

УДК 519.248:001.89

**В.О. Собуцький**, канд. техн. наук

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна

**В.С. Бура**, інженер

Управління з питань НС та ЦЗН Рівненської ОДА, м. Рівне, Україна

### **МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВИРОБНИЧО-ПРОМИСЛОВОЇ СИТУАЦІЇ В СИСТЕМІ МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ ЯК ЕЛЕМЕНТУ МІСЬКОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

**В.А. Собуцький**, канд. техн. наук

Національний університет водного господарства та природопольовання, г. Ровно, Украина

**В.С. Бура**, инженер

Управление по вопросам чрезвычайных ситуаций и гражданской защиты населения Ровенской ОГА, г. Ровно, Украина

### **МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ПРОМЫШЛЕННОЙ СИТУАЦИИ В СИСТЕМЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ КАК ЭЛЕМЕНТА ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

**V.O. Sobutskyi**, Candidate of Technical Sciences

National University of Water Management and Nature, Rivne, Ukraine

**V.S. Bura**, engineer

Department of Emergencies and Civil Protection Rivne RSA, Rivne, Ukraine

### **METHODS OF MATHEMATICAL MODELING OF PRODUCTION-INDUSTRIAL SITUATION IN THE SYSTEM OF MAIN ELECTRIC NETWORKS AS AN ELEMENT OF CITY INFRASTRUCTURE**

*Пропонується приклад застосування методів системного аналізу й математичного планування експерименту для вирішення проблем експлуатаційної надійності у сфері містобудування. Приведені алгоритми розв'язання типових задач із апріорного ранжирування уражальних чинників джерел техногенних надзвичайних ситуацій, прогнозування виробничо-промислової ситуації в системі магістральних електромереж і пошуку шляхів реалізації технічних рішень щодо сталого енергопостачання та світломаскування категоризованих міст та об'єктів економіки. Розроблена функціональна структура системи інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту у сфері містобудування містить відповідний математичний апарат для управління виробничо-промисловою ситуацією за критеріями ефективності, а також забезпечує синтез її локальних теорій.*

**Ключові слова:** інженерно-технічні заходи забезпечення цивільного захисту, магістральні електромережі, аналітично-експертне забезпечення цивільного захисту, виробничо-промислова ситуація, математичне планування експерименту.

*Предлагается пример использования методов системного анализа и математического планирования эксперимента для решения проблем эксплуатационной надежности в сфере градостроительства. Приведены алгоритмы решения типовых задач по априорному ранжированию факторов источников техногенных чрезвычайных ситуаций, прогнозирования производственно-промышленной ситуации в системе магистральных электросетей и поиска путей реализации технических решений по стабильному энергообеспечению и светомаскировке категоризованных городов и объектов экономики. Разработана функциональная структура системы инженерно-технических мероприятий обеспечения гражданской защиты в сфере градостроительства содержит соответственный математический аппарат для управления производственно-промышленной ситуацией по критериям эффективности, а также обеспечивает синтез её локальных теорий.*

**Ключевые слова:** инженерно-технические мероприятия обеспечения гражданской защиты, магистральные электросети, аналитическо-экспертное обеспечение гражданской защиты, производственно-промышленная ситуация, математическое планирование эксперимента.

*It is offered example of the use the methods of the system analysis and mathematical planning the experiment for decision of the problems of the science and technical progress in sphere urban planning. The brought algorithms of the decision of the standard problems on a priori ranking harmful factor of man-caused sources emergency situation, forecasting's production-industrial situation in system of the main electric networks and searching for of the ways to realization of the technical decisions on stable energy provision and blackout category city and object of the economy. Designed functional structure of the system engineering-technical action of the provision of civil protection in sphere urban planning contains the corresponding mathematical device for governing production-industrial situation on criterion of efficiency, as well as provides the syntheses her(its) local theory.*

**Key words:** engineering-technical actions of the provision of civil protection, main electric networks, analytical-expert provision of civil protection, production-industrial situation, mathematical planning of the experiment.

**Постановка проблеми.** З метою створення містобудівних умов щодо реалізації забезпечення сталого функціонування окремих територіально-виробничих комплексів Українським державним НДІ проектування міст „Діпромiсто” ім. Ю.М. Білоконя (м. Київ) завершено розроблення пілотного розділу „Інженерно-технічні заходи цивільного захисту” схеми планування території Рівненської області (затверджена рішенням Рівненської обласної ради від 30.03.2012 № 598).

Разом із тим графічні матеріали та пояснювальна записка зазначеного розділу містобудівної документації за складом і змістом не відображають безумовного виконання вимог ДБН В.1.2-4-2006 та ДБН Б.1.1-5-2007, а тому потребують доопрацювання.

