

УДК 528.48: 624.04

д.т.н., професор В.В. Гайдайчук,  
к.т.н., професор В.С. Староверов, О. В. Адаменко,  
Київський національний університет будівництва і архітектури

## **ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ГЕОДЕЗИЧНИХ РОБІТ НА ОСНОВІ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДУ ЗА ДОПОМОГОЮ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

*В статті запропоновано методику визначення точності інженерно-геодезичних спостережень при спорудженні мостових переходів шляхом моделювання напружено-деформованого стану під час їх роботи. У статті наведена методика та основні концепції такого дослідження з використанням програмного комплексу MSC/NASTRAN.*

### **Постановка проблеми**

Існуючі нормативні документи не розкривають у повній мірі вимоги до інженерно - геодезичних робіт при будівництві мостових переходів. Методи, якими виконується нормування точності геодезичних робіт, використовують дані про геометрію споруди, але не враховують її роботу.

### **Аналіз досліджень по даній темі**

Програмний комплекс MSC/NASTRAN досить поширений і загальновідомий у наш час, він використовується при визначенні стійкості та надійності споруд та деталей в багатьох сферах промисловості. За допомогою MSC/NASTRAN також виконувалися і обчислення стійкості мостових переходів.

Питання обґрунтування точності геодезичних робіт при будівництві мостових переходів залишаються актуальними і сьогодні. Існуючі методи визначення точності геодезичних робіт ґрунтуються тільки на використанні даних о геометричних розмірах споруди і потребують вдосконалення.

### **Цілі статті**

Визначити точність геодезичних спостережень при будівництві мостових переходів. Для збільшення точності обрахунків та працездатності розрахунків точності геодезичних робіт пропонується виконувати за допомогою програмного комплексу MSC/NASTRAN.

### **Викладення основного матеріалу**

Мости є складними і унікальними інженерними спорудами, які повинні виконувати свої функції упродовж довгого часу, на період не менше за сотню років. Для забезпечення тривалого та надійного строку експлуатації таких відповідальних споруд, звичайно, необхідно приділити особливу увагу дотриманню геометрії споруди, а точніше дотриманню відповідності монтажу реальної конструкції запроєктованій.

В будівництві питаннями точності монтажу конструкцій займається геодезія. Об'єм геодезичних спостережень визначається типом, виглядом і розмірами запроєктованої споруди, місцевими умовами та ступенем їх вивченості. На нашу думку точність виконання геодезичних робіт має визначатися на основі даних про роботу конструкції споруди, особливо це стосується унікальних споруд, таких як мостові переходи. При проектуванні конструкції мостів, прогнозування всіх можливих варіантів напружено-деформованого стану є основою підбору фізико-геометричних характеристик елементів конструкції. Цей етап проектування конструкції вимагає високої кваліфікації і виконується відповідними фахівцями.

Використовуючи дані про фізико-геометричні характеристики моста, визначимо допустиме перевантаження та величини зміщень вузлів конструкції до досягнення мостом втрати стійкості.

Так як мостові переходи зазвичай мають достатньо великі розміри, та складаються із великої кількості елементів, то виконання подібних розрахунків є достатньо складною задачею. Виконувати такі розрахунки вручну нерационально за часом, або отримані дані будуть недостатньо точними.

Для виконання такої задачі нами вибраний програмний комплекс MSC/NASTRAN. В основі MSC/NASTRAN лежить метод скінчених елементів. Основна ідея метода скінчених елементів полягає в тому, що безперервна величина, тобто величина, яка визначається нескінченною кількістю значень на деякій області замінюється дискретною моделлю. Остання будується на множині кусково-безперервних функцій, визначених на скінченному числі підобластей.

Вибраний міст – Подільський мостовий перехід, представляє собою аркову конструкцію з одним прогоном. Загальна довжина мостового переходу 472 м., довжина арки – 312 м. Арка подвійна, висотою 54,7 м., коробчастого перетину з ребрами жорсткості. Дві арки зв'язані між собою стрижньовою конструкцією. Балка жорсткості – фермова конструкція, шириною 34 м. Передача навантаження з балки жорсткості на арку відбувається за допомогою тросів. Навантаженням при розрахунку конструкції була власна вага мостового переходу.

