

УДК 624.15

*В.М. Михайленко, д.т.н., проф., КНУБА;*

*О.О. Терентьев, к.т.н., НДІБВ;*

*М.В. Корнієнко, к.т.н., доцент, КНУБА*

## **ЗАГАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ФУНДАМЕНТНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

### **АНОТАЦІЯ**

Розглядається узагальнена оцінка конкретних фундаментних конструкцій. В цій роботі досліджено узагальнення розрахунку часткового коефіцієнта над фундаментними конструкціями. Розроблені та досліджені ланцюги логічного виведення оцінки дефектів та пошкоджень конструктивних елементів будівлі фундаментів. Ця методика надалі передбачає інші підходи до створення ланцюгів логічного виведення на рівні нейронних мереж.

Ключові слова: будівлі, пошкодження та дефекти, моделювання надійності, інформаційна технологія, база знань, ланцюги логічного виведення.

Держава та уряд приділяють постійну увагу безпеці експлуатації будівель та споруд, посиленню контролю над їх проектуванням і капітальним ремонтом. Про це свідчить постанова Кабінету Міністрів України "Про забезпечення надійності та безпечної експлуатації будівель, споруд і інженерних мереж" від 05 травня 1997 р. № 409 та розпорядження Кабінету Міністрів України "Про заходи щодо посилення контролю над проектуванням, новим будівництвом, реконструкцією, капітальним ремонтом і експлуатацією будівель і споруд" № 100-р від 01 березня 2004 р.

Останнім часом значно зростають обсяги робіт, пов'язані з комплексною діагностикою та оцінкою технічного стану будівельних конструкцій, будівель та споруд. Досить часто виникає ситуація, коли виконавці не мають можливості перед обстеженням вивчити технічну документацію на будівлі та споруди, що експлуатуються протягом тривалого часу. Такі роботи виділяються як самостійний напрямок будівельного виробництва, що охоплює комплекс питань, пов'язаних із забезпеченням експлуатаційної надійності будівель, проведенням ремонтно-відновлювальних робіт, робіт із реконструкції та розроблення проектної документації.

Обстеження будівель і споруд включає такий

комплекс завдань:

- \* попередній огляд об'єкта;
- \* візуальне обстеження;
- \* інструментальне обстеження;
- \* додаткові вишукування (геологія, геодезія, розкриття фундаментів);
- \* визначення несучої здатності конструкцій і інші розрахунки;
- \* аналіз, порівняння та узагальнення результатів обстеження;
- \* висновки і рекомендації.

Одним із напрямків у реалізації комплексу завдань щодо безпечної експлуатації будівель і споруд є обстеження фундаментних конструкцій.

Ця задача включає:

- \* узагальнену оцінку конкретних фундаментних конструкцій;
- \* узагальнення розрахунку часткового коефіцієнта над фундаментними конструкціями.

На основі проведеного аналізу створюються ланцюги логічного виведення спорудження фундаментів. Для розв'язання даної задачі експерти самостійно дають імовірнісну оцінку, керуючись власним досвідом.

Результати логічного виведення бази знань представляються у вигляді дерева пошкоджень - ієрархічна класифікація типів пошкоджень.

У ході логічного висновку з фактів виконуються логічні операції. В результаті цього отримують складні висновки.

Метод коефіцієнта впевненості базується на евристичних спостереженнях, які отримані на основі роботи експертів: по-перше, в традиційній теорії ймовірностей сума ймовірностей події та її заперечення дорівнює одиниці; але в практичній діяльності оцінка достовірності події не означає, що ця подія одночасно оцінюється і на хибність; по - друге, знання самих правил більш важливе ніж знання алгебри для їх обчислення.

Міра впевненості — це неформальна оцінка, яку експерт додає до висновку, наприклад: "імовірно, це так", "можливо", "точно", "нічого не можна сказати" тощо.

Міра впевненості описує людську (суб'єктивну) оцінку причинної ймовірнісної міри. Продуктивність системи визначається якістю правил.

Перевагою методу коефіцієнта впевненості багато в чому полягає у використанні достатньо коротких послідовностей комбінованих правил і ви-

Таблиця 1. База правил дефектів експертної системи для конструктивного елемента фундаментів

Елементи	Формалізований запис	База правил для ланцюга логічного виведення
1	2	3
Фундаменти	Якщо FA і FB, то FC Якщо FC і FD, то FE Якщо FE і FK і FF, то FL	Якщо тріщини вимоцнення (FA) і відсутність в окремих місцях вимоцнення (FB), то пошкодження вимоцнення (FC); Якщо пошкодження вимоцнення (FC) і сліди зволоження стін підвальних приміщень (FD), то просідання фундаменту (FE); Якщо просідання фундаменту (FE) і масові наскрізні тріщини на всю висоту будівлі (FK) і здимання ґрунту в підвалі (FF), то осідання будівлі (FL)

користанні достатньо простих гіпотез. До недоліків можна віднести складність визначення у багатьох випадках коефіцієнтів впевненості, відсутність теоретичного обґрунтування результатів.

Сутність нечіткої логіки, що запропонував Л. Заде, від коефіцієнта впевненості полягає:

- у використанні лінгвістичних змінних (замість числових);
- у відношенні між змінними, що описуються за допомогою нечітких висловлювань;
- складні відношення визначаються нечіткими алгоритмами.

Коефіцієнт впевненості розраховується за наступними правилами:

1) при логічному зв'язку І між фактами P1 і P2:  
 $C(P1 \wedge P2) = \text{MIN}(C(P1), C(P2));$  (1)

2) при логічному зв'язку АБО між фактами P1 і P2:

$$C(P1 \vee P2) = \text{MAX}(C(P1), C(P2)).$$
 (2)

Коефіцієнти впевненості приписуються не тільки фактам, але і правилам. Позначимо коефіцієнт впевненості правила через Cr. Коефіцієнт Cr відповідає ступеню правдивості висновку правила при правдивих припущеннях. Якщо припущення характеризуються коефіцієнтом впевненості  $C_{пред} = 1$ , то коефіцієнт впевненості висновку  $C_{висн}$  розраховують за формулою:

$$C_{висн} = C_{пред} * Cr. \quad (3)$$

Як приклад у таблиці 1 представлена база правил дефектів експертної системи для конструктивного елемента фундаментів.

