

СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИЙ МОНІТОРИНГ КОНСТРУКЦІЙ МІЖНАРОДНОГО ВИСТАВКОВОГО ЦЕНТРУ

Вашіліна О.В., кандидат фізико-математичних наук. Національний транспортний університет, Київ, Україна

Борщ О.І., кандидат технічних наук Національний транспортний університет, Київ, Україна

Котенко К.Е., Національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна

Ткаченко І.А., Міжнародний виставковий центр, Київ, Україна

FINITE-ELEMENT MONITORING OF STRUCTURES OF INTERNATIONAL EXHIBITION CENTER

Vashchilina O.V., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine

Borshch O.I., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine

Kotenko K.E., National University of Building and Architecture, Kyiv, Ukraine

Tkachenko I.A., International Exhibition Center, Kyiv, Ukraine

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ МОНИТОРИНГ КОНСТРУКЦИЙ МЕЖДУНАРОДНОГО ВЫСТАВОЧНОГО ЦЕНТРА

Ващилина Е.В., кандидат физико-математических наук. Национальный транспортный университет, Киев, Украина

Борщ Е.И., кандидат технических наук. Национальный транспортный университет, Киев, Украина

Котенко К.Э., Национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина

Ткаченко И.А., Международный выставочный центр.

Постановка проблеми.

Безпека об'єкта, як правило, повинна забезпечуватися шляхом реалізації принципу ешелонування захисту, який базується на використанні бар'єрів, що послідовно включаються в роботу, функціонують незалежно один від одного та виконують наступні функції:

- перешкоджають виникненню перевантажень, збоїв і аварійних ситуацій;
- забезпечують сприйняття аварійних перевантажень і гарантують не руйнівність, а також функціонування основної частини об'єкта;
- запобігають лавиноподібному розвитку руйнувань і відмов, а також локалізують наслідки аварії, що вже сталася.

Для створення і забезпечення ефективності зазначених бар'єрів безпеки, повинні бути передбачені технічні рішення та організаційні заходи, одним із яких є своєчасне діагностування, оцінка технічного стану та попередження можливих негативних наслідків.

Мета роботи полягає у створенні скінченно-елементної моделі [1, 2] і програмного забезпечення для комп'ютерного моніторингу конструкції міжнародного виставкового центру для визначення критичних та динамічних критеріїв несучої здатності будівлі за рахунок змін умов її експлуатації у випадку можливого осідання основи й часткового зниження міцності елементів, а також встановлення додаткового устаткування.

Для досягнення цієї мети розв'язані наступні задачі:

- Розроблена методика оцінки спектрів частот і форм власних коливань конструкції виставкового центру розрахунковим методом. Передпроцесорна підготовка вихідної інформації для створення математичної моделі МВЦ і виконання розрахунків.
- Розрахунковими методами визначенні реперні точки на елементах конструкції виставкового центру для встановлення вимірювальних приладів і визначені орієнтації векторів динамічних переміщень.
- Виконана графічна і анімаційна обробка результатів розрахунків.
- Враховані дані вібродинамічних випробувань при вдосконаленні просторової моделі конструкції і виконані додаткові перевіірочні розрахунки споруди з метою перевірки виключення резонансних режимів коливань конструкції при вітрових і сейсмічних впливах

– Надані заключні висновки.

В результаті виконання досліджень була створена скінченно-елементна модель для розрахунку міцності, стійкості і коливань стрижневої системи конструкції виставкового центру. Ці дані можна використати для перевірки її напружено-деформованого стану при встановленні деяких видів додаткового обладнання і для вибору реперних точок конструкції при встановленні вимірювальної апаратури під час експериментальної перевірки динаміки конструкції в змінених умовах.

Конструктивна схема виставкового центру.

Будівлі Міжнародного виставкового центру умовно поділені на три блоки, які архітектурно і конструктивно пов'язані між собою (блоки А, Б та В див. рис. 1).