Була прийнята просторова стрижньова модель конструкції. Кожний стрижень ферми балки жорсткості був представлений шістьма скінченними елементами. Довжина скінченного елемента арки дорівнює відстані між діафрагмами жорсткості. Всі скінченні елементи арки та балки жорсткості представлені як балочні.

Кожна ванта поділена на просторові стрижньові елементи колового перетину. Кріплення вант до арки та балки жорсткості вважаємо шарнірним.

Балка жорсткості жорстко закріплена на одному кінці та шарнірно рухома вздовж осі моста закріплена на іншому кінці. Арка жорстко закріплена на обох кінцях.

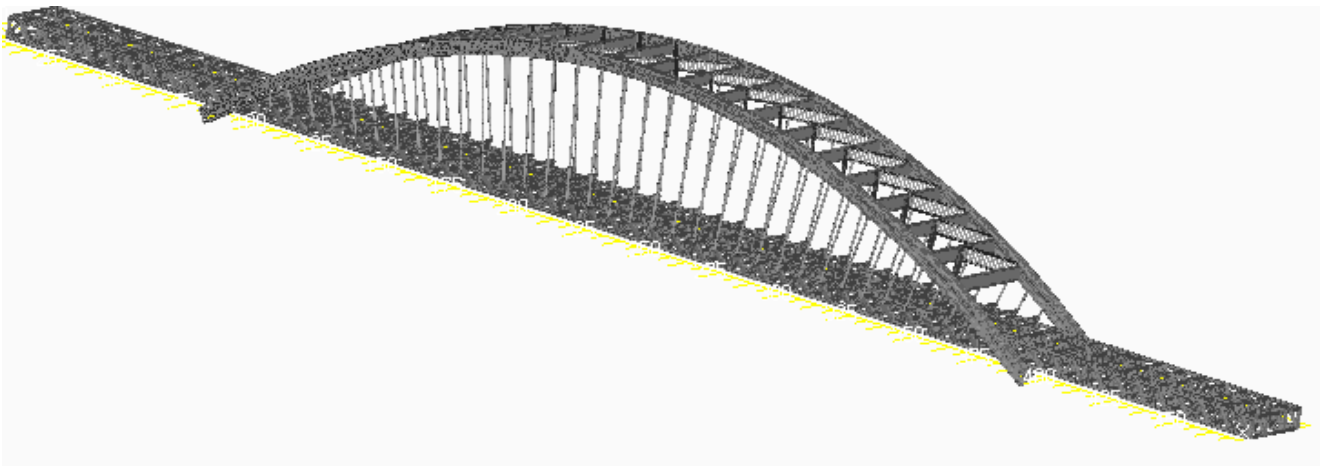


Рис.1 Скінченно-елементна модель мостового переходу в програмі MSC/NASTRAN

В цілому скінченно-елементна модель показана на рис. 1. Ми обмежилися розрахунком тільки несучих конструкцій, оскільки тільки від їхньої роботи залежить стійкість мостового переходу. Як бачимо, навіть при такому обмеженому розрахунку на схемі ми маємо близько п'яти тисяч точок та трьох тисяч кривих. При реалізації скінченно-елементної моделі отримуємо біля 17 000 вузлів, 15 000 елементів та 91512 невідомих.

Розрахунок мостового переходу виконаний на втрату стійкості по лінійному статичному розрахунку моделі. Визначення допустимого навантаження виконується за наступною формулою:

$$([K] - \lambda [\overline{K}_g]) \{u\} = 0, \quad (1)$$

де  $[K]$  – глобальна матриця жорсткості,  
 $[\overline{K}_g]$  – глобальна матриця геометричної жорсткості, яка враховує зміну положення конструкції у просторі,  
 $\{u\}$  – вектор вузлових зміщень конструкції у просторі,

$\lambda$  – критичний параметр навантаження.