Дефекти пошкоджень конструкції фундаментів розглядаються як факти, що створюють припущення правила, тому визначаємо загальний коефіцієнт для фундаментів згідно з видом (1, 2):

$$CF(FA \wedge FB) = \text{min}(0.2; 0.3) = 0.2$$

$$CF((FA \wedge FB) \vee FD) = \text{max}(0.2; 0.4) = 0.4$$

$$CF(((FA \wedge FB) \vee FD) \vee FK \vee FF) = \text{max}(0.4; 0.65; 0.75) = 0.75 \rightarrow CF_{пред}$$

Допускаємо, що коефіцієнт впевненості правила  $CFr = 0.8$ , тоді:

$$CF_{висн} = CF_{пред} * CFr = 0.75 * 0.8 = 0.6.$$

На рисунку 1 представлений ланцюг логічного виведення при роботі експертної системи для конструктивного елемента "Фундаменти".

Відповідність стану конструкції коефіцієнту впевненості представлений у таблиці 2.

Надалі пропонується більш загальний підхід, пов'язаний із калібруванням статичних методів та методів дослідження невизначеностей.

У методі часткового коефіцієнта базові перемінні (тобто дії, характеристики опору та геометричні характеристики фундаментів) за рахунок використання часткових коефіцієнтів отримують відповідні розрахункові величини та виконується перевірка, яка має гарантувати, що немає перевищених відповідних граничних станів при обстеженні елемента фундаментів.

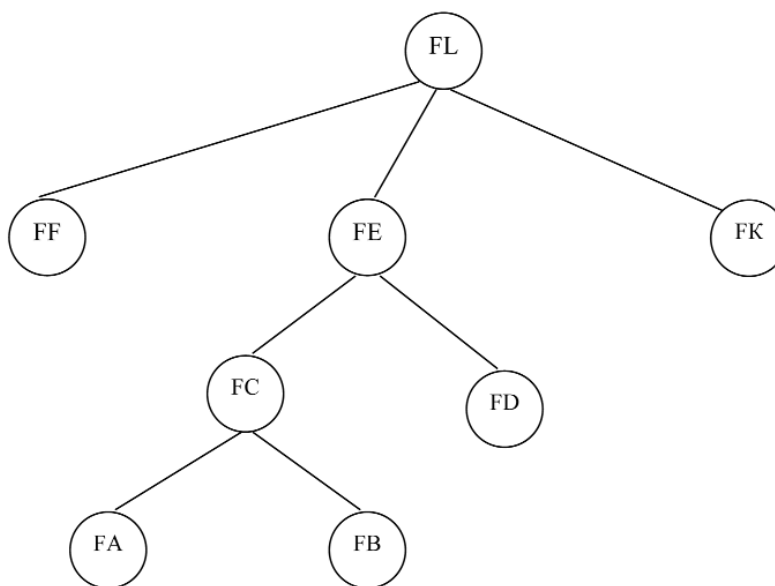


Рис. 1. Ланцюг логічного виведення при роботі експертної системи для конструктивного елемента "Фундаменти"

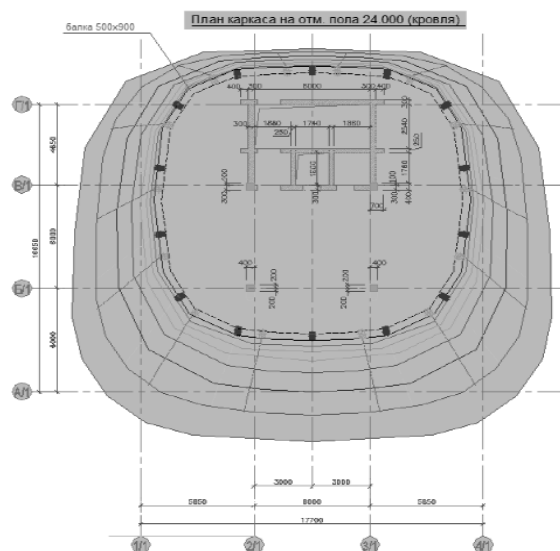


Рис.1. 3-Д вид каркаса и план верхнего этажа. Секции №5-2

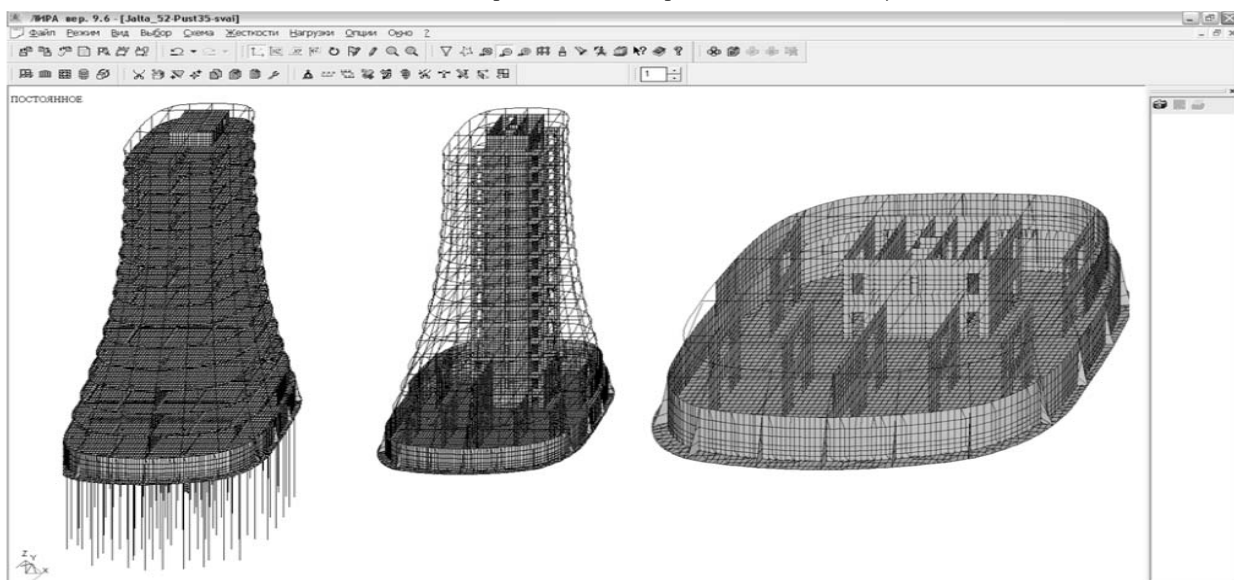


Рис. 2. Расчетная схема МКЭ каркаса. Секции №5-2. МКЭ схема фундаментной плиты с контрфорсами.

