# МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ГРАНИЧНИХ ФУНКЦІОНАЛІВ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ ДО ПРОБЛЕМ ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ

**В. В. Рязанов**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

У посиланнях [1, 2] розглядаються різні граничні функціонали випадкових ризикових процесів: час першого проходження, екстремуми функцій, моменти повернення, надлишок перед руйнуванням, розподіл тривалості перебування процесу в нижній півплощині, час перебування процесу над рівнем u та ряд інших. Вони застосовуються до різних задач: дворівнева модель, броунівський рух та дифузія. Це загальні математичні функціонали. Тому їх застосування до будь-якої задачі практично необмежене. Ми розглядаємо потенційне застосування деяких із цих граничних функціоналів до питань безпеки атомних електростанцій.

У науковій літературі граничний функціонал часу першого проходження (FPT) широко застосовується до широкого кола фізичних, хімічних, біологічних, економічних та інших проблем. У ядерній безпеці функціонал FPT є одним з найпотужніших та математично найточніших засобів опису досягнення певного небезпечного порогу, наприклад, небезпечного рівня потужності. У роботах [3-5] показано, що для деяких типів реакторів (MSR (реактори на розплавлених солях), HTGR (високотемпературні газоохолоджувані реактори), реактори на пилоподібному паливі) або для запуску реактора, а також для аналізу аварій (руйнування активної зони) слід застосовувати опис методом спрямованої перколяції (DP). У системі, що описується спрямованою перколяцією, досягнення "небезпечного рівня" потужності $\Phi_{crit}$, FPT у моделі DP є задачею першого досягнення порогу розгалуженим процесом. Кількість нащадків кожного вузла (нейтрона) є випадковою величиною k із заданим розподілом ймовірностей P(k). Ймовірність P(k) підпорядковується стабільному степеневому закону

$$P(k) \sim k^{-a} \tag{1}$$

для «ефективної кількості нащадків» – загальної кількості нейтронів, що утворюються у всіх наступних поколіннях однією «батьківською» частинкою за певних фізичних умов. У звичайному ВВЕР розподіл не є степеневим. Тип степеневого закону (1) виникає за умов сильної кореляції та анізотропії, характерних для спрямованої перколяції. Це можливо у трьох випадках: а). Критична точка (критична опалесценція). Тільки в самій точці $k_{eff}=1$ (або в нескінченно малій околиці) розподіл довжин ланцюгів стає степеневим. б). Сильна просторова неоднорідність («скло Леві»). Якщо середовище складається з порожніх каналів і щільних паливних блоків (наприклад, зруйнована зона або конкретні експериментальні збірки). Нейтрон може пролетіти величезну відстань без зіткнень («політ Леві»). У такому середовищі «нащадки» народжуються не як компактна хмара, а як фрактальна структура. в). Мала кількість нейтронів (статистика малих зразків). В умовах запуску, коли активна зона містить лише кілька сотень нейтронів, усереднення неефективне. Дослідження (наприклад, у [3-5]) показують, що за цих умов динаміка більше схожа на спрямовану перколяцію, ніж на дифузію. У класичному гаусовому випадку розподіл порогового часу характеризується розподілом з вузьким піком навколо середнього значення. Ймовірність того, що реактор працює занадто швидко, експоненціально мала. Для моделі DP з a=2, через прольоти Леві та кластеризацію нейтронів, розподіл FPT набуває важкого хвоста в області короткого часу. Існує ненульова та значна ймовірність того, що система досягне небезпечної межі у багато разів швидше, ніж передбачає середнє значення. Це називається «ефектом раннього запалювання» або статистичним розбігом. Для функції розподілу виду (1) для кількості нащадків або довжин стрибків зі степеневим хвостом виду $k^{-a}$ ($a \approx 2$), характеристична функція $\Phi(t)=E(e^{itX})$ для степеневих хвостів має неаналітичну форму в нулі: $\ln\Phi(t) \sim -|t|^{\alpha}$. Ця структура $\ln\Phi(t)$ відповідає представленню Леві-Хінчина для стійких розподілів. При переході до неперервної границі (диференціального рівняння) на макроскопічному рівні цей член $|t|^{\alpha}$ перетворюється на дробову похідну відносно простору або часу.

