

---

УДК 621.175.3

**ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ВЕЙВЛЕТ ТА ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ  
ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКУ ВИРОБНИЧОГО ТРАВМАТИЗМУ**

**к.т.н., доц. О.В. Третьяков, С.В. Нестеренко**  
*Харківський національний університет міського  
господарства ім. О.М. Бекетова*

**Постановка проблеми.** Ризик стати жертвою нещасного випадку на виробництві або постраждалим від професійних захворювань в Україні у 5 – 8 разів вищий, аніж у розвинутих країнах.

За станом охорони праці Україна посідає 90-ге – 92-ге місце у світі.

Унаслідок цього втрати виробничого потенціалу щороку становлять 100 – 120 тис. осіб, з них 70 – 80 % – у віці 30 – 35 років.

При цьому реальна картина є ще гіршою, оскільки офіційна статистика охоплює лише близько 45 % працюючих. Більше того, статистика не враховує розтягнутих у часі причинно-наслідкових зв'язків шкідливих факторів із завданням шкоди здоров'ю працездатного населення: зумовлену виробництвом захворюваність, зниження імунітету, прискорення старіння, порушення репродуктивних функцій працюючих, тобто „сховати виробничі ризики”, рівень яких перевищує 70 % усіх ризиків настання випадків втрати здоров'я працівниками під впливом небезпечних виробничих факторів.

Метою досліджень є розробка методики прогнозування ризику виробничого травматизму за допомогою вейвлет і фрактального аналізу. В основу методики покладено застосування статистики травматизму як часового ряду, на основі якого можна прогнозувати спалахи нестабільності або неусталеності явищ травматизму. Саме цей метод дозволяє прогнозувати у режимі реального часу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вейвлет-перетворення застосовуються переважно для аналізу саме часових рядів. Він застосовується звичайно для аналізу складних даних та їх відображення у масштабно-часову площину, що дозволяє виявляти різні властивості складного сигналу, які не видно при звичайному уявленні в режимі реального часу [1]. А зміни кількості нещасних випадків має нестационарний, стохастичний характер.

Застосування методів фрактального аналізу і теорії інформації дозволяє знаходити глобальні взаємозв'язки між змінними, які входять у процеси, що відбуваються на території дослідження та, які впливають на кількість нещасних випадків. При цьому також по величині фрактальної розмірності послідовності, яка відображає кількість нещасних випадків у дослідженому інтервалі, можна судити про ступінь хаотичності самого процесу [2].

**Результати досліджень.** Модель прогнозування виробничого травматизму уявляє собою складне багатомірне дослідження, оскільки травматизм – це процес, який залежить від великої кількості факторів та попередніх посилань. В проведених дослідженнях припускається, що основною причиною травматизму є виробничі фактори, тому в роботі досліджувалась статистика виробничого травматизму без врахування статевих, вікових показників потерпілих, місяців, в яких реалізовувались нещасні випадки по галузям та психо-

фізіологічних факторів. В основу досліджень покладено використання в якості вихідних даних часового ряду. Часовий ряд – це сукупність параметрів, що спостерігаються, вивчаємої системи у часі. В якості часового ряду використувалася статистика нещасних випадків пов'язаних з виробництвом, яка була надана Харківською обласною виконавчою дирекцією Фонду соціального страхування України за 2005-2012 роки включно. В роботі розглянуті виробничі травми, що сталися на 265 підприємствах в 118 галузях господарства. Для реалізації запропонованої моделі розроблена методика прогнозування травматизму на основі вейвлет і фрактального аналізу, яка складається з п'яти послідовних етапів.

Формування ряду значень, які відображають зміни кількості нещасних випадків в інтервалі часу, що досліджується, з метою аналізу його у якості часового ряду.

Комплексна обробка часового ряду методом фрактального і вейвлет-аналізу. Розрахунок фрактальної розмірності в цих дослідженнях проводився по точковим методом. В основу цього методу покладено підрахунок відстані від окремо обраної точки до усіх точок множини, що досліджується. Він базується на алгоритмі розрахунку по точковій розмірності, який на цей момент є класичним та широко застосовується [3].

Сутність алгоритму. Розглянемо будь-яку множину випадків травматизму  $X_1, X_2, \dots, X_N$  за період, що досліджується, які розташовані в  $t$ -мірному просторі, представленою на рис. 1.