В осях 5-8 Б-И розташовано перший пусковий комплекс (блок А). Він являє собою прямокутну в плані будівлю з розмірами в плані 127,2 м на 97,2 м. Висота будівлі в високій частині складає 21 м. По всьому контуру будівлі розташована односкатні кроквяні ферми довжиною 24 м, ферми пониженої частини даху з одного боку спираються на колони зовнішнього контуру будівлі, що розставлені з кроком 6м та 6,15 м, а з другого – на середні рамні колони та стійки підкроквяних ферм. Висота колон зовнішнього ряду +7,850 м, висота нижнього поясу кроквяних ферм пониженої частини +8.100 м. В кутових ділянках пониженої частини даху будівлі, передбачено діагональні ферми, розміщені під кутом 45° відносно цифрових та буквених осей будівлі. Діагональні ферми одним кінцем спираються на колону центрального ряду, а другим на колону зовнішнього контуру будівлі.

Під підвищену частину даху будівлі, запроектовано центральні колони з кроком вздовж цифрових осей 30м 60м, та 48м вздовж буквених. На внутрішні колони спираються вздовж цифрових осей 30-ти метрові підкроквяні ферми з паралельними поясами. Кроквяні ферми підвищеної частини даху розташовані вздовж буквених осей з шагом 10 метрів, вони спираються на центральні колони та підкроквяні ферми. Кроквяні ферми підвищеної частини даху мають еліпсоподібну форму з висотою 6м. Торцеві кроквяні ферми підвищеної частини даху виконують функції підкроквяних, так як до них підвішуються ферми зниженої частини покрівлі металевих каркасу.

Стійкість будівлі вздовж цифрових осей забезпечена горизонтальними в'язями по торцях та вертикальними в'язями по колонам в осях 5-8. Вздовж буквених осей стійкість забезпечується рамами вздовж осей Г та Е з заземленням колон в фундаментах.

Вздовж осі 5 до будівлі першого пускового комплексу (блоку А) примикає будівля другого пускового комплексу, яка має Г подібну форму в плані і умовно розділена на два блоки Б та В об'єднані в осях 4а1 – 4а8, Г-Е спільним покриттям.

В осях 1-4 Б-И розташовано блок В, розмірами в плані 121,2 м на 97,2 м. Блок являє собою двоярусну будівлю, перший ярус (понижена частина даху будівлі) розміщено по трьох сторонах з односкатних ферм прольотом 24 м, відмітка нижнього поясу ферм пониженої частини даху будівлі +9,500 м. Ферми пониженої частини даху будівлі з одного боку спираються на колони, які розташовані по зовнішньому контуру з кроком 6 м та 6,15м, а з другого боку (вздовж осі 2) – зв'язані з підкроквяними фермами внутрішньої

Другий ярус – підвищена частина даху будівлі в осях Г-Е, 1-5 перекрита системою ферм. Підкроквяні ферми вздовж осі 2 та осі 5 мають прольоти 18 та 24 м, підкроквяні ферми вздовж осей 3 та 4 мають прольоти 60м. У поперечному напрямку (вздовж буквених осей), запроектовано кроквяні ферми, у вигляді «хвилі», які мають прольоти 48 м, 24 м, та 37 м. Кроквяні ферми «хвилі» розташовані з кроком 6 та 12 метрів.

В осях 4-5 розміщено блок Б другого пускового комплексу, який має розміри в плані 176 м на 37м, (42м) . Блок перекривається еліпсоподібними фермами з кроком 8,2 м, що спираються на колони та підкроквяні ферми розміщені вздовж осі 4 та осі 5. Стійкість цієї частини будівлі вздовж цифрових осей забезпечується системою горизонтальних і вертикальних в'язів, вздовж буквених осей за рахунок жорсткого закріплення ферм в колонах, а колон в фундаментах.

На рис. 2.2 та рис.2.3 наведено основні креслення будівлі: схема елементів покриття по нижнім поясам блоків "А", "Б", "В".