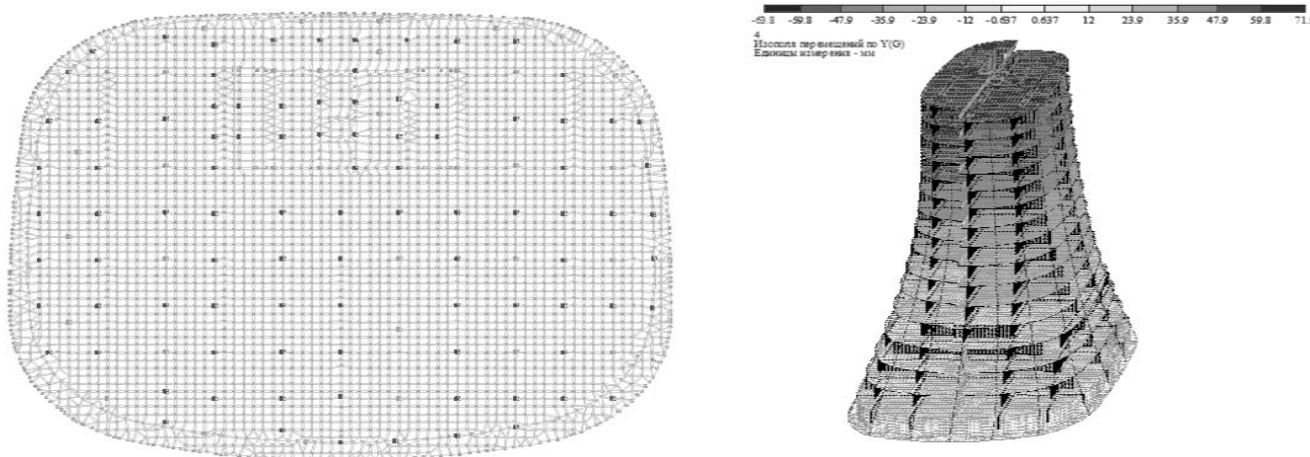


Рис. 3. Схема МКЭ свайного поля без демпферов и деформации каркаса при плитах перекрытия толщиной 20см (вариант-1)

Кольорові рисунки до статті В.П.Максименка та Л.В.Філінського "ЭФФЕКТНЫЕ ФУНДАМЕНТЫ ДЕМПФЕРНОГО ТИПА ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ БОЛЬШОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ" на стор. 6

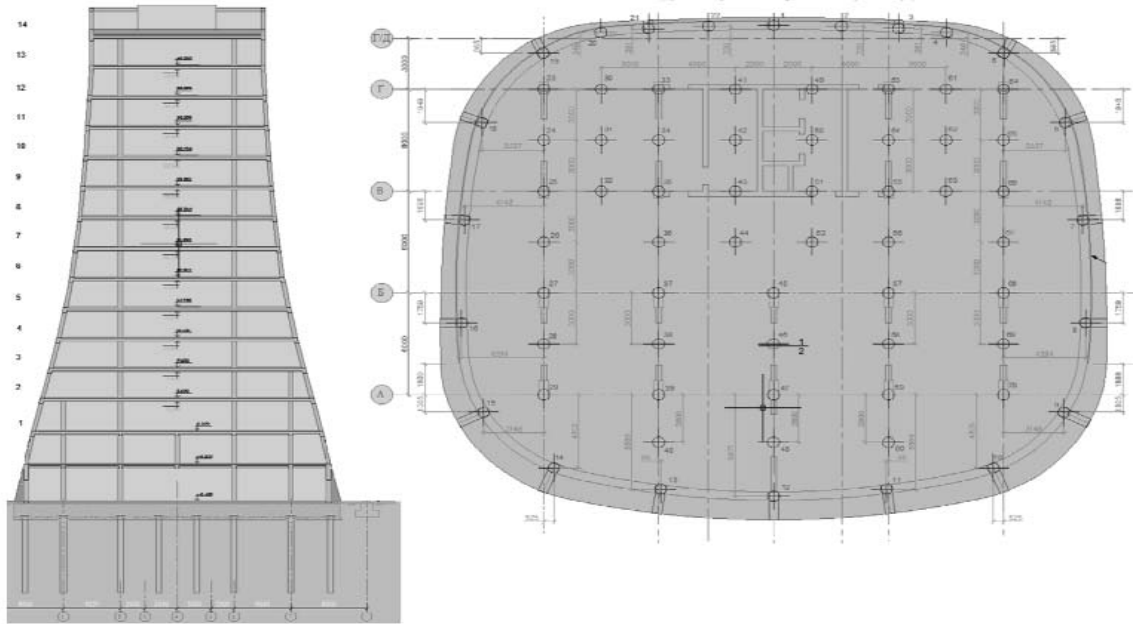


Рис. 4. Разрез секции №5-2 и план фундаментов при использовании демпферов (вариант 2)

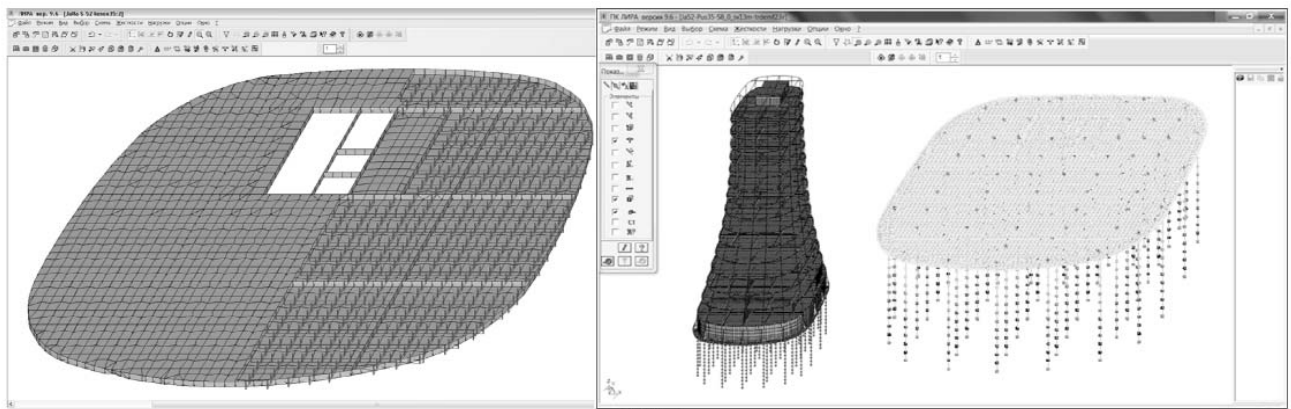


Рис. 5. Схема МКЭ кессонной плиты перекрытия каркаса и фундаментной плиты на демпферах