Причиною такого стану є відсутність надійних наукових методів аналітично-експертного забезпечення цивільного захисту, які дозволили б повною мірою врахувати закономірності дії уражальних чинників, що впливають на виробничо-промислову ситуацію, й реалізувати системність у її прогнозуванні. У цьому напрямку великі можливості відкриває метод багатофакторного прогнозування виробничо-промислової ситуації на основі математико-статистичного моделювання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Пізнавальна цінність математичних моделей, як засобу автоматичного керування системою, її глибокого пізнання та створення теорії є предметом активних досліджень науково-дослідних лабораторій Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне). Практичний інтерес у розв’язуванні будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту, представляють цифрові методи оптимізації, що реалізуються за допомогою сучасних комп’ютерних технологій [1].

На думку французького філософа Е. Мейерсона (1859-1933), теорія пізнання сутності процесів, що відбуваються в досліджуваних системах, має будуватись не на результатах аналізу думок і тлумачень чисто логічного порядку, а лише відповідно до розгляду та інтуїтивного сприйняття констатацій емпіричного порядку. «Констатація емпіричного», згідно з Е. Мейерсоном, складається із сукупності існуючих наукових результатів та їх історії [2].

Результат усіх закономірностей, яким підпорядковуються дані представленого експерименту побудови математичної моделі виробничо-промислової ситуації в системі магістральних електромереж, із тлумачень, логічно доведених у межах досліджуваної підсистеми аналітично-експертного забезпечення цивільного захисту, й буде головною метою запропонованого наукового дослідження.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Запропонована методологія локальної теорії аналітично-експертного забезпечення цивільного захисту розглядається в межах представленої концепції науково-практичного забезпечення цивільного захисту, яка опирається на велику кількість експериментальних даних, і полягає в такому: теоретичне вираження системи інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту вказує на умови, яким мають задовольняти всі рівняння, визначені експериментальними фактами.

Розроблена функціональна структура системи інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту містить відповідний математичний апарат для управління виробничо-промисловою ситуацією за критеріями ефективності, а також забезпечує синтез її локальних теорій:

- довідково-інформаційного забезпечення (збір та оброблення вихідних даних, зонування територій за характером негативної дії уражальних чинників);
- інженерно-вишукувального забезпечення (пошук та обґрунтування рішень щодо енергопостачання й світломаскування категоризованих міст та об’єктів економіки, роз-

міщення підприємств сфери виробництва будівельних конструкцій, виробів і матеріалів, розвитку позаміської зони, інженерного забезпечення);

– проектного забезпечення (планування й забудова міст, населених пунктів і об'єктів економіки з урахуванням вимог Норм проектування інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту);

– аналітично-експертного забезпечення (прогнозування виробничо-промислової ситуації, пошук оптимального варіанта реалізації інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту у сфері містобудування).

**Мета статті.** Головною метою цієї роботи є залучення об'єктових ланок функціональної підсистеми «Освіта і наука України» єдиної державної системи цивільного захисту до організації, координації і надання допомоги кваліфікованих експертів у проведенні науково-технічних консультацій, експертних оцінювань і модельних експериментів у напрямку вдосконалення системи інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту.

Інженерно-технічні заходи забезпечення цивільного захисту (ІТЗ ЦЗ) – це комплекс прогнозних, аналітично-експертних, інженерно-вишукувальних і проектних робіт та довідково-інформаційних, консультативних і посередницьких послуг, які спрямовані на забезпечення сталого функціонування галузей національної економіки України в особливий період та убезпечення в умовах техногенних надзвичайних ситуацій.

Мета системного підходу до вирішення задач ІТЗ ЦЗ у галузі енергетики полягає в керуванні системою магістральних електромереж (МЕМ) через формулювання мети, виявлення особливостей та параметрів системи, від яких залежить досягнення мети, визначення показників і критеріїв ефективності, побудови математичної моделі та розроблення на її основі алгоритмів і програм визначення оптимальних значень уражальних чинників.

Після вивчення якісної структури досліджуваного процесу, виявлення й виключення чинників, що не чинять істотного впливу на критерії та показники ефективності, установлення обмежень і регульованих чинників, системний аналіз припускає математичне моделювання, що дозволяє кількісно виразити характер й ступінь впливу окремих елементів системи, а також їх взаємодію.

Викладена локальна теорія аналітично-експертного забезпечення цивільного захисту (АЕЗ ЦЗ) містить методологію багатофакторного прогнозування виробничо-промислової ситуації (ВПС) у системі МЕМ на основі математико-статистичного моделювання.

Показником I групи задач оптимізації підсистеми АЕЗ ЦЗ є системне прогнозування ВПС, а II групи – пошук оптимального варіанта реалізації ІТЗ ЦЗ у сфері містобудування. Прогнозування ВПС відноситься до числа погано організованих або так званих дифузних підсистем, характерними рисами яких є неможливість чіткого виділення окремих явищ і необхідність урахування багатьох різнорідних чинників. Для дифузних підсистем в умовах неповного знання механізму всіх явищ, що відбуваються в них, особливо ефективним є статистичний і кібернетичний методи дослідження.