Другий ярус – підвищена частина даху будівлі в осях Г-Е, 1-5 перекрита системою ферм. Підкроквяні ферми вздовж осі 2 та осі 5 мають прольоти 18 та 24 м, підкроквяні ферми вздовж осей 3 та 4 мають прольоти 60м. У поперечному напрямку (вздовж буквених осей), запроектовано кроквяні ферми, у вигляді «хвилі», які мають прольоти 48 м, 24 м, та 37 м. Кроквяні ферми «хвилі» розташовані з кроком 6 та 12 метрів.

В осях 4-5 розміщено блок Б другого пускового комплексу, який має розміри в плані 176 м на 37м, (42м) . Блок перекривається еліпсоподібними фермами з кроком 8,2 м, що спираються на колони

та підкроквяні ферми розміщені вздовж осі 4 та осі 5. Стійкість цієї частини будівлі вздовж цифрових осей забезпечується системою горизонтальних і вертикальними в'язів, вздовж буквених осей за рахунок жорсткого закріплення ферм в колонах, а колон в фундаментах.

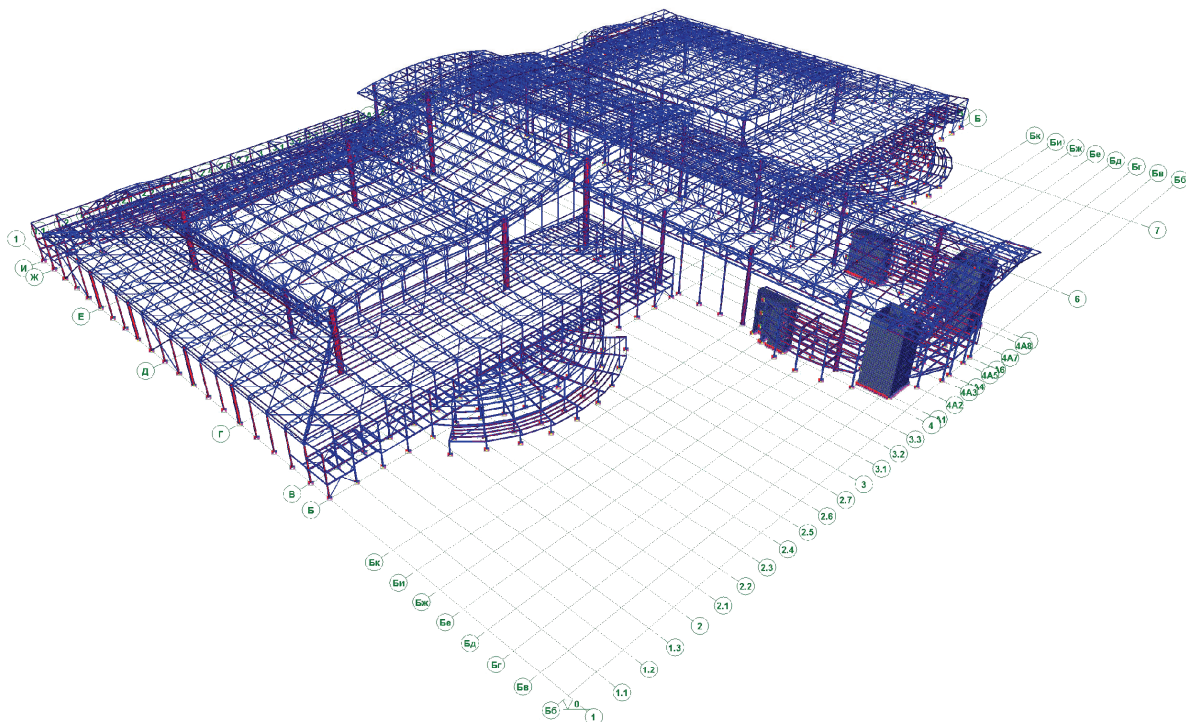


Рисунок 1 – Загальний вигляд будівель виставкового центру

Діючі навантаження включають наступні складові: вихідні навантаження від власної ваги всієї споруди (несучі та допоміжні під конструкції), експлуатаційні навантаження, навантаження від переднапруження, а також снігові, льодові та вітрові навантаження, температурні та сейсмічні впливи. Навантаження від власної ваги скінчено-елементної моделі обраховуються автоматично зважаючи на розміри перерізів конструктивних частин та значень густин матеріалів.