По результатах розрахунку конструкції мостового переходу отримуємо модель напружено – деформованого стану втрати стійкості мосту. Критичний параметр навантаження  $\lambda$  в такому випадку дорівнює 9,429. На рис. 2 показана така модель.

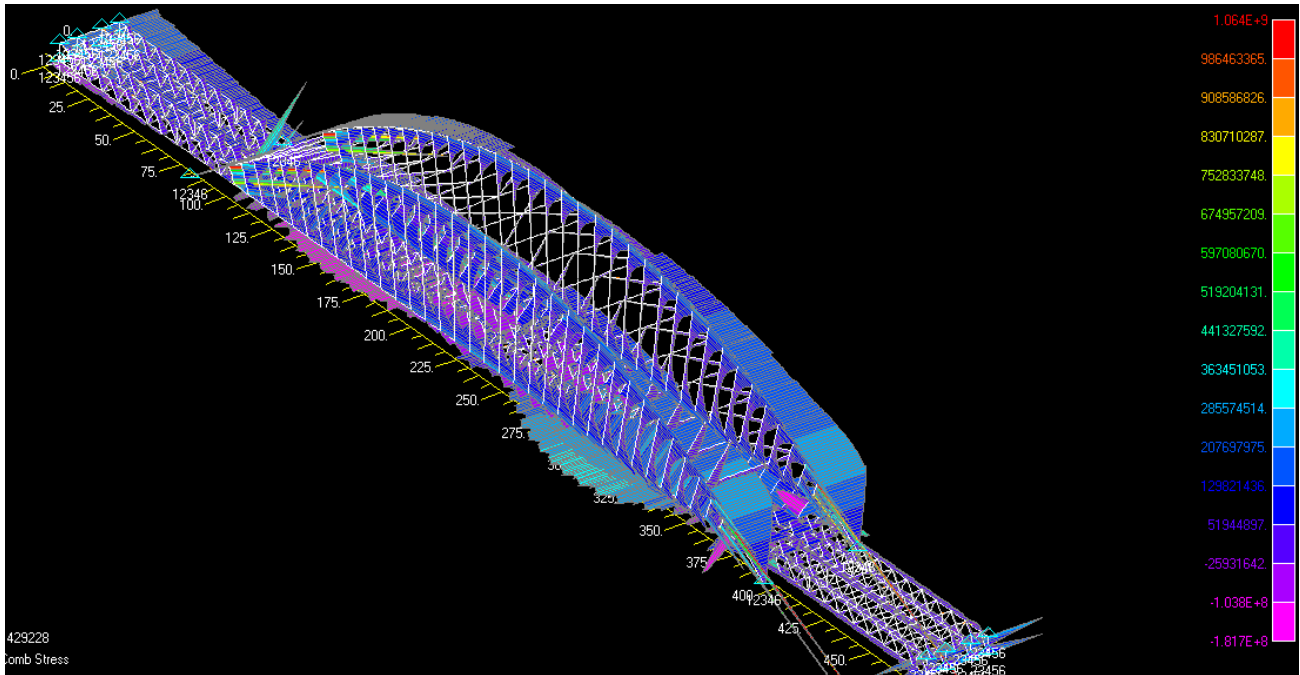


Рис.2 Модель напружено-деформованого стану конструкції мосту при втраті стійкості в програмі MSC/NASTRAN

Аналізуючи отриману модель напружено-деформованого стану конструкції мостового переходу, визначаємо вузли конструкції з наявними найбільшими напруженнями і, відповідно, деформаціями. Звичайно, геодезичному контролю підлягають, в першу чергу, саме ці вузли. Такими вузлами в конструкції Подільського мостового переходу є замок та середина підйому арки, місця перетину арки та балки жорсткості мостового переходу, середина прогону та середина доаркової частини балки жорсткості.