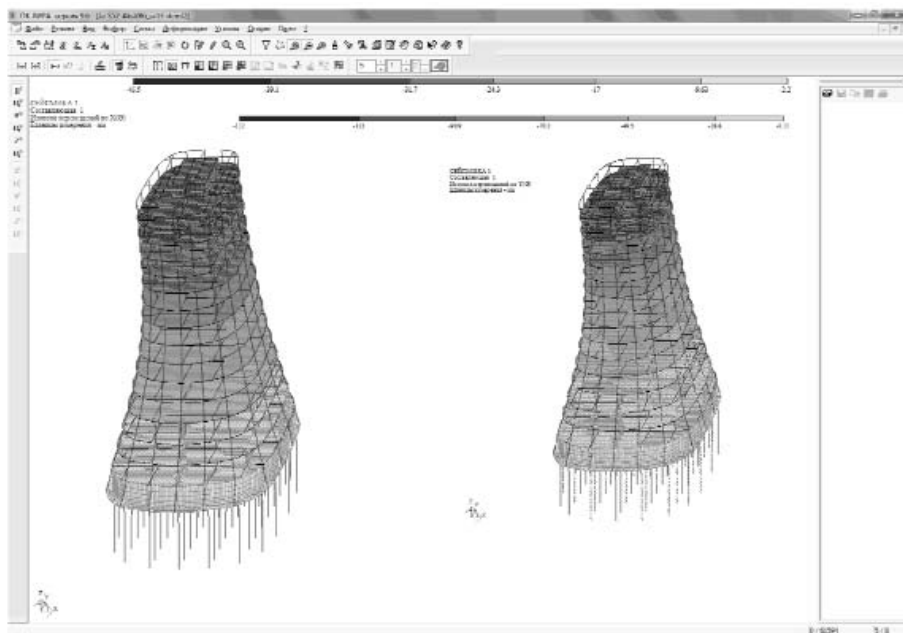


Рис. 7. Деформации каркаса здания при сейсмическом воздействии по синтезированной трехкомпонентной акселерограмме vb6mod29

Кольорові рисунки до статті В.П.Максименка та Л.В.Філінського "ЭФФЕКТИВНЫЕ ФУНДАМЕНТЫ ДЕМПФЕРНОГО ТИПА ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ БОЛЬШОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ" на стор. 6



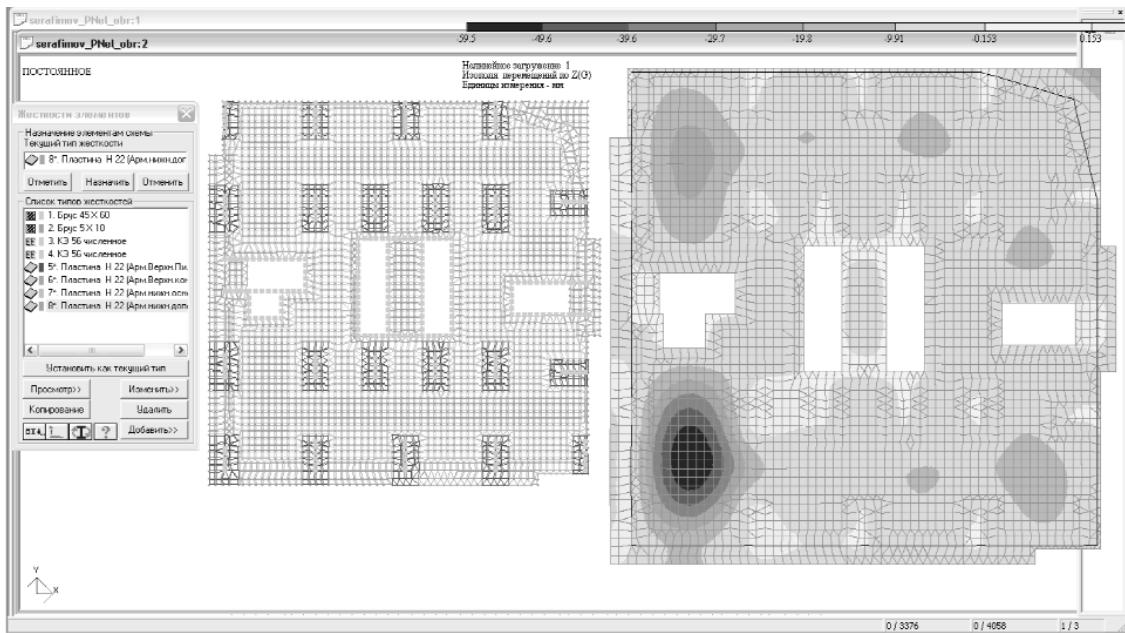


Рис. 1. Схема розташування типів армування та деформована схема після руйнування колони

