

Тимур Ленурович Куртсеїтов (доктор технічних наук, професор)

Рустам Камілович Мурашов (кандидат технічних наук)

Ярослав Вячеславович Мельник

Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

ІМОВІРНІСНИЙ МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ ПОДІЙ НА ПОТЕНЦІЙНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Сучасні виклики техногенної безпеки вимагають новітні способи попередження та забезпечення її сталого та безперебійного функціонування. Існуючі класичні методи вже не спроможні в цілому забезпечити своєчасний та якісний прогноз щодо виникнення надзвичайних подій на потенційно-небезпечних об'єктах критичної інфраструктури. Тому виникає наукове завдання щодо здійснення аналізу існуючих методів прогнозування надзвичайних подій та відповідно розроблення нових (або удосконалення існуючих), які будуть спроможні вирішувати зазначені задачі. Потенційно-небезпечні об'єкти критичної інфраструктури складають фундамент сучасного техногенного суспільства і у разі виникнення надзвичайних ситуацій, суспільство опиниться у край важкому та критичному стані.

У статті авторами розглянуто імовірнісний метод прогнозування надзвичайних подій на потенційно-небезпечних об'єктах критичної інфраструктури. Було застосовано методи прогнозування стану складних систем з відповідними висновками щодо переваг та недоліків стосовно їх застосування. Вказано особливості застосування даних методів. Розглянуто декілька типів надзвичайних ситуацій та побудовано модель розвитку надзвичайних ситуацій при здійсненні події на потенційно-небезпечних об'єктах критичної інфраструктури. Результати статті дозволяють будувати імовірнісні моделі надзвичайних ситуацій, здійснювати аналіз обстановки та попередньо оцінювати ризики критичних ситуацій.

Ключові слова: надзвичайна подія, потенційно-небезпечні об'єкти критичної інфраструктури, прогнозування катастроф, імовірнісний метод.

Вступ

Потенційно-небезпечні об'єкти критичної інфраструктури (ПНО КІ) в сучасному глобалізованому і техногенному світі є найважливішою складовою його функціонування, у той же час внаслідок їх складних технологічно-хімічних складових та властивостей накопичувати потенційну енергію (яка може внаслідок катастрофи неконтрольовано звільнитись) є об'єктами підвищеної безпеки. Людство повинно не тільки правильно експлуатувати їх, а також мати науковий апарат щодо попередження (прогнозування) виникнення даних подій [1].

Постановка проблеми. Сучасний техногенно-глобалізований світ дуже чутливо реагує на будь-які зміни у його стані, а поява надзвичайної події у функціонуванні потенційно-небезпечних об'єктів критичної інфраструктури може мати безповоротні катастрофічні наслідки. Крім підвищення надійності, важливою науковою проблемою забезпечення безпеки та самого існування техногенного суспільства є прогнозування надзвичайних подій, які можуть призвести до катастроф. Саме попередження та запобігання зможуть зменшити (а можливо і уникнути) наслідки катастроф. Крім безпосередньо фізичного

впливу, катастрофи потенційно-небезпечних об'єктів критичної інфраструктури мають деструктивний вплив на соціоекономічну сферу життєдіяльності.

Мета статті – розгляд методу прогнозування надзвичайних подій на ПНО КІ на основі теорії математичної статистики. Даний метод дозволить здійснювати прогнозування стану ПНО КІ для своєчасного прийняття рішень та здійснення запобіжних заходів щодо збереження життя і здоров'я військовослужбовців і цивільного населення.

Виклад основного матеріалу дослідження

Надзвичайна подія (НП) - це сукупність подій і небезпек, що раптово порушують умови життєдіяльності, що склалися, створюють загрозу життю і здоров'ю людей, середовищу їх проживання, елементам техносфери. Техногенна надзвичайна подія (техногенна НП) - стан, при якому внаслідок виникнення джерела техногенної надзвичайної ситуації на об'єкті, певній території чи акваторії порушуються нормальні умови життя та діяльності людей, виникає загроза їх життю та здоров'ю, завдається збитків майну населення,

народному господарству та навколишньому природного середовища.