Програмний комплекс MSC/NASTRAN дозволяє визначити максимальні зміщення вузлів конструкції при втраті її стійкості. На рис. 3 показаний фрагмент мостового переходу (перетин арки та балки жорсткості) з визначеними зміщеннями вузлів.

Отримані результати занесемо у таблицю 1.

Таблиця 1. Зміщення вузлів мостового переходу.

Місце розташування вузла	Зміщення вузла, мм
Замок арки	133
Середина підйому арки	89
Місця перетину арки та балки жорсткості	76
Доаркова частина балки жорсткості	90
Середина прогону балки жорсткості	151

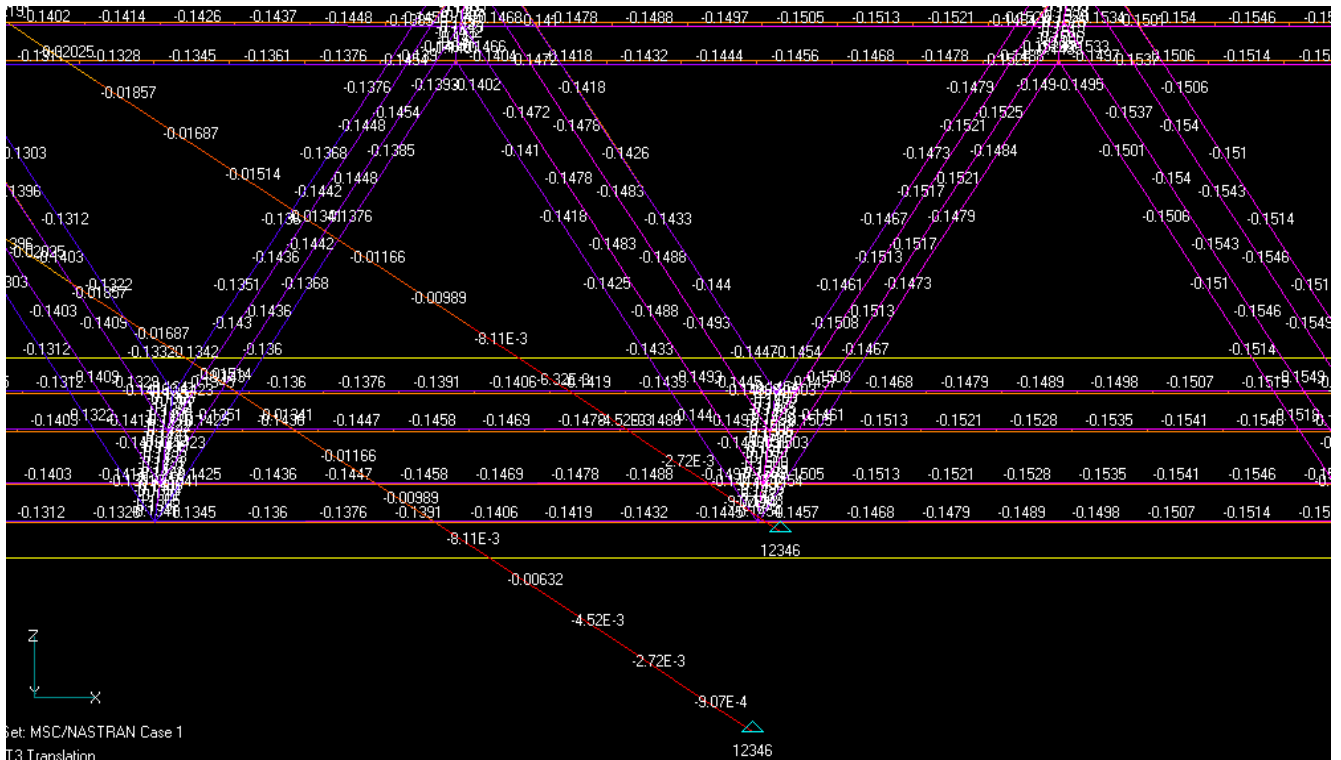


Рис.3 Визначення зміщень вузлів мостового переходу у вертикальній площині в програмі MSC/NASTRAN

Отримані дані показують деформацію окремих вузлів мостового переходу при максимальному (до втрати стійкості) навантаженні конструкції. Виходячи із взаємної залежності напруг у конструкції і деформації її вузлів, отримані зміщення вузлів конструкції будуть критичними для її стійкості.