Якщо описати навколо будь-якого випадку сферу радіусом  $r$  і підрахуємо кількість випадків  $M(X_i, r)$ , які потрапили всередину сфери. Імовірність того, що вибіркового випадку опиниться всередині сфери, отримаємо розділив  $M(X_i, r)$ , на повну кількість випадків у множині, що досліджується:

$$P(X_i, r) = M(X_i, r) / N, \quad (1)$$

Як витікає з визначення фрактальної розмірності при малих  $r$ , імовірність  $P(X_i, r)$  повинна поводити себе як  $r^{-D_0}$ , де  $D_0$  – Хаусдорфова розмірність множини. В такому випадку

$$P(X_i) = \lim(\log P(X_i, r) / \log r). \quad (2)$$

Для деяких множин це визначення не залежить від вибору випадку  $X_i$ . Але для багатьох інших множин  $D_0$  залежить від  $X_i$ , і тому краще користуватися усередненою по точковою розмірністю. При розподіленні випадків можуть матися пробіли, внаслідок чого  $P(X_i, r)$  при  $r$ , які прямують до 0, перестає бути безперервною функцією від  $r$ . Для того, щоб отримати усереднену по точковою розмірність, обираємо випадковим чином множину випадків розміром  $L < N$  та у кожному випадку розраховуємо  $P(X_i, r)$ . Після того, як це зроблено, усереднина Хаусдорфова розмірність множини розраховується за формулою:

$$D_0 = 1/L \times (D_0(X_1) + D_0(X_2) + \dots + D_0(X_L)). \quad (3)$$

Число  $L$  підбирають дослідним шляхом, починаючи з будь-якого малого значення і поступово збільшують його до тих пір, поки  $D_0$  не досягне границі. В даному випадку формула буде мати наступний вигляд:

$$D_0(X_i) = \lim(\log P(X_i, p_{ij}) / (\log p_{ij})), \quad (4)$$

де  $p_{kj}$  – граничне значення радіусу.

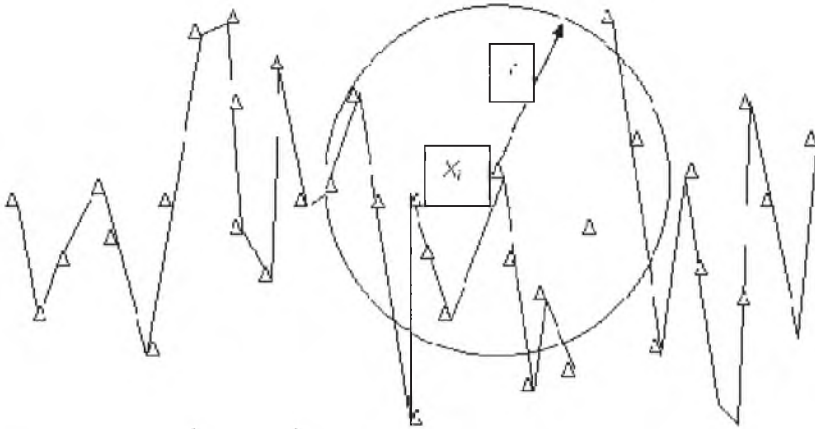


Рис. 1. Графік у двовірному просторі з вибірковими точками і окружністю, всередині якої проводиться підрахунок вибіркових точок.

Находження границі зводиться до пошуку найбільш лінійного участку залежності  $\log P(X_i, p_{kj})$  від  $\log p_{kj}$  та побудові лінійної апроксимації виду:

$$\log P(X_i, p_{kj}) = (b \times \log(p_{kj})) + c \quad (5)$$

методом найменших квадратів. В якості оцінки по точковій розмірності береться

$$D_0(X_i) = -b. \quad (6)$$

Далі необхідно прибрати з множини  $p_{kj}$  усі випадки, які вносять нелінійність у залежність  $\log P(X_i, p_{kj})$  від  $\log p_{kj}$  тоді випадки, які залишаються будуть розташовуватися на лінійній ділянці. Реалізувати цю процедуру можна шляхом ітераційного алгоритму. Для кожного члена множини  $p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kq}$  виконується тест – цей член тимчасово прибирають з множини і підраховують коефіцієнт кореляції  $S$  між  $\log P(X_i, p_{kj})$  і  $\log p_{kj}$  для членів, які залишилися, після чого його знов повертають до множини. Той член множини, при тестуванні якого спостерігається найбільша кореляція  $S$ , вносить найбільшу нелінійність, і його необхідно вибракувати з множини. Ітерації вибракуння продовжують до тих пір, поки кількість  $q$  членів множини  $p_{kj}$  не зменшиться до 3-5. Після цього можна бути впевненими, що  $q$  точок, які залишилися лежать на лінійній ділянці залежності  $\log P(X_i, p_{kj})$  від  $\log p_{kj}$ . Аналіз стабільності процесу за величиною фрактальної розмірності неможливо здійснити без дослідження структури самого часового ряду. Розмірність Хаусдорфа-Безиковича часового ряду дорівнює 1 згідно дослідженням [4], топологічна фрактальна розмірність завжди більше 1, з чого випливає, що часовий ряд появилення нещасних випадків самоподібний і фрактальний. Суттєвим моментом підходу, який розвивається, є наявність критичного значення фрактальної роз-

мірності часової кривої, при наближенні до якого система втрачає усталеність і переходить у нестабільний стан, параметри якого швидко зростають, або зменшуються у залежності від тенденції, яка має місце в цей час.