Кожну надзвичайну подію можна розглядати як великомасштабну небезпечну ситуацію, що створює загрозу одночасно великому числу людей і об'єктам техносфери. Стадії зародження та розвитку надзвичайної ситуації протікають, як правило, потай і пов'язані з накопиченням руйнівного потенціалу. На кульмінаційній стадії утворюється безліч небезпечних і шкідливих факторів, що об'єднуються в один або кілька факторів, що уражають.

Оцінка небезпеки різних виробничих об'єктів полягає у визначенні виникнення можливих надзвичайних ситуацій, руйнівних впливів пожеж та вибухів на ці об'єкти, а також впливу небезпечних факторів пожеж та вибухів на людей. Оцінка цих небезпечних впливів на стадії проектування об'єктів здійснюється на основі нормативних вимог, розроблених з урахуванням найбільш небезпечних умов перебігу надзвичайних ситуацій та прояву їх негативних факторів, витоків та притоків небезпечних хімічних речовин, пожеж та вибухів, тобто з огляду на аварійну ситуацію.



Рис.1. Схема каскадного розвитку катастроф при виникненні надзвичайних ситуацій на потенційно-небезпечних об'єктах критичної інфраструктури.

Як природні, і техногенні загрози носять потенційний, тобто прихований характер. Кількісною мірою небезпеки є ризик, тобто частота реалізації небезпеки. Ризик виражає можливу небезпеку, імовірнісну величину небажаної події.

Оцінка ризику включає аналіз частоти, аналіз наслідків та їх поєднання. У разі коли наслідки невідомі, то під ризиком розуміють імовірність настання певного поєднання небажаних подій. Техногенний ризик включає як можливість надзвичайної ситуації, так і величину її наслідків, що оцінюються величиною збитків (рис.1).

При аналізі повторюваності надзвичайних подій (НП) особливий інтерес становлять масштабні,

тобто ті що супроводжуються значними наслідками ситуації (катастрофи). Відсутність катастроф навіть протягом досить тривалого часу не виключає їх появи в майбутньому. Значні наслідки катастроф роблять їхнє математичне очікування за заданий проміжок часу $M[W_j] = a_j W_j$, значущим фактором,

що вимагає якомога точнішого обліку при плануванні економічного розвитку та проведенні регіональної політики. У світі число катастроф із високим економічним збитком (щонайменше % від валового річного продукту країни) зростає більш ніж 2 рази (рис.2).

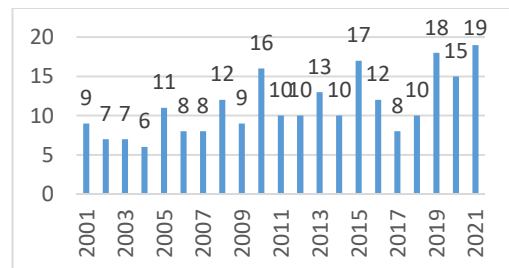


Рис.2. Статистика техногенних катастроф у світі у 2001-2021 роках

Крім суто економічних, важливими є також політичні, соціальні та психологічні наслідки таких катастроф.

Проте катастрофи перебувають на «хвості» розподілу НП за розміром збитків. Їх частота мала, т. е. є рідкісними подіями (відбуваються щороку). Їх характерні значні флуктуації оцінок імовірності реалізації і, отже, значна статистична невизначеність прогнозу. Відносні похибки оцінок імовірностей подій, що відбуваються на «хвостах» розподілів, можуть становити сотні відсотків.

Статистичним методом [2,3] для частоти рідкісних НП можна визначити лише довірчий інтервал.

Нехай, наприклад, є N потенційно небезпечних об'єктів. Вважаючи, що випадкову величину числа НП при фіксованій тривалості спостережень розподілено за законом Пуассона, час до першої НП (між НП) буде розподілено за експоненційним законом. За відсутності НП вирази для довірчих меж їх частоти для планів спостережень $[N, R, T]$, $[N, M, T]$ мають вигляд:

$$\lambda_{0*} = 0, \lambda_0^* = \frac{r_0}{T}, \quad (1)$$

де T – сумарна тривалість спостереження за всіма об'єктами виду що розглядається, об'єкти-роки. Коефіцієнт r_0 визначається з таблиць математичної статистики та для односторонньої довірчої ймовірності $\gamma = 0,9$ дорівнює 2,30.