При проектуванні конструкції, по визначених зусиллях в конструкціях визначають перетини стрижнів конструкції:

$$S = A[\sigma]m, \quad (2)$$

де  $S$  – зусилля в стрижні,

$A$  – площа поперечного перетину стрижня,

$[\sigma]$  – допустима напруга матеріалу стрижня,

$m$  – коефіцієнт умови роботи ( по суті, коефіцієнт запасу).

Оскільки значення коефіцієнта умови роботи коливаються від 1 до 1,4, то в середньому, вважатимемо  $m=1,2$ . Це означає, що допускається перевантаження стрижня на 20%. Саме на це значення розраховується допустима погрішність геодезичних вимірювань.

Тоді допустимі зміщення вузлів мостового переходу запишемо у таблицю 2.

Таблиця 2. Допустимі зміщення вузлів мостового переходу.

Місце розташування вузла	Зміщення вузла, мм
Замок арки	26,6
Середина підйому арки	17,8
Місця перетину арки та балки жорсткості	15,2
Доаркова частина балки жорсткості	14
Середина прогону балки жорсткості	30,2

Отримані величини є граничною похибкою монтажу конструкцій мостового переходу у проектне положення. В практиці геодезичного виробництва частіше користуються середньою квадратичною похибкою. Визначимо необхідну середню квадратичну похибку монтажних робіт. В будівництві розподіл похибок геодезичних вимірювань підкоряється закону розподілу Ст'юдента, маємо:

$$\Delta_{\sigma} = tm_{\sigma}, \quad (3)$$

де  $t$  – коефіцієнт імовірності, який вибирається із таблиць розподілу Ст'юдента,

$m_{\sigma}$  – середня квадратична похибка будівельних робіт,

$\Delta_{\sigma}$  – гранична похибка монтажних робіт.

Відповідно до роботи [2] приймемо:

$$m_{\sigma} = tm_{\sigma}, \quad (4)$$

$m_{\sigma}$  – середня квадратична похибка геодезичних робіт.

Враховуючи співвідношення (3) і (4), визначимо необхідну точність геодезичних робіт при визначенні положення вузлів конструкції мостового переходу.

Визначені середні квадратичні похибки геодезичних робіт занесемо у таблицю 3.

Таблиця 3. Середня квадратична похибка геодезичних робіт при визначенні положення вузлів мостового переходу.

Місце розташування вузла	СКП вимірювань вузлів, мм
Замок арки	3,0
Середина підйому арки	2,0
Місця перетину арки та балки жорсткості	1,7
Доаркова частина балки жорсткості	1,6
Середина прогону балки жорсткості	3,4

### Висновки

Використання програмного комплексу MSC/NASTRAN для обґрунтування точності геодезичних робіт при будівництві мостових переходів дозволяє диференціювати необхідну точність геодезичних робіт та визначити місця встановлення контрольних марок.

### Література

1. Рычков С. П. MSC visual NASTRAN для Windows – М. НТ Пресс. 2004 – 552с.
2. Игельманов А. А. Исследование вопроса соотношения между строительными допусками и точностью геодезических работ на основе теории малой выборки – М. 1979 – 20с.

### Annotation

The article contains the approach to investigate the accuracy of engineering and geodetic inspection in the course of bridge. This approach is identified by stress and strain state of these constructions. The article offers materials concerning the approach itself and the main investigation concepts by MSC/NASTRAN.

### Аннотация

В статье предложена методика определения точности инженерно-геодезических наблюдений при строительстве мостовых переходов путем определения напряженно-деформированного состояния во время их работы. В статье наведена методика и основные концепции таких исследований с использованием программного комплекса MSC/NASTRAN.