По іншому, фрактальна розмірність визначеної величини може використовуватися як індикатор кризи або прапор катастрофи. Аналіз експериментальних даних показує, що лінія тренду для часового ряду досить добре описується рівнянням:

$$y(t) = y(t_0) + (K_f(t_0) \times (t - t_0)) / ((D - D_0)^B), \quad (7)$$

де  $y(t)$  – середнє значення величини за період попередній тому, що прогнозується;

$K_f$  і  $B$  – коефіцієнти;

$t_0$  – період часу попередній тому, що прогнозується;

$t$  – час на який робиться прогноз;

$D_0$  – фрактальна розмірність на період попередній тому, що прогнозується;

Наступним етапом є обробка часового ряду методом вейвлет-аналізу.

Вейвлет-аналіз є дуже зручним для аналізу нестационарних процесів, особливо таких що характеризуються чергуванням. Він дозволяє виявити просторово-часові властивості об'єкту, що вивчається, визначити наявність чергування, отримати локальну високочастотну і глобальну великомасштабну інформацію про об'єкт достатньо точно і без зайвості. Вейвлет-перетворення – ефективний математичний інструмент мальтимасштабного аналізу структури нестационарних сигналів. Безперервний вейвлет-аналіз, який складається з розкладення сигналів по функціям, добре локалізованим як у просторі, так і частотній області, має велику, у порівнянні з фур'є-аналізом, можливість у виявленні структурних особливостей сигналів. Для реалізації аналізу моделі та обробки статистичних даних розроблено програмне забезпечення, яке написано у Borland Delphi. Ця програма дозволяє будувати скалограми за обраними параметрами за статтю, віком, дням тижня, галузям за заданий період часу.

1. Третім етапом цієї методики є інтерпретація отриманих результатів, тобто перетворення, в яких виділяються ті властивості, які цікавлять дослідників і дають додаткову інформацію, що недоступна у вихідному вигляді. Фракталом є множина, розмірність Хаусдорфа-Базиковича для якого строго більше його топологічної розмірності. Будь-яка множина з нецілим значення  $D$  є фрак талом. Але фрак тал може мати і цілі значення, така крива уявляє фрак тал з розмірністю 1, а траєкторія броуновського руху уявляє фрак тал розмірністю 2 [5].

Тому побудова фрактальних розмірностей за факторами показує сценарії розвитку ситуації і дозволяє судити про схильність процесу до усталеного або хаотичного стану. Фрактальна розмірність є показником складності кривої. Аналізуючи чергування ділянок з різною фрактальною розмірністю і тим, як на систему діють зовнішні та внутрішні фактори, можна навчитися передбачати поведінку системи [6]. І саме головне, діагностувати та передбачати несталі стани. Таким чином, у якості критерію усталеності досліджуваного процесу приймаємо отриману величину фрактальної розмірності, а по ступені

---

хаотичності процесу отриманого фрак тала багатofакторність і «насиченість» перед посилянє, які викликають нещасні випадки [7].

Вейвлет-перетворення забезпечують двомірне дослідження сигналу, який представлено, в окремій області у площині «частота-положення», та його можна охарактеризувати як спектральний аналіз локальних обурень. Вейвлет-перетворення є дуже зручним інструментом для адекватного розшифрування даних, оскільки елементи базису добре локалізовані і володіють потрібним частотно-часовим вікном. Будь-який сигнал можна охарактеризувати деякими узагальненими величинами – енергією, потужністю. Будь-який параметр сигналу може нести корисну інформацію про явище, що досліджується. Таким чином, задачею обробки є вибір цих параметрів та оцінювання цих величин, з яких потім вилучається інформація про процеси, які досліджуються. Теорія вейвлетів дає гнучку техніку обробки сигналів. Одна з основних переваг є в тому, що він дозволяє помітити добре локалізовані зміни сигналу. Тому метод иффрактального і вейвлет-аналізу необхідні не тільки для швидкого реагування на зміни величини кількості нещасних випадків, а і виявлення найбільш небезпечних моментів для своєчасного їх попередження.