Нехай є $N = 10$ потенційно небезпечних об'єктів - джерел можливих НП, що експлуатуються протягом $\Delta t = 10$ років, причому за весь час експлуатації не було жодної НП. Тоді $T = N\Delta t = 10^2$ об'єктів-років і по (1) отримаємо $\lambda_0^* = 2,3 \cdot 10^{-2}$ об'єктів-років у -1 ступені. Це означає, що усереднена за весь період

спостережень по всіх об'єктах частота НП з довірчою ймовірністю $\gamma = 0,9$ в інтервалі $(0, 2,3 \cdot 10^{-2}, \text{об'єктів-років у } -1 \text{ ступені})$.

Розрахунок показує, що при частоті НП 10^{-1} 1/років її оцінку за даними спостережень за 10 років можна зробити з нижньої і верхньої відносними похибками в 90 і 284 % відповідно, а й за 100 років — 38 і 54 %. Для досить точної оцінки частоти рідкісних НП із катастрофічними наслідками потрібні дані спостережень за сотні років.

Природно, що внаслідок технічного прогресу та порівняно швидкої зміни умов життєдіяльності людей такого інтервалу спостережень зазвичай не буває. З розвитком техносфери не тільки освоюються нові території, а й змінюються умови переростання небезпечних природних явищ у стихійні лиха, зникають одні та з'являються інші види збитків та події, що ініціюють для них. Так, з появою швидкісних магістралей туман став небезпечним природним явищем, що сприяє аваріям на автошляхах. Авіації трохи більше 100 років, атомній енергетиці 50, при цьому вони безперервно еволюціонують, причому не лише кількісно, а й у якісному відношенні.

Для отримання точкової оцінки частот рідкісних природних та природно-техногенних НП з тяжкими наслідками на певній території, за якими статистика практично відсутня (таких, наприклад, як стихійні лиха з катастрофічними наслідками, техногенні катастрофи типу катастроф у Чорнобилі), що відбуваються у в середньому раз на кілька років і навіть десятків років, може бути використаний теоретико-імовірнісний метод. Метод застосуємо для оцінки повторюваності ініційованих небезпечними природними явищами стихійних лих, аварій і катастроф на об'єктах техносфери [4]. Він заснований на використанні математичних моделей, що використовують закономірності переростання подій, що ініціюють у НП, і встановленні структури ризиків не тільки за видами ініціюючих природних процесів і явищ, але і за факторами, що впливають на його величину, тобто на декомпозиції завдання, оцінці приватних показників ризику та визначення частоти НП за приватними показниками.

Метод застосуємо для оцінки повторюваності ініційованих небезпечними природними явищами стихійних лих, аварій і катастроф на об'єктах техносфери. Він заснований на використанні математичних моделей, що використовують закономірності переростання подій, що ініціюють у НП, і встановленні структури ризиків не тільки за видами ініціюючих природних процесів і явищ, але і за факторами, що впливають на його величину, тобто на декомпозиції завдання, оцінці приватних показників ризику та визначення частоти НП за приватними показниками.

Вихідні дані для цих моделей отримують з аналізу джерел потенційної небезпеки на території, що розглядається, частот реалізації ініціюючих

подій, передбачуваних сценаріїв розвитку та наслідків. Наявність моделей дозволяє дати теоретико-статистичну оцінку повторюваності НП різного виду за статистикою подій, що ініціюють. Цей спосіб досить трудомісткий і має низьку точність, проте за відсутності інших оцінок його використання є виправданим.

Усі події крім першого (ініціюючого) є умовними та наступають за умови реалізації попередніх подій. Деякі з подій є стохастично-залежними. Такі випадкові величини, як сила небезпечного явища, площа зони дії його факторів, що вражають, і розмір збитків позитивно картельовані. Це призводить до залежності між відповідними показниками, зокрема, $(\alpha_n, q \text{ і } q_{НП})$ за загальним режимом. У припущенні незалежності розглянутих випадкових величин і відповідних їм подіях отримаємо для території, що розглядається, верхні (консервативні) оцінки частоти природних та природно-техногенних НП j -го класу за ступенем тяжкості:

$$\lambda_{НПj} = \lambda_{НЯ} \alpha_n q q_{НПj}, \lambda_{НПj} = \lambda_{НЯ} \alpha_n q q_{ав} q_{НПj}. \quad (2)$$

Без обмеження спільності розглядатимемо надалі лише природні НП.