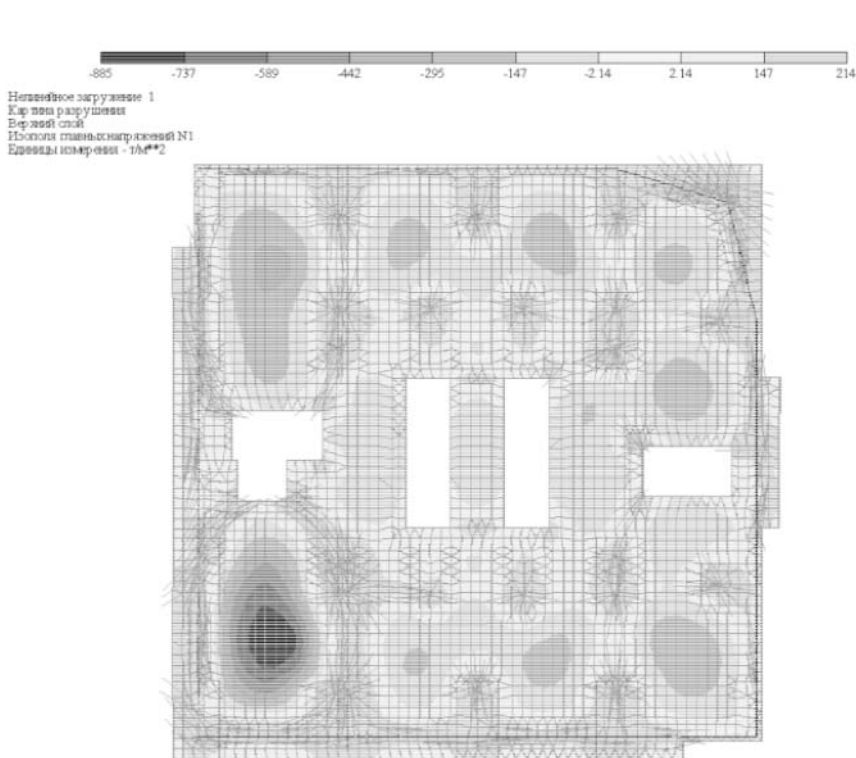
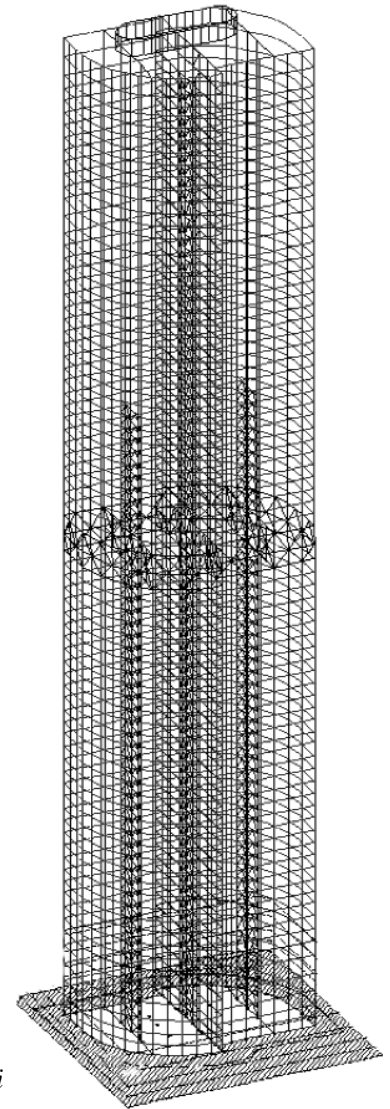
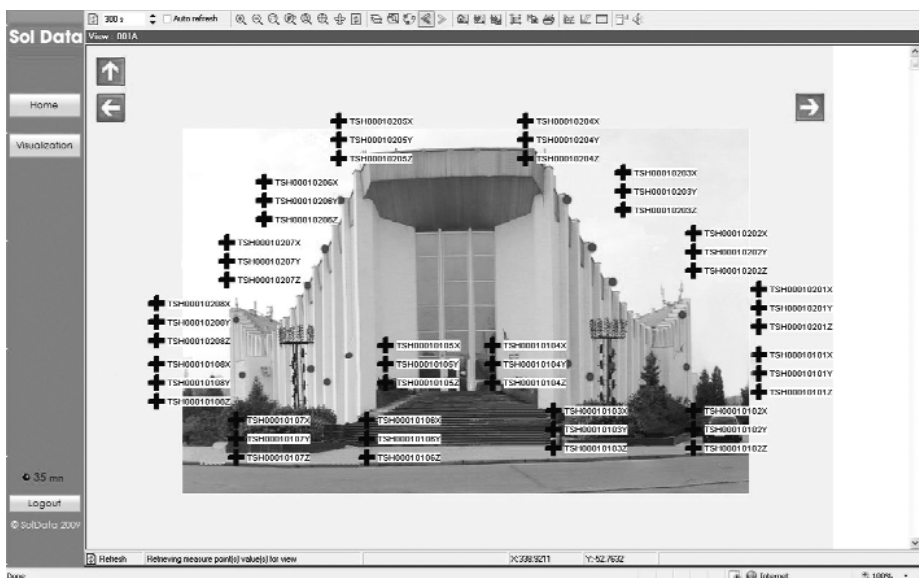


Рис. 2. Схема розвитку тріщин у плиті

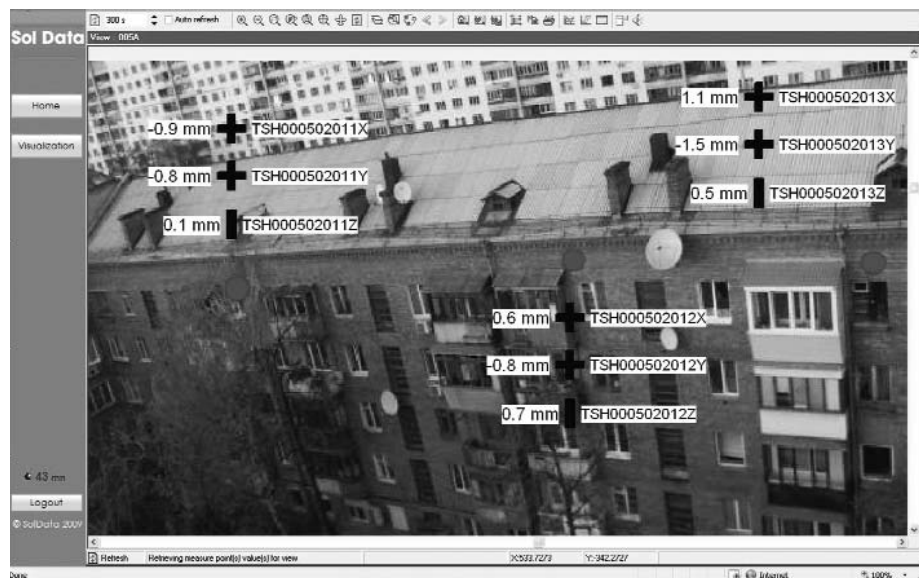
Рис. 3. Схема розташування аутригерного поверху в багатопверховій будівлі



Кольорові рисунки до статті М.С. Барабаш, Ю.В. Гензерського, Я.В. Покотила "МЕТОДИ МІНІМІЗАЦІЇ ЙМОВІРНОСТІ ПРОГРЕСУЮЧОГО РУЙНУВАННЯ ВИСОТНОЇ БУДІВЛІ ПРИ ДІЇ СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ" на стор. 17



*Рис. 3. Визуализация данных измерений деформаций автоматизированного геодезического комплекса "Кентавр" на существующих зданиях*



*Рис. 4. Визуализация данных измерений деформаций автоматизированного геодезического комплекса "Кентавр" на существующих зданиях (жилом здании)*



*Рис. 5. Месторасположение точек наблюдения деформаций поверхности примыкающей территории, окружающей здания и коммуникации*

Кольорові рисунки до статті І.В. Кедик "АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО И ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СТРОИТЕЛЬСТВА ВЫСОТНОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ЦЕНТРА" на стор. 55