Навантаження і впливи задані згідно ДБН В.1.2-2:2006. При визначенні нормативних навантажень встановлений строк експлуатації будівлі прийнято згідно додатку В ДБН В.1.2-2:2006, $T_{ef}=100$ років. Коефіцієнт запасу по навантаженню γ_{fm} прийнятий рівним 1,14, згідно таблиці 8.1 та 9.1 ДБН В.1.2-2:2006. Коефіцієнти запасу для конструкцій класу відповідальності А, та будівель класу наслідків по відповідальності СС3 прийнято $\gamma_n=1,25$ таблиці 5 ДБН В.1.2-14:2009. Деякі значення нормативних і розрахункових значень навантажень, що задані в схемі, наведені у таблиці 1.

При проведенні перевірочних розрахунків конструкції виставкового центру розглядалися: статичний напружено-деформівний стан конструкції, викликаний як її переднапруженням, так і дією статичних навантажень; стійкість конструкції при дії статичних навантажень (попереднє навантаження та активні зовнішні сили), а також власні коливання (частоти та форми) попередньо напруженої конструкції з врахуванням та без урахування приєднаних мас допоміжного обладнання та снігу.

Використаний спосіб збільшення жорсткості конструкції виставкового центру за рахунок її переднапруження і задача побудови спектрів частот та форм власних коливань системи призводять до необхідності використання нелінійної постановки загальної задачі. У зв'язку з цим застосовується кроковий алгоритм метода продовження по параметру з додатковими ітераціями на кожному кроці процедури Ньютона-Рафсона. При цьому відбувається перебудова лінеаризованої матриці жорсткості з врахуванням зміни в процесі навантаження конструкції її геометрії та внутрішніх переднапружуючих сил. Аналіз пружного деформування конструкції виставкового центру на кожному кроці реалізується розв'язком системи лінеаризованих алгебраїчних рівнянь для скінчено елементної моделі

$$[K]\{\Delta u\} = \{\Delta f\} - \{r\}, \quad (1)$$

Таблиця 1 – Деякі значення нормативних і розрахункових значень навантажень у схемі

	Групи навантажень	Нормативне навантаження, кг/м ²	Коефіцієнт перевантажень для груп навантажень в завантаженнях								
			L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
1	Власна вага металоконструкцій	*	1.1								
2	Власна вага покрівлі	27,3		1.1							
3	Технологічне навантаження на покрівлю	20			1						
4	Корисне навантаження на покрівлю	50				1					
5	Снігове навантаження за ДБН	163					1.14				
6	Вітрове навантаження вздовж осі X							1.14			
7	Вітрове навантаження проти осі X								1.14		
8	Вітрове навантаження проти осі Y									1.14	
9	Вітрове навантаження вздовж осі Y										1.14
10	Власна вага стінових сандвіч панелей	40		1							

Використаний спосіб збільшення жорсткості конструкції виставкового центру за рахунок її переднапруження і задача побудови спектрів частот та форм власних коливань системи призводять до необхідності використання нелінійної постановки загальної задачі. У зв'язку з цим застосовується кроковий алгоритм метода продовження по параметру з додатковими ітераціями на кожному кроці процедури Ньютона-Рафсона. При цьому відбувається перебудова лінеаризованої матриці жорсткості з врахуванням зміни в процесі навантаження конструкції її геометрії та внутрішніх переднапружуючих сил. Аналіз пружного деформування конструкції виставкового центру на кожному кроці реалізується розв'язком системи лінеаризованих алгебраїчних рівнянь для скінчено елементної моделі

$$[K]\{\Delta u\} = \{\Delta f\} - \{r\}, \quad (1)$$

де $[K]$ – лінеаризована матриця жорсткості системи; $\{\Delta u\}$ – шуканий вектор приросту переміщень; $\{\Delta f\}$ – вектор приростів заданих сил; $\{r\}$ – вектор нев'язок. У зв'язку з тим, що за деякої комбінації внутрішніх сил попереднього навантаження, конструкція може втратити стійкість, було досліджене випучування елементів конструкції на основі постановки проблеми на власні значення для лінеаризованої системи алгебраїчних рівнянь [3—5]

$$|K + \lambda_i L| = 0, \quad (2)$$

де K – матриця жорсткості для ненапруженої конструкції; L – різностороння матриця жорсткості; λ_i – шукані власні значення параметра навантаження (параметра переднавантаження); прямі дужки означають знак обчислення визначника.