Якщо є прогноз часу настання небезпечного явища у вигляді його ймовірності за інтервал часу Δt , то ймовірність НП на території за цей інтервал часу визначається за формулою:

$$q_{НПj}(\Delta t) = q_{НЯ}(\Delta t) \alpha_n q q_{НПj}.$$

Об'єкти інфраструктури можуть піддатися впливу природних явищ кількох видів, зазвичай, не одночасно. Отже, результати їх впливу можна вважати незалежними та оцінювати частоту НП j -го класу за формулою:

$$\lambda_{НПj} = \sum_{i=1}^n \lambda_{НЯi} \alpha_{ni} q_i q_{НПj}, \quad (3)$$

$$\text{де } q_{НПj} = P(w_{НПj-1} < W_i \leq w_{НПj}).$$

Точність визначення частоти природних НП (2) залежить від точності оцінок часткових показників. Вважаючи середні квадратичні відхилення про σ_{Φ_k} або відносні похибки δ_{Φ_k} малими (Φ_k - розглянуті вище фактори ризику), розкладаючи залежність

$$\lambda_{НП} = f(\Phi_1, \dots, \Phi_k, \dots, \Phi_l)$$

в ряд Тейлора і обмежуючись в силу небагатьох похибок лінійними членами, отримаємо співвідношення для обчислення середнього квадратичного відхилення НП. Для некорельованих складових:

$$\sigma_{НП} = \sqrt{\sum_{k=1}^l \left(\frac{\partial f}{\partial \Phi_k} \right)^2 \sigma_{\Phi_k}^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \lambda} \right)^2 \sigma_{\lambda}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \alpha} \right)^2 \sigma_{\alpha}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial q} \right)^2 \sigma_q^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial w} \right)^2 \sigma_w^2},$$

$$\text{де } \frac{\partial f}{\partial \lambda} = \alpha_n q q_{НПj}, \frac{\partial f}{\partial \alpha} = \lambda_{оЯ} q q_{НПj}, \frac{\partial f}{\partial q} = \lambda_{оЯ} \alpha_n q_{НПj}, \frac{\partial f}{\partial w} = \lambda_{оЯ} \alpha_n q$$

– коефіцієнти чутливості повторюваності НП до окремих факторів; $\sigma_{\lambda}, \sigma_{\alpha}, \sigma_q, \sigma_w$ — середні квадратичні відхилення оцінок окремих показників

($\delta_\lambda, \delta_\alpha, \delta_q, \delta_w$ — відповідні відносні похибки).

Для корельованих складових (при коефіцієнті кореляції між відповідними випадковими величинами, дорівнює 1):

$$\sigma_{\text{НП}} = \frac{\partial f}{\partial \lambda} \sigma_\lambda + \frac{\partial f}{\partial \alpha} \sigma_\alpha + \frac{\partial f}{\partial q} \sigma_q + \frac{\partial f}{\partial w} \sigma_w.$$

Так як має місце добуток окремих складових, то відносна похибка оцінки частоти НП визначається за формулою:

$$\delta_{\text{НП}} = \delta_\lambda + \delta_\alpha + \delta_q + \delta_w.$$

Підвищення точності оцінок повторюваності НП (2) пов'язане з підвищенням точності оцінок часткових показників за основними факторами, що

Література

1. **Мурасов Р.К., Чумаченко С.М.**, Методика оцінювання загроз для потенційно-небезпечних об'єктів критичної інфраструктури в зоні проведення ООС, НУОУ, м. Київ, Труды університету, №1(170) 2022, інв.49648, С.228-243.
2. **Фещур Р. В., Кічор В. П., Барвінський А. Ф., Тимошук М. Р.** Статистика: навч. посіб. М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка». — 4-те вид., оновл. і доповн. — Л.: Бух. центр «Ажур», 2010. — 256 с. : іл., табл. — Бібліогр.: с. 251—252 (20 назв). — ISBN 978-966-1688-05-5.
3. **Мурасов Р.К., Дзюбенко Ю.А.** Прогнозування стану

впливають на можливість їх наступу.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Таким чином, в даній статі було розглянуто імовірнісний метод прогнозування надзвичайних подій на потенційно-небезпечних об'єктах критичної інфраструктури.