Значення a=2 є «вододілом» для статистичних моментів. Якщо $a \le 2$, то математичне сподівання (середня кількість нащадків) $\langle k \rangle$ розходиться (прагне до нескінченності для нескінченного розміру системи). Якщо $2 < a \le 3$, то середнє значення скінченне, але другий момент $\langle k^2 \rangle$ розходиться. Якщо $a>3$, то і середнє значення, і дисперсія скінченні. Коли дисперсія скінченна ($a>3$), класична центральна гранична теорема застосовується до суми таких величин, і поведінка системи стає «стандартною» в багатьох відношеннях. Для $a>3$ (коли дисперсія скінченна) випадкове блукання через багато кроків описується звичайним рівнянням дифузії (нормальним розподілом координат). Для $a<3$ (включаючи випадок a=2) відбуваються прольоти Леві. Застосування функціоналів FPT до моделей спрямованої перколяції дозволяє оцінити ймовірність «миттєвих» локальних вигорань, оцінити достатність швидкості реагування систем захисту та врахувати стохастичний характер запуску, який ігнорується детермінованими кодами (такими як KORSAR або RELAP). Стаття [1] зміщує фокус з простих середніх значень на повну статистику граничних функціоналів стохастичних процесів, до яких належить FPT [1]. У цій статті розглядається FPT. Однак, у [1] також виводиться ряд інших граничних функціоналів, які не менш значущі для безпеки АЕС. Для процесів, що описуються стабільними законами Леві (індекс $\alpha$=a-1≈1), щільність ймовірності часу першого досягнення порогу L має асимптотику:

$$P(t_{FPT}) \sim t^{-(1+\alpha/z)}, \tag{2}$$

де z – динамічний критичний індекс спрямованої перколяції. Середній час до досягнення порогу <tFPT> може формально розходитися або мати величезну дисперсію. Отже, «середній час до відмови» не матиме значення для безпеки, оскільки фактичний розкид часу досягнення критичного рівня охоплює кілька порядків величини.

Як це можна застосувати до оцінки безпеки ВВЕР. Під час аналізу запуску або роботи реактора на мінімальному рівні керування (МРК) функціональність FPT використовується для вирішення трьох проблем: a). Коригування заданих значень аварійного захисту (ЕР). Задане значення періоду (швидкості зростання) має бути налаштоване таким чином, щоб «відсікати» швидкі піки з хвоста розподілу FPT, але не викликати хибних тривог через нормальний статистичний шум. b). Час простою обладнання. Якщо розподіл FPT має сильний хвіст в області малих часів, існує ризик того, що час розгону системи буде меншим за час реагування захисту (час опускання стрижня + логічний час системи управління інформацією (ІСУ). c). Імовірнісний аналіз безпеки (ІАБ). Замість одного сценарію аварії будується розподіл FPT. Безпека вважається забезпеченою, якщо інтеграл ймовірності $P(t_{FPT}<t_{action})$ незначний (де $t_{action}$ - час реагування системи).

Застосування інших функціоналів зі статті [1]. Окрім максимуму, у статті також розглядаються інші граничні функціонали, які ідеально підходять для фізики реакторів. Час окупації. Визначення: загальний час, протягом якого потік Φ(t) перебував вище безпечного порогу. Застосування: оцінка деградації оболонки паливних стрижнів. Один короткочасний «пік» (максимум) може не розплавити сталь, але серія сплесків перколяції («плямистість») може призвести до накопичення втоми або корозії. Переїзди. Значення: як часто процес «порушує» задане значення. Застосування: регулювання чутливості системи керування. Якщо швидкість переїздів аномально висока в режимі DP (a=2), це створює проблему «хибних тривог» та зносу приводів стрижнів. Застосування в аналізі безпеки. Використання граничних функціоналів [1] дозволяє переглянути концепцію «запасу до плавлення». Перевищення: оскільки модель DP поділяється на «стрибки» (кластери), у момент спрацьовування захисту потужність не просто торкається порогу, а «пробиває» його на значення ΔΦ. Для a=2 це значення може бути порівнянним з самим порогом. Проектування для «рекордів»: захист реактора слід розраховувати не для середніх коливань, а для екстремальних значень (теорія екстремальних значень). Граничні функціонали дозволяють точно розрахувати квантиль потужності, який не буде перевищено з ймовірністю, наприклад, 0,9999. Підсумок. Робота [1] забезпечує математичний місток між абстрактною спрямованою перколяцією та інженерними розрахунками налаштувань захисту. У той час як FPT визначає, як швидко відреагує система, максимальний функціонал визначає величину удару (теплового або нейтронного), який повинен витримати паливний елемент під час цього стохастичного спалаху. Ключовий висновок: при a=2 «рідкісні» події стають статистично значущими. Безпека ВВЕР на низькій потужності вимагає врахування статистики записів, а не лише середніх значень та відхилень.


1. V.V. Ryazanov. Application of boundary functionals of random processes in statistical physics. Physical Review E, 111(2) (2025) 024115. doi:10.1103/PhysRevE.111.024115.

2. V.V. Ryazanov. *Stochastic Processes of Risk Theory and Storage Theory in Physics and Biology* (Cambridge Scholars Publishing, 2026) 604 p.

3. B. Dechenaux, T. Delcambre, E. Dumonteil Percolation properties of the neutron population in nuclear reactors. Physical Review E, 106 (2022) 064126.

4. E. Dumonteil et al. Particle clustering in Monte Carlo criticality simulations. Annals of Nuclear Energy 63 (2014) 612.

5. E. Dumonteil, R. Bahran, T. Cutler et al. Patchy nuclear chain reactions. Communications Physics 151(4) (2021) 1. https://doi.org/10.1038/s42005-021-00654-9.