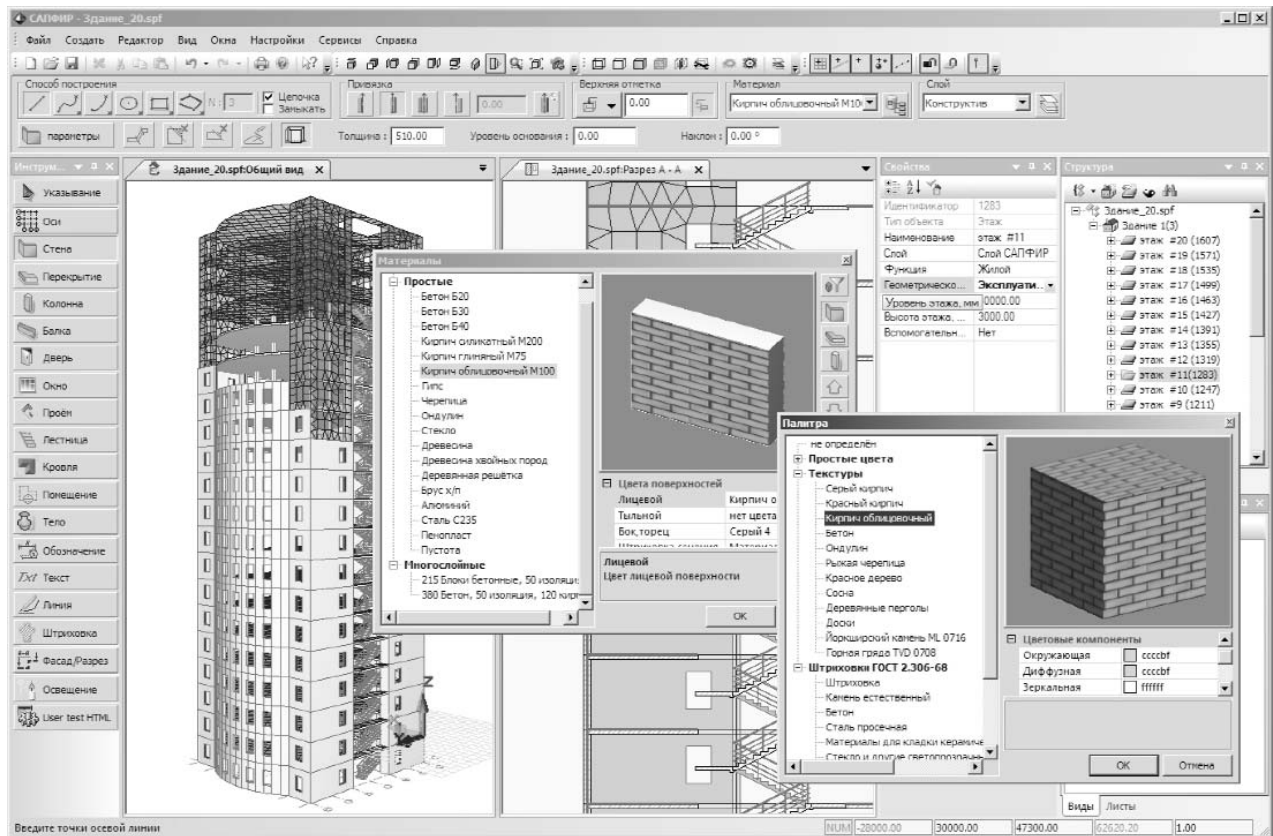


Рис. 3. Технология создания ЦМО средствами САПФИР

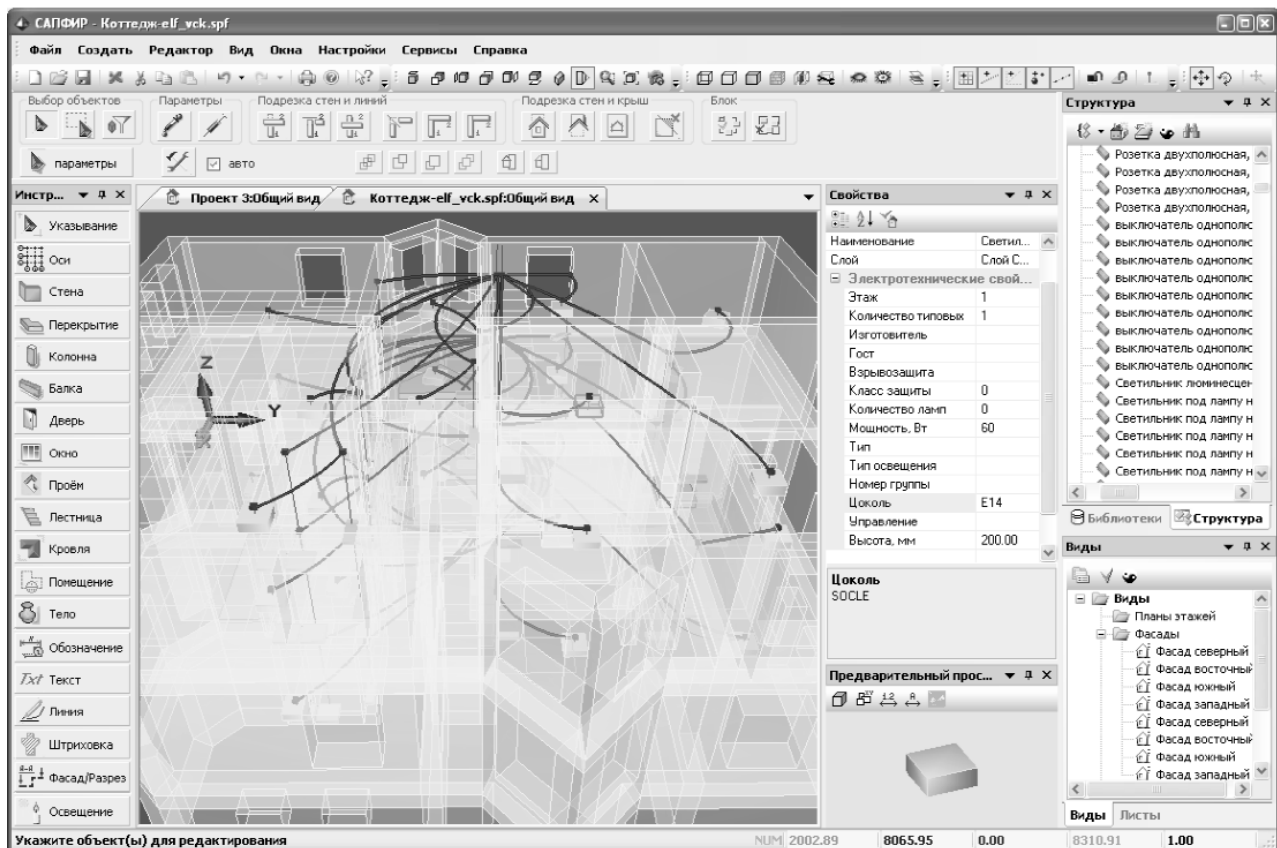


Рис. 4. Пример импорта электротехнической части проекта в САПФИР

Кольорові рисунки до статті А.С. Городецького і М.С. Барабаш "КОНЦЕПЦІЯ ІНТЕГРАЦІЇ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТИВАННЯ С ІСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГІЇ ІНФОРМАЦІОННОГО МОДЕЛЮВАННЯ" на стор. 67



Таблиця 2. Коефіцієнти впевненості нормативного стану фундаментних конструкцій

№ з/п	Нормативний стан	Коефіцієнт впевненості
1	2	3
1	II – задовільний	0,00....0,25
2	III – задовільний, що межує з непридатним до нормальної експлуатації	0,25....0,50
3	III – непридатний до нормальної експлуатації	0,50.....0,75
4	IV – аварійний	0,75.....1,00

Чисельні значення для часткових коефіцієнтів можуть визначатись двома шляхами:

\* на основі калібрування, виходячи з довголітніх експериментів та будівельних конструкцій;

\* на основі статистичної оцінки експериментальних даних та польових спостережень (це повинно виконуватись у рамках імовірнісної теорії надійності).