Для сучасних техногенно насичених територій даний метод є актуальним для аналізу обстановки та попереднього оцінювання розвитку критичних ситуацій. Подальшим розвитком є розробка методики оптимальної оцінки загроз і ризиків для потенційно-небезпечних об'єктів критичної інфраструктури.

складних систем в сучасних системах управління та інтелектуальних інформаційних системах, “Управління розвитком складних систем”, №20, 2011 р., С.97-101.

4. **Мурасов Р.К., Чумаченко С.М., Мельник Я.В.** “Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони”, № 1(40), 2021 р., С.117-122, Теоретико-методологічні основи інформаційного аналізу еколого-техногенних загроз для потенційно-небезпечних об'єктів критичної інфраструктури в умовах збройного конфлікту на сході України.

A PROBABILISTIC METHOD OF FORECASTING EMERGENCY EVENTS AT POTENTIALLY DANGEROUS OBJECTS OF CRITICAL INFRASTRUCTURE

Tymur Kurtseitov (Doctor of Technical Sciences, Professor)

Rustam Murasov (Candidate of Technical Sciences)

Yaroslav Melnyk

National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskyi, Kyiv, Ukraine

Modern man-made safety challenges require the latest methods of prevention and ensuring its stable and uninterrupted functioning. Existing classical methods are no longer able to provide a timely and high-quality forecast regarding the occurrence of emergency events at potentially dangerous objects of critical infrastructure. Therefore, there is a scientific task of analyzing the existing methods of forecasting extraordinary events and, accordingly, developing new ones (or improving the existing ones) that will be able to solve the mentioned problems. Potentially dangerous objects of critical infrastructure form the foundation of modern man-made society, and in case of emergencies, society will find itself in an extremely difficult and critical state.

In the article, the authors consider a probabilistic method of forecasting emergency events at potentially dangerous objects of critical infrastructure. The methods of forecasting the state of complex systems were applied with the corresponding conclusions on the advantages and disadvantages of their application. Features of the application of these methods are indicated. Several types of emergency situations are considered and a model of the development of emergency situations in the event of an event on potentially dangerous objects of critical infrastructure is built. The results of the article make it possible to build probabilistic models of emergency situations, analyze the situation and pre-assess the risks of critical situations.

Keywords: *emergency event, potentially dangerous objects of critical infrastructure, disaster forecasting, probabilistic method.*

References

1. **Murasov R.K., Chumachenko S.M.**, Metodyka otsiniuvannya zahroz dlia potentsiino-nebezpechnykh ob'ektiv krytychnoi infrastruktury v zoni provedennia OOS, NUOU, m. Kyiv, Trudy universytetu, №1(170) 2022, inv.49648, S.228-243.
2. **Feshchur R. V., Kichor V. P., Barvinskyi A. F., Tymoshchuk M. R.** Statystyka: navch. posib. M-vo osvity i nauky Ukrainy, Nats. un-t «Lviv. politekhnika». — 4-te vyd., onovl. i dopovn. — L.: Bukh. tsentr «Azhur», 2010. — 256 s. : il., tabl. — Bibliohr.: s. 251—252 (20 nazv). — ISBN 978-966-1688-05-5.
3. **Murasov R.K., Dziubenko Yu.A.** Prohnozuvannya stanu

skladnykh system v suchasnykh systemakh upravlinnia ta intelektualnykh informatsiinykh systemakh, “Upravlinnia rozvytkom skladnykh system”, №20, 2011 r., S.97-101.

4. **Murasov R.K., Chumachenko S.M., Melnyk Ya.V.** “Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta obrony”, № 1(40), 2021 r., S.117-122, Teoretyko-metodolohichni osnovy informatsiinoho analizu ekoloho-tekhnohennykh zahroz dlia potentsiino-nebezpechnykh ob'ektiv krytychnoi infrastruktury v umovakh zbroinoho konfliktu na skhodi Ukrainy..