Частоти та форми власних коливань визначаються на основі частотного аналізу. Рівняння руху елементів конструкції записуються в матричній формі

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0, \quad (3)$$

де $[K]$ та $[M]$ – відповідно матриці жорсткості та мас, що відображають пружні та інерційні характеристики конструкції; $\{u\}$ – вектор динамічних переміщень; точками над буквою позначено диференціювання по часу.

Після врахування гармонічного закону власних коливань конструкції аналіз системи рівнянь руху (3) зводиться до проблеми Штурма-Ліувіля для алгебраїчної системи

$$|K + \lambda_i L|\{\psi_i\} = 0, \quad (4)$$

де $\{\psi_i\}$ – власний вектор (мода коливань), що відповідає власному значенню (кругова чи циклічна частота).

Обчислення власних значень і векторів для рівнянь (4) здійснюється за допомогою метода Ланцоша.

Цей фактор є найважливішим при аналізі порушення працездатності системи у її нештатних ситуаціях (просадка фундаментів, утворення тріщин в елементах конструкції і їх втрата несучої здатності).

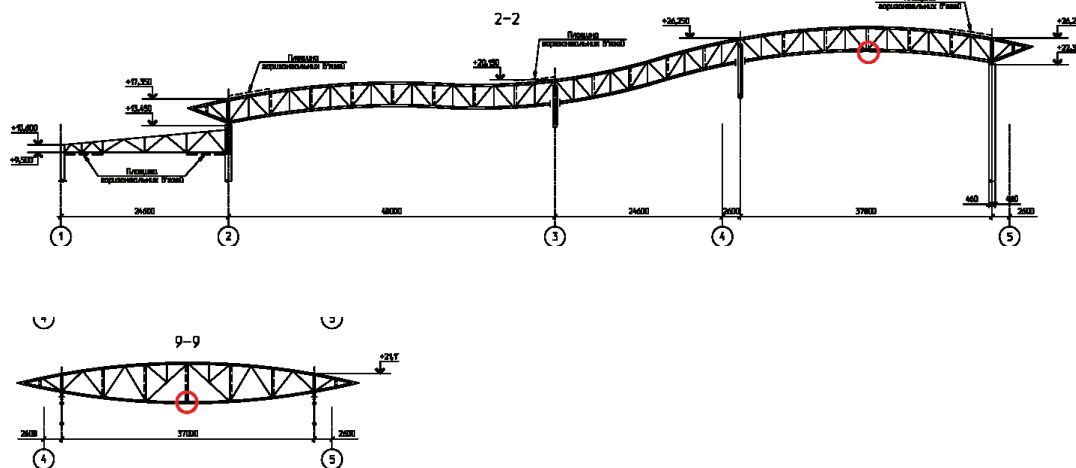


Рисунок 2 – Розташування реперних точок. Розрізи

В результаті співставлення всіх видів навантажень, що діють на конструкцію, встановлено, що найбільш суттєве навантаження системи викликається дією снігового навантаження. При аналізі

Аналіз результатів розрахунків глобальної стійкості конструкції показав, що вона має достатній запас глобальної стійкості.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Передумови А. В., Сливко В. І. Розрахункові моделі споруджень і можливості їх аналізу. // *Вісник Національного університету цивільного захисту України*. – 2014. – № 30. – С. 105–110.

1. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. - Киев: Сталь, 2002. – 597 с.
2. Шимановский А.В., Оглобля А.И. Теория и расчет несущих элементов большепролетных пространственных конструкций. – Киев: Сталь, 2002. —368 с.
3. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. – М.: Машиностроение, 1991. – 334 с.
4. Гуляев В.И., Баженов В.А., Гоцуляк Е.А. Устойчивость нелинейных механических систем. – Львов: Вища школа, 1982. – 254 с.
5. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы. Том 1. – М.: Издательство СКАД СОФТ. 2007 – 670 стр.

REFERENCES

1. Perelmuter A.V., Slivker V.I. Computational models of structures and the possibility of their analysis. Kiev: Steel, 2002 – 597 p. (Rus)
2. Szymanowski A.V., Ogloblya A.I. Theory and Design of bearing elements span spatial structures. Kiev: Steel, 2002. – 368 p. (Rus)
3. Alfutov N.A. Bases of calculation of the stability of elastic systems. M : Engineering, 1991. – 334 p. (Rus)
4. Gulyaev V.I., Bazhenov V.A., Gotsulyak E.A. Stability of nonlinear mechanical systems. Lviv: Vishcha School, 1982. – 254 p. (Rus)
5. Perelmuter A.V., Slivker V.I. Stability of equilibrium structures and related problems. Volume 1. M : Publishing SCAD SOFT. 2007 - 670 p. (Rus)

РЕФЕРАТ

Ващіліна О.В. Скінчено-елементний моніторинг конструкцій міжнародного виставкового центру / О.В. Ващіліна, О.І. Борщ, К.Е. Котенко, І.А. Ткаченко // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2015. – Вип. 1 (31).

Розглянута проблема виявлення найбільш аварійно небезпечних ділянок конструкції Міжнародного виставкового центру, зумовлених дією як внутрішніх, так і зовнішніх чинників (снігові, вітрові, сейсмічні та інші навантаження)

Об'єкт дослідження – конструкції Міжнародного виставкового центру.

Мета роботи полягає у створенні скінченно-елементної моделі і програмного забезпечення для комп'ютерного моніторингу конструкції міжнародного виставкового центру для визначення критичних та динамічних критеріїв несучої здатності будівлі за рахунок змін умов її експлуатації у випадку можливого осідання основи й часткового зниження міцності елементів, а також встановлення додаткового устаткування.

Метод дослідження. Аналіз пружного деформування конструкції Міжнародного виставкового центру реалізується шляхом розв'язку системи лінеаризованих алгебраїчних рівнянь для скінченно-елементної моделі.

Результати статті можуть бути використані для комп'ютерного скінченно-елементного моніторингу конструкції Міжнародного виставкового центру при дії екстремальних статичних та динамічних навантажень.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СКІНЧЕНО-ЕЛЕМЕНТНИЙ АНАЛІЗ, РЕПЕРНІ ТОЧКИ, НАПРУЖЕНИЙ СТАН, СТІЙКІСТЬ КОНСТРУКЦІЇ

ABSTRACT

Vashchilina O.V., Borshch O.I., Kotenko K.E., Tkachenko I.A. Finite-element monitoring of structures of International exhibition center. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2015. – Issue 1 (31).

The problem about determination of the most emergency dangerous segments of the structure of the International exhibition center conditioned by action of internal and external factors (snow, wind, seismic and other loads) is considered.

The project object is the structure of the International exhibition center.

The project aim consists in the elaboration of finite element model and software for computer monitoring of the International exhibition center structure for determination the critical and dynamic criteria of its carrying capability through the change of the operating conditions. The cases of the soil sagging, partial diminish of the elements strength, as well as loading by additional equipment are taken into consideration.

The research method. Analysis of elastic deformation of the International exhibition center is realized via solution of the system of linear algebraic equations for the finite element model.

The paper results can be used for computer finite element monitoring of the structure of the International exhibition center under action of extremal static and dynamic loads.

KEY WORDS: FINITE ELEMENT ANALYSIS, CHECK POINTS, STRESS-STRAIN STATE, STRUCTURAL STABILITY.