Статистичний метод дозволяє розробляти рекомендації з оптимальної поведінки підсистеми в умовах невизначеності, а також представляти експериментальний матеріал у стандартній формі та здійснювати «згортку інформації» у формі аналітичного виразу – рівняння регресії. Це особливо важливо, коли обсяг інформації швидко зростає і необхідне найбільш компактне, а поряд із тим, достатньо повне її викладання.

Кібернетичний метод розкриває, насамперед, функціональні залежності підсистеми від середовища, абстрагуючись від внутрішніх причинно-наслідкових зв'язків, тобто використовує відомий принцип «чорного ящика». Кібернетичному моделюванню властива єдність функціонального підходу та оптимізації як засобу одержання даних для найкращого керування підсистемою.

Математичне планування експерименту (МПЕ) в теорії АЕЗ ЦЗ проводиться в три етапи:

- попереднє вивчення ВПС як об'єкта дослідження (постановка завдання, збір і оброблення апріорної інформації, висування робочої гіпотези; вибір параметрів оптимізації, незалежних змінних і обмежень; попередній експеримент);
- побудова відповідної математичної моделі та її інтерпретація;
- здійснення, при необхідності, технічної реалізації отриманих результатів.

Завдання математичного моделювання ВПС зводиться до одержання залежності, що характеризує зв'язок між параметром оптимізації ( $R_{v.B}^0/q^{1/3}$ ) і незалежними змінними  $X_k$  (чинниками), яку можна аналітично представити у вигляді функції:

$$R_{v.B}^0/q^{1/3} = \varphi(H/q^{1/3}, q, X_m, \dots, X_k), \text{ м/т}^{1/3}; \quad (1)$$

де  $R_{v.B}^0/q^{1/3}$  – наведений радіус зони виходу з ладу об'єкта системи за ударною хвилею

$$R_{v.B}^0/q^{1/3} = \sum_{i=1}^{10} (H/q^{1/3})_i + q + X_m \rightarrow \max, \text{ м/т}^{1/3}; \quad (2)$$

$H/q^{1/3}$  – наведена висота ядерного вибуху  $i$ -го виду з урахуванням умовної потужності вибуху ( $q$ ) або інших незалежних змінних

$$40 \geq H/q^{1/3} \geq (-40), \text{ м/т}^{1/3}; \quad (3)$$

$q$  – калібр ядерного боєприпасу

$$q = 10^8 = \text{const}, \text{ т}; \quad (4)$$

$X_m$  – метеоумови середньої смуги (відкрита місцевість, літо, дуже слабка мряка, видимість 1-2 км);

$X_k$  – незалежні змінні I групи задач оптимізації підсистеми АЕЗ ЦЗ;

$n$  – кількість видів ядерних вибухів, за їх висотою (глибиною) від поверхні землі (води) та характеристик середовища.

Для якісного виконання завдань із прогнозування ВПС необхідно розрахувати значення величини приведенного радіусу зони виходу з ладу об'єкта системи МЕМ ( $R_{v.B}^0/q^{1/3}$ ) за дією всіх уражальних чинників, із прив'язкою до домінуючого – надмірного тиску у фронті повітряної ударної хвилі ( $\Delta p_\phi$ ):

$$\Delta p_\phi \rightarrow \min, \text{ кг/см}^2. \quad (5)$$

Невідома функція відгуку адекватно описується поліноміальним рівнянням другого порядку:

$$R_{v.B}^0/q^{1/3} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{11} \beta X_i + \sum_{i=1}^{11} \beta_i X_i^2 + \sum_{i \neq j}^{11} \beta_{ij} X_i X_j + \dots, \text{ м/т}^{1/3}. \quad (6)$$

Вид і показник степеня полінома вибираються або на підставі теоретичного аналізу, або апріорі, а потім уточнюються статистично. Оцінки коефіцієнтів регресії ( $\beta$ ) поліноміальних моделей можуть бути знайдені на основі експерименту.

Відповідно до сучасної математичної теорії експерименту найбільш вдале поєднання статистичного й кібернетичного підходів до дослідження складних дифузних підсистем має місце в методах МПЕ, що на цей час досить добре розроблені стосовно різних галузей науки і техніки, у тому числі й будівельних технологій.

Якщо на стадії одержання математичних моделей дифузних підсистем можливе абстрагування від складних причинно-наслідкових зв'язків, то далі аналіз моделей дозволяє значною мірою розкрити ці зв'язки і дослідити сутність процесів, що відбуваються в підсистемі.

Пізнавальна цінність математичних моделей полягає у тому, що вони є засобом не тільки автоматичного керування підсистемою АЕЗ ЦЗ, але й засобом її глибокого пізнання та створення теорії [1].

Результат усіх закономірностей, яким підпорядковуються дані представленого експерименту побудови математичної моделі ВПС, із тлумачень, логічно доведених у межах досліджуваної системи, й складає головну мету наукового дослідження.

