрахунків у програмних комплексах		Експериментальна за даними натурних вимірювань
	SCAD	NASTRAN	
1	0.506289	0.492079	0.49-0.51
2	0.556190	0.53825	0.53-0.57
3	0.660833	0.66865	0.66-0.69

Максимальна різниця між результатами, отриманими в комплексах NASTRAN і SCAD, виявилась в показниках другої частоти і становить 1,63%. Співпали і форми коливань. В модальному аналізі при визначенні параметрів власних частот навантаження від власної ваги огорожувальних конструкцій L2 та технологічне навантаження L3 у програмному комплексі NASTRAN приєднувались до основної маси конструкції через неконструкційні маси, а у програмному комплексі SCAD за рахунок приєднання та перетворення статичних навантажень L2 і L3 в маси.

Натурні величини власних частот і напрямки коливань фіксувались сейсмостанцією ZET 048-C (технічні дані наведені у табл. 6), яка була встановлена на позначці +13,860 м внутрішньої несучої колони K1, розташованої на перетині літерної осі Г з цифровою віссю 2. Виміри та розшифровка отриманих результатів виконувались за методикою Київського національного університету будівництва і архітектури.

Експериментально вимірювались віброприскорення несучих конструкцій в реальному часі з подальшою їх обробкою та ви-

**Таблиця 6.** Технічні характеристики сейсмостанції ZET 048C

**Table 6.** Specifications of the seismic station ZET 048C

Тип датчиків	диференціальні
Число вимірюваних координат	3 (X, Y, Z)
Параметр вимірювання	віброприскорення
Робочий діапазон, Гц	від 0,3 до 400
Чутливість	не більше $10^{-5}$ м/с <sup>2</sup>
Основна відносна похибка, %	не більше ±10
Робоча температура, °C	від -30 до +50

значенням величин власних коливань споруди. Зареєстровані віброграми коливань оброблялись програмним забезпеченням ZETLAB SEISMO за допомогою спектрального аналізу методом дискретного перетворення Фур'є. Отримані спектри (рис. 2) були проаналізовані з метою визначення числових значень частот коливань, які відповідають основним пікам на спектрограмах та є наслідком відгуку конструкції на зовнішні джерела динамічної дії. Чутливість реагування моделлю на зміни динамічного характеру в деформованому стані конструкції оцінювалась за величиною трьох перших власних частот основного тону коливань. Перевірявся степінь впливу таких негативних факторів, як послаблення жорсткості з'єднань основних несучих колон з фундаментом і просідання ґрунтової основи під колонами, розташованими на перетинах літерних осей Г і Д та цифрової осі 4 відповідно. Також перевірявся вплив появи пластичного шарніру в місцях жорсткого з'єднання ферми з колонами. Такі фактори мають місце в реальних конструкціях [7] і не виключається можливість їх появи в споруді, що аналізується.

Отримані результати показують, що розроблена модель чутливо реагує на зміни в працездатному стані конструкції та оперативно інформує про них відповідні служби. Але слід відзначити, що умовні порушення споруди, приведені вище, є значними.



**Рис. 2.** Спектр власних коливань споруди МВЦ

**Fig. 2.** The spectrum of natural vibrations of the IEC building

Сама модель є досить універсальною. Вона дозволяє надавати інформацію про абсолютні величини поздовжніх сил, моментів, поперечних сил, переміщень вузлів, стійкості елементів залежно від сполучення діючих навантажень, розраховувати власні частоти, визначати моніторингові точки конструкції, виконувати інші практичні завдання.

Однак, не дивлячись на універсальність, користування скінченно-елементною моделлю потребує практичних навиків та спеціальної кваліфікації персоналу експлуатаційних служб.

## ВИСНОВКИ

Розроблені скінченно-елементні моделі споруди МВЦ є параметризованими і мають універсальний характер, реально відображають напружено-деформований стан споруди та окремих її конструкцій. Моделі є адекватними пред'явленим вимогам. Їх використання дозволяє отримувати своєчасну інформацію відносно змін технічного стану будівлі та оперативно виконувати невідкладні практичні завдання.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної

безпеки будівельних споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2-14:2009.- [Чинний від 2009-12-01]. – К.: Мінрегіон України, 2009. – 43 с. - (Будівельні норми України).

2. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування: ДБН В.1.2-2:2006. – [Чинний від 2007-01-01]. – К.: Мінрегіон України 2006. – 94 с. – (Будівельні норми України).
3. Автоматизовані системи раннього виявлення загрози виникнення надзвичайних ситуацій та оповіщення населення: ДБН В.2.5-76:2014. – [Чинні від 2014-06-01]. – К.: Мінрегіон України, – 2014. – 38 с. – (Будівельні норми України).
4. Белостоцкий А.М. Прогнозное математическое моделирование состояния и техногенной безопасности ответственных объектов и комплексов мегаполиса. // Вестник МГСУ, – №3, – 2006. – С. 40-61.
5. Сукач М.К. Перша міжнародна науково-практична конференція «Підводні технології, 2015». Підводні технології, – № 01, – 2015, – С. 3-12.
6. Гайдайчук В.В., Котенко К.Е., Ткаченко І.А. Математичний метод діагностики технічного стану великорозмірної будівельної споруди. East European Scientific Journal. – No. 1(17), – 2017. – С. 105-114.
7. Белостоцкий А.М., Каличава Д.К. Адаптируемые конечно-элементные модели на основе динамического мониторинга несущих конструкций высотных зданий. Часть 1: Ос-

нова разработанной расчётно-экспериментальной методики. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering 8(4). – 2012. – С. 19-27.