Схематичний огляд різних наявних методів калібрування розрахункових формул для часткового коефіцієнта (граничні стани при обстеженні технічного стану фундаментів) та відносини між ними представлені на рисунку 2.

Імовірнісні калібрувальні процедури для част-

Таблиця 3. Зв'язок між  $\beta$  та  $P_f$

$P_f$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
$\beta$	13	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

кових коефіцієнтів можуть бути розподілені на два головних класи:

- повністю імовірнісні методи (рівень III);
- методи надійності першого порядку (FORM) (рівень II).

В обох методах рівня II і рівня III слід ідентифікувати міру надійності з вірогідністю ймовірності

$$P_s = (1 - P_f), \tag{4}$$

де  $P_s$  – імовірність життєздатності;

$P_f$  – імовірність руйнування стосовно розглянутої форми руйнування в межах відповідного базового періоду.

Якщо підрахована імовірність руйнування є більшою ніж попередньо задана величина, тоді конструкція конструктивного елемента повинна розглядатися як непридатна.

**Індекс надійності  $\beta$**

У процедурах рівня II альтернативна міра надійності умовно визначається за допомогою індекса надійності  $\beta$ , який пов'язаний з  $P_f$ :

$$P_f = \Phi(-\beta), \tag{5}$$

де  $\Phi$  – кумулятивна функція стандартного нормального розподілення.

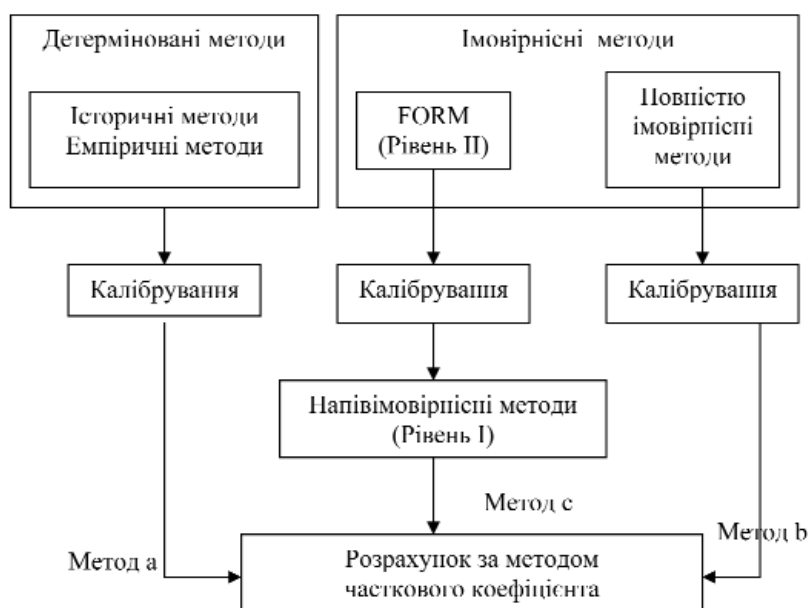


Рис. 2. Загальне зображення методів надійності

Зв'язок між  $\Phi$  та  $\beta$  наведений у таблиці 3.

Імовірність руйнування конструкції фундаменту  $P_f$  може виражатись через функцію ефективності  $q$  так, що вважається, що конструкція витримає навантаження без руйнування, якщо  $q > 0$ , і буде зруйнована, якщо  $q < 0$ :

$$P_f = P_{zob}(q < 0), \quad (6)$$

Якщо  $R$  – опір, а  $E$  – результат дій, функція ефективності  $q$  становить:

$$q = R - E, \quad (7)$$

з випадковими величинами  $R$ ,  $E$  та  $q$ .

Якщо  $q$  має нормальне розподілення,  $\beta$  приймається, як:

$$\beta = \mu_q / \delta_q, \quad (8)$$

де  $\mu_q$  – середнє значення;  
 $\delta_q$  – стандартне відхилення.

Так що  $\mu_q - \beta \delta_q = 0$ , (9)

$$P_f = P_{zob}(q < 0) = P_{zob}(q < \mu_q - \beta \delta_q). \quad (10)$$

Для інших розподілів  $q$  та  $\beta$  є тільки умовною мірою надійності.

### Задані величини індекса надійності $\beta$

Задані величини для індекса надійності конструкції фундаменту  $\beta$  для різних розрахункових ситуацій, а також для базових періодів від 1 року до 50 років наведені в таблиці 3. Величини  $\beta$  в таблиці 4 відповідають рівням безпеки для конструктивних елементів класів надійності RC2.

Для цих обчислень  $\beta$ :

- для параметрів міцності матеріалів і конструкцій, а також невизначеностей моделей, як правило, використовується логнормальний розподіл або розподіл Вейнбулла;

- для власної ваги конструкції, як правило, використовується нормальний розподіл;

- при розгляді перевірок, які не пов'язані зі втомою, для перемінних дій для спрощення використовується нормальний розподіл. Розподіл екстремальних значень був би більш прийнятним.

Таблиця 4. Заданий індекс надійності для елементів конструкції класу RC2

Граничний стан	Заданий індекс надійності $\beta$	
	1 рік	50 років
Несуча здатність	4,7	3,8
Втома		від 1,5 до 3,8
Експлуатаційна придатність (незворотний)	2,9	1,5
Залежить від ступеня можливості проведення інспекцій, ремонтів та допустимого ушкодження		

Коли головні невизначеності викликані діями, що мають статистично незалежні щорічні максимальні значення, то для іншого базового періоду величина  $p$  може підраховуватись з використанням наступної формули:

$$\Phi(\beta_n) = [\Phi(\beta_1)]^n, \quad (11)$$

де  $\beta_n$  – індекс надійності за базовий період за  $n$  років,

$\beta_1$  – індекс надійності за один рік.