На основі апріорної інформації на першому етапі МПЕ відібрано 11 чинників, що чинять вплив на ВПС у системі МЕМ. Для ранжирування уражальних чинників застосували метод формалізації згідно з літературними даними.

За результатами ранжування методом формалізації відповідно до літературних даних побудовано середню апріорну діаграму рангів впливу розглянутих чинників на ВПС у системі МЕМ при обраних межах їх зміни (рис.).

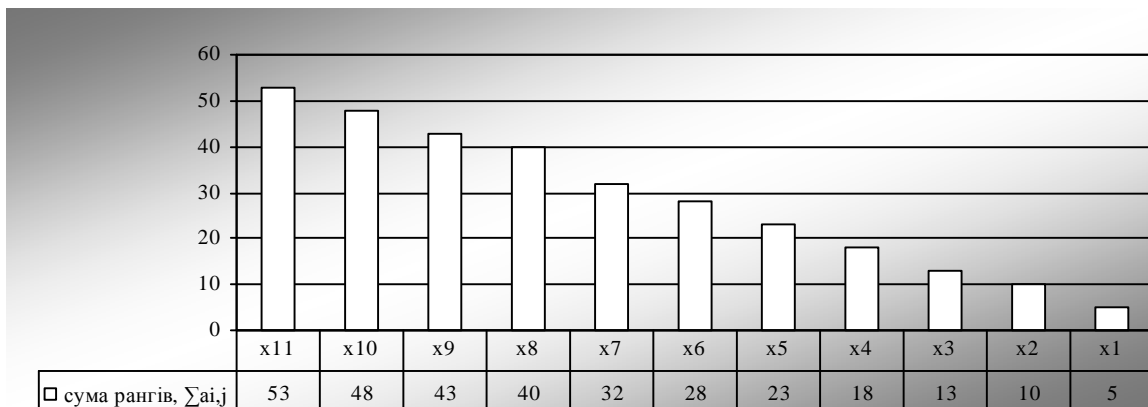


Рис. Середня апріорна діаграма рангів впливу чинників на ВПС

Аналіз діаграми рангів показує, що розподіл чинників є нерівномірним і близьким до експоненціального. Це дозволяє виділити безперечно основні уражальні чинники, а частину віднести до так званого «шумового поля». До таких найбільш суттєвих чинників, що впливають на ВПС у системі МЕМ можна віднести: надмірний тиск у фронті повітряної ударної хвилі ( $\Delta P_\phi$ ), тиск сейсмовибухових і сейсмічних хвиль у ґрунті ( $\sigma$ ), а також тиск у фронті підводної ударної хвилі ( $p_m$ ). Найбільш слабким чинником за літературними даними стала часова функція напруженості електричного поля ( $E(t)$ ).

На другому етапі МПЕ вибираємо основні критерії оптимізації вихідного параметра ( $R_{y.B}^0/q^{1/3}$ ) підсистеми АЕЗ ЦЗ в системі МЕМ, а саме:

$C_p^0$  – ступінь руйнування об’єкта;

$p^0$  – ймовірність ураження об’єкта, %;

$k^0$  – коефіцієнт послаблення випромінювання захисною товщею об’єкта;

$Q_n^0$  – середня густина радіоактивного забруднення поверхонь об’єкта, розп/хв·см<sup>2</sup>;

$c_\phi$  – коефіцієнт опору тиску газового потоку захисної товщи об’єкта;

$N_e$  – концентрація електронів у місці підвищеної іонізації, 1/см<sup>3</sup>;

$E_{МАКС}^B$  – максимальне значення вертикальної складової напруженості електричного поля, В/м,

визначені експериментальним шляхом залежно від потужності та висоти вибуху, віддалення об’єкта від центру (епіцентру) вибуху, розміру й стійкості об’єкта до дії уражальних чинників, його розташування на місцевості, метеорологічних умов, характеру рельєфу місцевості тощо [3].

Сукупність усіх значень, які може приймати чинник у межах експерименту, називають його областю варіювання. У матриці планування (таблиці планових експериментів) чинники даються в кодованому вигляді. При цьому за основний рівень варіювання

приймають центральну, тобто нульову точку і позначають її ( $X_{io}$ ), а інтервал варіювання – ( $\Delta X_i$ ). За допомогою додавання або віднімання значення інтервалу варіювання від значення чинника, що знаходиться на основному рівні, одержують відповідно верхній, що позначається (+1) або (+), або нижній, що позначається (-1) або (-), рівень чинника.

Взаємозв'язок між натуральними ( $X_i$ ) і кодованими значеннями чинників ( $x_i$ ) визначають за формулою:

$$x_i = (X_i - X_{io}) / \Delta X_i. \quad (7)$$

Вибір інтервалів варіювання залежить від цілей і можливостей дослідження, а також від конкретних умов проведення експерименту, які зводяться у спеціальну таблицю.