8. *Гайдайчук В.В., Котенко К.Е., Ткаченко І.А.* Комплексний моніторинг технічного стану великорозмірної будівельної споруди. Підводні технології. – № 05. – 2017. – С. 61-66.
9. *Савин С.Н., Демішин С.В., Ситников І.В.* Мониторинг уникальных объектов с использованием динамических параметров по ГОСТ Р 53778-2010., Magazine of Civil Engineering. – №7. – 2011. – С. 33-39.
10. *Гайдайчук В.В., Котенко К.Э.* XXVII-XXVIII международная научно-практическая конференция «Роль науки в развитии социума: Теоретические и практические аспекты» Журнал Национальной ассоциации ученых, – № 1 (27-28), – 2017. – С. 35-37.

#### REFEENCES

1. *DBN B.1.2-14. 2009.* Systema zabezpechennja nadijnosti ta bezpeky budivel'nyh ob'ektiv. Zagal'ni pryncypu zabezpechennja nadijnosti ta konstruktyvnoi' bezpeky budivel'nyh sporud, budivel'nyh konstrukcij ta osnov [System reliability and safety of construction projects. Loads and impacts. Design standards.]. Ministry of Construction of Ukraine. Kyiv, 75. (in Ukrainian).
2. *DBN B.1.2-2. 2006.* Systema zabezpechennja nadijnosti ta bezpeky budivel'nyh ob'ektiv. Navantazhennja i vplyvy. [System reliability and safety of construction projects. Loads and impacts. Design standards.] Ministry of Construction of Ukraine. Kyiv, 75. (in Ukrainian).
3. *DBN B.2.5-76. 2014.* Avtomatyzovani systemy rann'ogo vyjavlennja zagrozy vynyknennja nadzvychajnyh situacij ta opovishhennja naselennja [National Structural Rules and Regulations The automated systems of the early detection threats of the origin emergencies and notification the population.] Ministry of Regional Development of Ukraine. Kyiv, 38. (in Ukrainian).
4. *Belostotsky A.M. 2006.* Prognoznoe matematicheskoe modelirovanie sostojanija i tehnogennoj bezopasnosti otvetstvennyh ob'ektov i kompleksov megalopolisa. [Predictive Mathematical Modelling of Technological Safety of Critical Objects and Complexes of megalopolis.] Bulletin MSUCE, 3, 40-61. (in Russian).
5. *Sukach M.K. 2015.* Persha mizhnarodna naukovo-praktychna konferencija «Pidvodni tehnologii', 2015». [First international scientifically-practical conference «Underwater technologies, 2015»]. Underwater technologies, Vol. 01, 3-12. (in Ukrainian).
6. *Gaidaychuk V. V., Kotenko K. E., Tkachenko I.A. 2017.* Matematychnyj metod diagnostyky tehničnogo stanu velykorozmirnoi' budivel'noi' sporudy. [Mathematical method of diagnostic technical condition of the large-scale building structure.]. East European Scientific Journal, No.1(17), 105-114. (in Ukrainian).
7. *Belostotsky A.M., Kalychava D.K. 2012.* Adaptivnyye konečno-jelementnye modeli na osnove dinamicheskogo monitoringa nesushhih konstrukcij vysotnyh zdaniy. Chast' 1: Osnova razrabotannoj raschetno-jeksperimental'noj metodiki. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. [Adaptive Finite Element Models as the Basis of Dynamic Monitoring of Tall Buildings. Part 1. Theoretical basis of the developen technique. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering], No.8(4), 19-27. (in Russian).
8. *Gaidaychuk V.V., Kotenko K.E. Tkachenko I.A., 2017.* Kompleksnij monitoring tehničnogo stanu velykorozmirnoi' budivel'noi' sporudi. [Integrated monitoring the technical condition of large-scale building structure.] Underwater technologie, No.5, 61-66.
9. *Savin S.N., Demishin S.V., Sitnikov I.V. 2011.* Monitoring unikal'nyh obektov s ispol'zovaniem dinamicheskikh parametrov po GOST R 53778-2010 [Monitoring of unique buildings with using of dynamic parameters according to GOST R 53778-2010]. Magazine of Civil Engineering, No.7, 33-39. (in Russian)
10. *Gaidaychuk V.V., Kotenko K.E. 2017.* XXVIII mezhdunarodnoja nauchno-praktycheskaja konferencija «Rol' nauky v razvytyy socyuma: Teoretycheskye y praktycheskye aspekty» [XXVII-XXVIII international scientifically-practical conference «The role of science in the development of society: Theoretical and practical aspects»]. Journal of National Association of Scientists, No.1 (27-28), 35-37. (in Russian).