2. Четвертим етапом методики, що реалізується, є видалення факторів, найменш усталених, які прямують до нестабільного стану, на основі яких можна видалити найбільш ризиконебезпечні групи, часовий період, людей, віковий контингент тощо, і відповідно побудувати прогнозні оцінки.

3. П'ятим етапом методики є розробка заходів і рекомендацій на основі отриманих результатів.

За результатами апробації методики і програмного забезпечення, яке реалізує аналіз моделі та обробку статистичних даних, проведено дослідження нещасних випадків на прикладі м. Харків за допомогою вейвлет і фрактально-го аналізу у залежності від різних факторів: за часовою характеристикою, місяцям, статі, віку, дням тижня. Дослідження вейвлет-спектру часового ряду за період 2005-2012 роки, дозволили зробити висновок про наявність в його структурі періодичності як за часовою, так і за масштабною віссю. Самі яскраві області вейвлет-спектру свідчать про наявність деякої обурюючої сили, яка викликає зміни ситуації з нещасними випадками. Яскрава область вейвлет-спектру (кінець 2005 року) свідчить про перехід із стабільного стану у хаотичний і здатне перейти у катастрофічне. Таким чином, яскрава область на початку 2009 року свідчить про перехід до стабільного стану, проаналізував реальні дані цього періоду, було виявлено, що у 2009 р. спостерігалася зменшення обсягу деяких виробництв на крупних підприємствах міста. При цьому кількість працюючих не змінилася, що свідчить про рівномірне менше навантаження на людей у процесі трудової діяльності, зниження втомленості, що могло викликати зниження кількості травм.

Вейвлет-аналіз часового ряду виробничого травматизму у жінок і чоловіків свідчить про те, що найбільша кількість ризиків травматизм приходить на чоловіків, так як вони зайняті на більш небезпечних виробництвах і перебільшують за кількістю на виробничих підприємствах. Фрактальна розмірність часового ряду нещасних випадків на виробництві у чоловіків становила 1,458, а у жінок 1,151. Також аналіз вейвлет-спектрів показав що факто-

---

ри, які впливають на рівень травматизму у чоловіків та жінок однакові, але їх реакція на ці обурення відрізняється. Ризик отримати виробничу травму практично дорівнює ризику вуличної травми (5,6%) й займає друге місце серед інших причин пошкодження. Так, на виробничий травматизму наражалися 25 чоловіків і 6 жінок з 10000 мешканців м. Харків. При цьому на першому місці стоїть побутова травма (40%) як у чоловіків, так і у жінок, тобто, виходячи з рівня ризику, на побутові травми наражаються 540 чоловіків і 380 жінок з 10000 мешканців. Таким чином, виходячи з величини фрак талу 1,458, приходимо до висновку, що як і на виробництві, так і у побуті чоловіки відносяться до більш ризиконебезпечної групи, яка найчастіше наражається на негативні наслідки. Причому аналіз структури характеру пошкоджень показав, що чоловіки частіше за все наражаються на такі травми, як відкриті рани, травми кровоносних судів, верхньові травми, переломи, а серед жінок переважно – переломи верхніх і нижніх кінцівок та поверхневі травми. Достовірність запропонованої методики підтверджується порівнянням двох величин побудованої прогнозової оцінки з визначеними мінімальними і максимальними границями у завданому відрізку часу і вже фактичними даними за реалізованими випадками травматизму за цей же період часу. Таким чином, в даному випадку фактичні дані потрапляють у визначений діапазон, що свідчить про можливість застосування запропонованого методу.

**Висновки.** Представлена методика прогнозування травматизму, в основі якої покладено вейвлет і фрактальний аналіз.

На основі вейвлет і фрактальний аналізу розроблена математична модель прогнозування травматизму, яка дозволяє контролювати і знижувати фактичний рівень нещасних випадків і вирішувати ті проблеми, які не під силу вже існуючим методам.

На основі розробленої методики проведено дослідження ризику виробничого травматизму за різними факторами і виявлені області накопичення ризику.

### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Астафьев Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. № 11, с. 1145-1171.
2. Бережная Е.В. Математические методы моделирования экономических систем: учебное пособие. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 368 с.
3. Дремин И.М. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. 2001. № 5, с. 465-501.
4. Муллер Н.В. Прогнозирование риска производственного травматизма методом вейвлет и фрактального анализа // Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия. 2009. № 2(68), с. 146-154.
5. Федер Е. Фркталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
6. Морозов А.Д. Введение в теорию фракталов. М.; Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2002. – 160 с.
7. Мандельброт Б. Фрктальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.