РЕФЕРАТ

Ващилина Е.В. Конечно-элементный мониторинг конструкций международного выставочного центра / Е.В. Ващилина, Е.И. Борщ, К.Е. Котенко, И.А. Ткаченко // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К. : НТУ, 2015. – Вып. 1 (31).

Рассмотрена проблема определения наиболее аварийно опасных участков конструкции Международного выставочного центра, обусловленных действием как внутренних, так и внешних причин (снежные, ветровые, сейсмические и другие нагрузки)

Объект исследования – конструкции Международного выставочного центра.

Цель работы состоит в создании конечно-элементной модели и программного обеспечения для компьютерного мониторинга конструкции международного выставочного центра для определения критических и динамических критериев несущей способности здания за счет изменения условий её эксплуатации в случае возможного оседания основы и частичного снижения прочности элементов, а также установки дополнительного оборудования.

Метод исследования. Анализ упругой деформации конструкции Международного выставочного центра реализуется путем решения системы линеаризованных алгебраических уравнений для конечно-элементной модели.

Результаты статьи могут быть использованы для компьютерного конечно-элементного мониторинга конструкции Международного выставочного центра при действии экстремальных статических и динамических нагрузок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ, РЕПЕРНЫЕ ТОЧКИ, НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, УСТОЙЧИВОСТЬ КОНСТРУКЦИИ.

АВТОРИ:

Вашіліна Олена Валеріївна, кандидат фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри вищої математики, e-mail: vashchilina@ukr.net, тел. +380504132332, Україна, 01010, м. Київ, вул. Суворова 1.

Борщ Олена Іванівна, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри вищої математики, e-mail: olenkab@ukr.net, тел. +380993270466, Україна, 01010, м. Київ, вул. Суворова 1.

Котенко Костянтин Едуардович, Національний університет будівництва та архітектури, аспірант кафедри теоретичної механіки, e-mail: knuba@knuba.edu.ua, Україна, 03680, м. Київ, проспект Повітрофлотський, 31

Ткаченко Іван Анатолійович, інженер, Міжнародний виставковий центр.

AUTHOR:

Vashchilina Olena.V., Ph.D., associate professor, National Transport University, associate professor, e-mail: vashchilina@ukr.net, тел. +380504132332, Ukraine, 01010, Kyiv, Suvorova str. 1.

Borshch O. I., National Transport University, assistant, e-mail: olenkab@ukr.net, tel. ++380993270466, Ukraine, 01010, Kyiv, Suvorova str. 1.

Kotenko K. E., National University of Building and Architecture, Kyiv, Ukraine

Tkachenko I.A., International Exhibition Center, Kyiv, Ukraine

АВТОРЫ:

Вашилина Елена Валериевна, кандидат физико-математических наук, Национальный транспортный университет, доцент кафедры высшей математики, e-mail: vashchilina@ukr.net, тел. +380504132332, Украина, 01010, г. Киев, ул. Суворова 1.

Борщ Елена Ивановна, кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, доцент кафедры высшей математики, e-mail: olenkab@ukr.net, тел. +380993270466, Украина, 01010, г. Киев, ул. Суворова 1.

Котенко Константин Эдуардович, Национальный университет строительства и архитектуры аспирант кафедры теоретической механики, e-mail: knuba@knuba.edu.ua, Украина, 03680, г. Киев, проспект Воздухофлотский, 31

Ткаченко Иван Анатолієвич, Міжнародний виставочний центр інженер.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Гуляєв В.І., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри вищої математики, Київ, Україна.

Лебедева І.В., кандидат фізико-математичних наук, доцент, Київський Національний університет імені Тараса Шевченка, доцент кафедри теретичної механіки, Київ, Україна.

REVIEWER:

Gulyayev V.I., Ph.D., Engineering (Dr.), professor, National Transport University, professor, department of Mathematics, Kyiv, Ukraine.

Lebedeva I.V., Ph.D., Physics and Mathematics, associate professor, Taras Shevcheko National University of Kyiv, associate professor, department of Theoretical and Applied Mechanics, Kyiv, Ukraine.