Таблиця

*Умови планування експерименту побудови математичної моделі ВПС у системі MEM*

| № з/п | Чинники  |                  | Рівні варіювання     |                      |                      | Інтервал варіювання, $\Delta X_i$ , натур. вим. |
|-------|--|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---|
|       | натуральний вигляд   | кодований вигляд | -1                   | 0                    | +1                   |   |
| 1     | 2  | 3                | 4                    | 5                    | 6                    | 7   |
| 1     | Надмірний тиск у фронті повітряної ударної хвилі ( $\Delta p_\phi$ ), кг/см <sup>2</sup> | $x_1$            | 0,3                  | 0,35                 | 0,4                  | 0,05  |
| 2     | Тиск сейсмовибухових і сейсмічних хвиль у ґрунті ( $\sigma$ ), кг/см <sup>2</sup>        | $x_2$            | 0,2                  | 0,25                 | 0,3                  | 0,05  |
| 3     | Тиск у фронті підводної ударної хвилі ( $p_m$ ), кг/см <sup>2</sup>                      | $x_3$            | 30                   | 185                  | 340                  | 155   |
| 4     | Світловий імпульс випромінювання ( $u$ ), кал/см <sup>2</sup>                            | $x_4$            | 50                   | 210                  | 370                  | 160   |
| 5     | Сумарна доза проникної радіації за захисною товщею ( $D_x$ ), р                          | $x_5$            | $1,1 \cdot 10^{-18}$ | $2,1 \cdot 10^{-16}$ | $4,3 \cdot 10^{-16}$ | $2,1 \cdot 10^{-16}$                            |
| 6     | Сумарний потік нейтронів ( $\Pi_n$ ), нейтр/см <sup>2</sup>                              | $x_6$            | 0                    | $5 \cdot 10^{11}$    | $10^{12}$            | $5 \cdot 10^{11}$                               |
| 7     | Імпульс тиску рентгенівського випромінювання ( $I_\delta$ ), кг-сек/см <sup>2</sup>      | $x_7$            | 0,046                | 0,058                | 0,070                | 0,012   |
| 8     | Рівень радіації ( $P$ ), р/год   | $x_8$            | 24184                | 255370               | 486556               | 231186  |

Закінчення табл.

|    |   |          |        |                  |                  |                  |
|----|---|----------|--------|------------------|------------------|------------------|
| 1  | 2   | 3        | 4      | 5                | 6                | 7                |
| 9  | Імпульс тиску газового потоку ( $I_\delta$ ), кг-сек/см <sup>2</sup>              | $x_9$    | 168,90 | 168,925          | 168,95           | 0,025            |
| 10 | Концентрація електронів у місці підвищеної іонізації ( $N_e$ ), 1/см <sup>3</sup> | $x_{10}$ | 0      | $0,9 \cdot 10^5$ | $1,8 \cdot 10^5$ | $0,9 \cdot 10^5$ |
| 11 | Часова функція напруженості електричного поля ( $E(t)$ ), В/м                     | $x_{11}$ | 62     | 372              | 682              | 310              |

Для побудови лінійних залежностей застосовуються дворівневі, а для квадратичних – тривірневі плани й плани з більшою кількістю рівнів.

Результати дослідів обробляють за допомогою методів математичної статистики, одержуючи залежності між вихідними параметрами й чинниками, що на них впливають, у вигляді лінійних або неповних квадратичних рівнянь регресії.

Таким чином, отримуємо математичну модель ВПС у системі MEM:

$$R_{y.B}^0 / q^{1/3} = \varphi(x_1, x_2, x_4, x_5, x_6) + f(x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}), \text{ м/т}^{1/3}, \quad (8)$$

або

$$R_{y.B}^0 / q^{1/3} = \varphi(\Delta p_\phi, \sigma, u, D_x, \Pi_n) + f(I_\delta, P, I_\delta, N_e, E(t)), \text{ м/т}^{1/3}. \quad (9)$$

Якщо функції  $\varphi(x_1, x_2, x_4, x_5, x_6), f(x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11})$  задані на відрізку  $[a, b]$  і мають певні наперед визначені властивості, у такому випадку можна стверджувати, що отримано функціональний простір ВПС, елементами (точками, векторами) якого є функції.

Наявність у функціональному просторі ВПС числа  $\|R_{Y.B}^0/q^{1/3} - x\|$ , яке має властивості звичайної відстані

$$\|R_{Y.B}^0/q^{1/3} - 0\| = \|R_{Y.B}^0/q^{1/3}\| \geq 0, \text{ м/Т}^{1/3}; \tag{10}$$

$$\|R_{Y.B}^0/q^{1/3}\| = 0 \rightarrow \varphi(x) = f(x) \equiv 0, \text{ м/Т}^{1/3}; \tag{11}$$

$$\|a R_{Y.B}^0/q^{1/3}\| = |a| \cdot \|R_{Y.B}^0/q^{1/3}\|, \text{ м/Т}^{1/3}; \tag{12}$$

$$\|R_{Y.B}^0/q^{1/3} + x\| \leq \|R_{Y.B}^0/q^{1/3}\| + \|x\|, \text{ м/Т}^{1/3}, \tag{13}$$