Дійсна частота випадків руйнування значно залежить від людських помилок (людський фактор), котрі не розглядаються у розрахунку часткового коефіцієнта.

Таким чином, не обов'язково забезпечувати індикацію дійсної частоти руйнування конструкції.

### Підхід до калібрування розрахункових величин

У методі перевірки надійності проектної величини (рис. 2) розрахункові величини повинні бути визначеними для всіх базових перемінних. Розрахунок розглядається як достатній, якщо не досягаються граничні стани при розрахункових величинах, які запроваджуються у розрахункових моделях. Використовуючи умовні позначки, це можливо виразити, як:

$$E_d < R_d, \quad (12)$$

де підрядковий індекс  $d$  відноситься до розрахункових величин. Це практичний шлях для гарантування, що індекс надійності  $\beta$  дорівнює або більший за задану величину.

$E_d$  та  $R_d$  можуть бути відображені у частково символічній формі, як:

$$E_d = E \{F_{d1}, F_{d1}, \dots, \alpha_{d1}, \alpha_{d2}, \dots, \Theta_{d1}, \Theta_{d2}, \dots\} \quad (13),$$

$$R_d = R \{X_{d1}, X_{d1}, \dots, \alpha_{d1}, \alpha_{d2}, \dots, \Theta_{d1}, \Theta_{d2}, \dots\} \quad (14),$$

де

$E$  – результат дії;

$R$  – опір;

$F$  – дія;

$X$  – властивість матеріалу;

$\alpha$  – геометрична властивість;

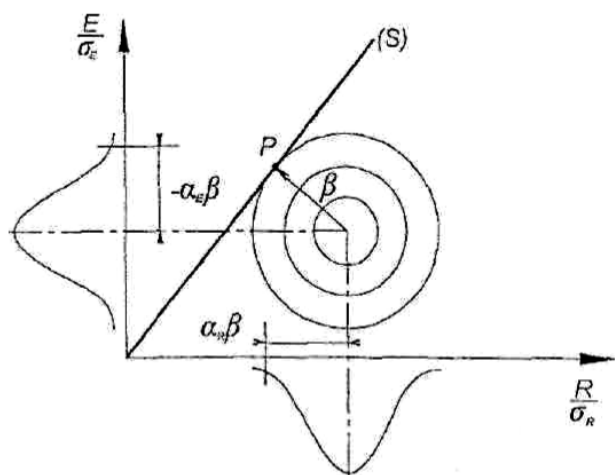
$\Theta$  – невизначеність моделі.

Для особливих граничних станів може бути необхідною більш загальна формула, щоб виразити граничний стан.

$S$  – межа руйнування  $g$ ,

$P$  – розрахункова точка.

Розрахункові величини базуватимуться на величинах базових перемінних в розрахунковій



**Рис. 3.** Розрахункова точка та індекс надійності  $\beta$  відповідно до методу надійності першого порядку (FORM) для нормально розподілених некорельованих перемінних

точці FORM, котра може бути визначеною як точка руйнування поверхні, найближча до центра розподілу у просторі нормалізованих перемінних (як схематично визначено на рисунку 3).

Розрахункові величини впливів дії  $E_d$  та опору  $R_d$  потрібно визначати так, щоб вірогідність мати більш несприятливу величину була такою:

$$P(E > E_d) = \Phi(+\alpha_E \beta), \quad (15)$$

$$P(R > R_d) = \Phi(-\alpha_R \beta), \quad (16)$$

де

$\beta$  – індекс заданого рівня надійності,

$\alpha_E$  та  $\alpha_R$  з  $|\alpha| < 1$  – величини коефіцієнтів чутливості FORM.

Величина  $\alpha$  є негативною для несприятливих дій та впливів дій та позитивною для опору.

$\alpha_E$  і  $\alpha_R$  можуть бути прийнятими відповідно 0,7 і 0,8 за умови:

$$0,16 < \delta_E / \delta_R < 7,6, \quad (17)$$

де  $\delta_E$  та  $\delta_R$  – стандартне відхилення результату дій та опору відповідно в формулах (15,16) Це дає:

$$P(E > E_d) = \Phi(-0,7\beta), \quad (18)$$

$$P(R > R_d) = \Phi(-0,8\beta). \quad (19)$$

Якщо умова (17) не виконується, слід використати  $\alpha = \pm 1,0$  для перемінної з більш широким стандартним відхиленням та  $\alpha = \pm 0,4$  для перемінної з меншим стандартним відхиленням.

Коли модель дії містить декілька базових перемінних, формулу (18) слід використовувати тільки для провідної перемінної. Для супутніх дій розрахункові величини можуть визначатись за допомогою:

$$P(E > E_d) = \Phi(-0,4 \times 0,7 \times \beta) = \Phi(-0,28\beta). \quad (20)$$

**Висновок.** Ця методика надалі передбачає інші підходи до створення ланцюгів логічного виведення на рівні нейронних мереж.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Калинин В.М. Оценка технического состояния зданий. / В.М. Калинин, С.Д. Сокова. – М.: ИНФРА, 2006. – 268 с.

2. Клименко Є.В. Технічна експлуатація та реконструкція будівель і споруд: Навч. посібник / Є.В. Клименко. – Київ: Центр навчальної літератури, 2004. – 304 с.

3. Правила оценки физического износа жилых зданий (ВСН 53-86 (р)) / Госгражданстрой. – М.: Прейскурантиздат, 1988. – 72 с.

4. Нормативні документи з питань обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель і споруд. – К.: НДІБВ, 2003.- 144 с.

5. ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008

#### АННОТАЦИЯ

Рассматривается обобщенная оценка конкретных фундаментных конструкций. В этой работе исследовано обобщение расчетов частичного коэффициента над фундаментными конструкциями. Разработаны и исследованы цепи логического выведения оценки дефектов и повреждений конструктивных элементов здания фундаментов. Эта методика в дальнейшем предусматривает другие подходы к созданию цепей логического выведения на уровне нейронных сетей.

Ключевые слова: здания, повреждения и дефекты, моделирование надёжности, информационная технология, база знаний, цепи логического выведения.

#### ANNOTATION

The generalized estimation of concrete fundamental constructions is examined. In this work generalization of calculations of partial coefficient is investigated above fundamental constructions. Developed and investigational the chain of logical leadingout of estimation of defects and damages of structural elements of building of foundations. This method in future foresees other going near creation of chains of logical leadingout at level of neyronikh networks.

Keywords: buildings, damages and defects, information technology, design of reliability, the knowledge base, chains of logic deducing.