дає можливість звичайним методом визначити межі елементів зазначеного простору –  $\varepsilon$ -межею елементу  $(R_{Y.B}^0/q^{1/3})$  є множина елементів  $(R_{Y.B}^0/q^{1/3})$  цього простору, таких що

$$\|R_{Y.B}^0/q^{1/3} - R_{Y.B}^0/q^{1/3}\| < \varepsilon, \text{ м/Т}^{1/3}. \tag{14}$$

Якщо ВПС – функціональний простір із введеним на множині його елементів відстанню  $(R_{Y.B}^0/q^{1/3})$ , а також якщо задано правила  $\varphi$  та  $f$ , відповідно до яких кожному елементу  $(R_{Y.B}^0/q^{1/3})$  деякої підмножини  $(R_{Y.B}^0/q^{1/3}) \subseteq$  ВПС поставлене у відповідність число.

$$(\varphi + f) : R_{Y.B}^0/q^{1/3} \rightarrow X, \text{ м/Т}^{1/3}. \tag{15}$$

У випадку використання МПЕ параметр  $(R_{Y.B}^0/q^{1/3})$  (невідомої функції відгуку) представляємо поліномами:

– функціональної залежності  $\varphi$

$$\begin{aligned} R_{Y.B}^0/q^{1/3} = & \beta_0 + \beta_1 \Delta p_\varphi + \beta_{11} \Delta p_\varphi^2 + \beta_{12} \Delta p_\varphi \sigma + \beta_{14} \Delta p_\varphi u + \beta_{15} \Delta p_\varphi D_x + \\ & + \beta_{16} \Delta p_\varphi \Pi_n + \beta_2 \sigma + \beta_{22} \sigma^2 + \beta_{24} \sigma u + \beta_{25} \sigma D_x + \beta_{26} \sigma \Pi_n + \beta_4 u + \beta_{44} u^2 + \\ & + \beta_{45} u D_x + \beta_{46} u \Pi_n + \beta_5 D_x + \beta_{55} D_x^2 + \beta_{56} D_x \Pi_n + \beta_6 \Pi_n + \beta_{66} \Pi_n^2, \text{ м/Т}^{1/3}, \end{aligned} \tag{16}$$

де  $R_{Y.B}^0/q^{1/3}$  – параметр оптимізації, тобто вихідний параметр системи;

$\Delta p_\varphi, \sigma, u, D_x, \Pi_n$  – незалежні змінні цієї ж системи;

$\beta_0, \beta_1, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_2, \beta_{22} \dots$  – теоретичні коефіцієнти регресії;

– функціональної залежності  $f$

$$\begin{aligned} R_{Y.B}^0/q^{1/3} = & \beta_0 + \beta_7 I_\partial + \beta_{77} I_\partial^2 + \beta_{78} I_\partial P + \beta_{79} I_\partial I_\partial + \beta_{710} I_\partial N_e + \\ & + \beta_{711} I_\partial E(t) + \beta_8 P + \beta_{88} P^2 + \beta_{89} P I_\partial + \beta_{810} P N_e + \beta_{811} P E(t) + \beta_9 I_\partial + \beta_{99} I_\partial^2 + \\ & + \beta_{910} I_\partial N_e + \beta_{911} I_\partial E(t) + \beta_{10} N_e + \beta_{1010} N_e^2 + \beta_{1011} N_e E(t) + \beta_{11} E(t) + \beta_{1111} E(t)^2, \text{ м/Т}^{1/3}, \end{aligned} \tag{17}$$

де  $R_{Y.B}^0/q^{1/3}$  – параметр оптимізації, тобто вихідний параметр системи;

$I_\partial, P, I_\partial, N_e, E(t)$  – незалежні змінні цієї ж системи;

$\beta_0, \beta_7, \beta_{77}, \beta_{78}, \beta_8, \beta_{88} \dots$  – теоретичні коефіцієнти регресії.

Будемо стверджувати, що задано функціонал, область визначення якого є множина  $(R_{Y.B}^0/q^{1/3}) \subseteq$  ВПС.

Функціонал  $(R_{Y.B}^0/q^{1/3})$  називається лінійним, якщо він визначений на всій множині ВПС, неперервний у кожній точці, а також має ознаку адитивності, тобто для довільних чинників  $x$  виконується рівність

$$\begin{aligned} R_{Y.B}^0/q^{1/3} = & L(x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11}) = \\ = & \varphi(x_1, x_2, x_4, x_5, x_6) + f(x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}), \text{ м/Т}^{1/3}. \end{aligned} \tag{18}$$

Якщо  $\Omega$  – обмежена область ВПС в  $R^n$  з кусочно-гладкою межею  $\partial\Omega$ . Координати об'єктів в  $R^n$  будемо позначати літерою  $x$ , розуміючи під цим символом вектор-стовпчик із компонентами  $x_i, i = 1, 2, \dots, 11$ . Для градієнта функції  $\varphi(x)$  або  $f(x)$  – вектор-стовпчика її частинних похідних  $\partial\varphi(x)/\partial x_i, \varphi_{xi}$  – приймається позначення  $grad \varphi(x)$ .

Для будь-яких гладких  $\varphi(x)$  або  $f(x)$ , які обертаються в нуль на межі області, маємо те, що в точці екстремуму ( $R_{y.B}^0/q^{1/3}$ ) виконується співвідношення, яке називається рівнянням Ейлера-Остроградського:

$$L_{\varphi,f}(x, j, f \text{ grad}_{\varphi,f}) - \sum_{i=1}^n \partial L_{\varphi,f} / \partial x_i = 0, \text{ м/Т}^{1/3}. \quad (19)$$

Крайова задача для цього рівняння з межевою умовою

$$\varphi(x)|_{x \in \partial\Omega} = f(x)|_{x \in \partial\Omega} = \psi(\omega), \text{ м/Т}^{1/3} \quad (20)$$

є необхідною умовою екстремуму в цій задачі [4].

При постановці найпростіших завдань або на першій стадії дослідження отримуємо рівняння регресії першого ступеня або неповні квадратичні рівняння (*регресія* – форма зв'язку між випадковими величинами). Розв'язання більшості оптимізаційних задач пов'язане, звичайно, із використанням поліномів другого порядку. Поліноміальні залежності третього порядку на практиці вирішення будівельно-технологічних задач практично не застосовуються.

У результаті експериментів визначають коефіцієнти регресії  $b_0, b_1, b_{11}, b_{12}, b_2, b_{22} \dots$  які є оцінками теоретичних коефіцієнтів. Після цього рівняння (16), (17) набувають вигляду:

– функціональної залежності  $\varphi$

$$\begin{aligned} R_{y.B}^0/q^{1/3} = & b_0 + b_1 \Delta p_\phi + b_{11} \Delta p_\phi^2 + b_{12} \Delta p_\phi \sigma + b_{14} \Delta p_\phi u + b_{15} \Delta p_\phi D_x + \\ & + b_{16} \Delta p_\phi \Pi_n + b_2 \sigma + b_{22} \sigma^2 + b_{24} \sigma u + b_{25} \sigma D_x + b_{26} \sigma \Pi_n + b_4 u + b_{44} u^2 + \\ & + b_{45} u D_x + b_{46} u \Pi_n + b_5 D_x + b_{55} D_x^2 + b_{56} D_x \Pi_n + b_6 \Pi_n + b_{66} \Pi_n^2, \text{ м/Т}^{1/3}, \end{aligned} \quad (21)$$

де  $R_{y.B}^0/q^{1/3}$  – розрахункове значення параметра оптимізації;

$\Delta p_\phi, \sigma, u, D_x, \Pi_n$  – незалежні змінні системи;

$b_0, b_1, b_{11}, b_{12}, b_2, b_{22} \dots$  – розрахункові коефіцієнти регресії;

– функціональної залежності  $f$

$$\begin{aligned} R_{y.B}^0/q^{1/3} = & b_0 + b_7 I_\delta + b_{77} I_\delta^2 + b_{78} I_\delta P + b_{79} I_\delta I_\delta + b_{710} I_\delta N_e + \\ & + b_{711} I_\delta E(t) + b_8 P + b_{88} P^2 + b_{89} P I_\delta + b_{810} P N_e + b_{811} P E(t) + b_9 I_\delta + b_{99} I_\delta^2 + \\ & + b_{910} I_\delta N_e + b_{911} I_\delta E(t) + b_{10} N_e + b_{1010} N_e^2 + b_{1011} N_e E(t) + b_{11} E(t) + b_{1111} E(t)^2, \text{ м/Т}^{1/3}, \end{aligned} \quad (22)$$

де  $R_{y.B}^0/q^{1/3}$  – розрахункове значення параметра оптимізації;

$I_\delta, P, I_\delta, N_e, E(t)$  – незалежні змінні системи;

$b_0, b_7, b_{77}, b_{78}, b_8, b_{88} \dots$  – розрахункові коефіцієнти регресії.

Дослідні розрахунки виконували за основними критеріями оптимізації вихідного параметра ( $R_{y.B}^0/q^{1/3}$ ) підсистеми АЕЗ ЦЗ у системі МЕМ, визначеними експериментальним шляхом залежно від потужності та висоти вибуху, розміру й стійкості об'єкта до дії уражальних чинників, його розташування на місцевості відповідно до плану ПФЕ 2<sup>4</sup>. У кожній точці плану розрахунок незалежних змінних у системі МЕМ по кожному  $i$ -му виду уражального чинника, виконували оперуючи емпіричними даними [3].

З урахуванням значимості коефіцієнтів математична модель ВПС в системі МЕМ (у кодованому виразі змінних) буде мати вигляд:

$$R_{y.B}^0/q^{1/3} = 15,95 + 5,5(1/x_1) + x_7 + \ln x_{10} - x_7 \ln x_{10} - (1/x_8) \ln x_{10}, \text{ м/Т}^{1/3}. \quad (23)$$

На другому етапі перевіряється гіпотеза про адекватність (відповідність експериментальним даним) поліноміальної моделі з усіма значимими коефіцієнтами регресії. При цьому використовується мінімізуюча сума квадратів, що називається в регресивному аналізі залишковою. Для перевірки адекватності формулюється нуль-гіпотеза, і якщо вона за критерієм Фішера ( $F$ ) буде визнана правдоподібною, то модель описує процес адекватно експерименту. З інженерного погляду це означає, що модель передбачає результати ( $R_{y.B}^0/q^{1/3}$ ) в серед-



ньому з похибкою, більшою в  $\sqrt{F}$  разів, ніж експериментальна. Оскільки  $F_p < F_m$ , тому отримане рівняння регресії є адекватним і його можна використовувати для побудови номограм.

На основі отриманих даних будується номограма, за якою можна розрахувати значення  $(R^{A_{y,B}}/q^{1/3})$  при визначених значеннях  $x_1, x_7, x_8, x_{10}$  і варійованих чинників.

У прямокутній декартовій системі координат  $Oxyz$ , за допомогою комп'ютерних програм, поверхня відгуку двофакторної квадратичної (повної) моделі ВПС в системі МЕМ, залежно від значення коефіцієнтів  $b_i, b_{ii}, b_{ij}$ , схематично зображається у вигляді гіперболічного параболоїду.

Результати експертного оцінювання працездатності системи МЕМ, проведеного при аналізованій довірчій імовірності виходу з ладу її об'єктів – 95 % (показник  $\alpha$ -імовірності відмови – 0,05) і кількості степенів свободи, визначених умовами експерименту, свідчать про неможливість забезпечення експлуатаційної надійності будівельних конструкцій системи в цілому в межах зони, радіус якої удвічі перевищує нормативне значення віддаленості меж зон можливих руйнувань від меж проектної забудови категоризованих міст [5].

Метод розрахунку конструкцій за допустимим станом може стати продовженням методу МПЕ. При розрахунках зазначеним методом чітко встановлюється допустимий стан конструкцій та використовується система розрахункових коефіцієнтів, уведення яких гарантує, що такий стан не відбудеться за найбільш несприятливої взаємодії навантажень і при найменших значеннях міцнісних характеристик матеріалів. Міцність перерізів визначають за стадією руйнування, проте безпечність роботи конструкції під навантаженням оцінюють не одним синтезованим коефіцієнтом запасу, а зазначеною системою розрахункових коефіцієнтів. Конструкції, запроєктовані та розраховані за методом допустимого стану, отримуються більш економічними [6].

**Висновки і пропозиції.** Проведення експериментів щодо вивчення впливу певних чинників на стан об'єктів за допомогою математичних методів планування дозволило отримати результат у вигляді рівняння (математичної моделі), яка з певною статистично обґрунтованою ймовірністю адекватно описує реальний процес. Довідково-інформаційна база даних результатів експериментів, проведених за допомогою математичних методів планування, у перспективі може бути використана при розробленні автоматизованих систем виконання інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту. При неавтоматизованому методі розрахунку – можуть бути використані номограми.

Окремі уваги потребує питання розроблення та впровадження нормативного регулювання системи сертифікації фахівців з питань аналітично-експертного забезпечення цивільного захисту у сфері містобудування.

#### Список використаних джерел

1. Дворкін Л. Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту : навчальний посібник / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін, В. В. Житковський. – Рівне : НУВГП, 2011. – 174 с.
2. Эйнштейн А. Собрание научных трудов / А. Эйнштейн. – М. : Наука, 1965. – Т. 4. – 599 с.
3. Боевые свойства ядерного оружия. – М. : Воениздат, 1967. – 624 с.
4. Вся высшая математика : учебник / М. Л. Краснов, А. И. Киселёв, Г. И. Макаренко, Е. В. Шикин, В. И. Заляпин, С. К. Соболев. – М. : Эдиториал УРСС, 2003. – Том 6. – 256 с.
5. Інженерно-технічні заходи цивільного захисту (цивільної оборони). Система надійності та безпеки в будівництві: ДБН В.1.2-4-2006. – К. : Мінбуд України, 2006. – 34 с.
6. Байков В. Н. Железобетонные конструкции. Общий курс : учебник для вузов / В. Н. Байков, Е. С. Сигалов. – М. : Стройиздат, 1991. – 767 с.: ил.
7. Собуцький В. О. Експлуатаційна надійність міських будівель і споруд: основи теорії і практика : монографія / В. О. Собуцький, О. В. Собуцький. – Рівне : НУВГП, 2013. – 225 с.