

УДК 621.03.58: 621.311.25

ОЦІНКА ВРАЗЛИВОСТІ АЕС ПРИ ВИПАДКОВОМУ ПАДІННІ ВІЙСЬКОВОГО ЛІТАКА

*С.І. Азаров, Г.А. Сорокін
(ІЯД НАН України, м. Київ)*

У теперішній час у Повітряних військах Збройних сил України нараховується 312 бойових повітряних суден, які можуть нанести пошкодження (руйнувати) об'єкти підвищеної небезпеки, наприклад АЕС (реакторна установка, або системи, що забезпечують її безпеку) при авіакатастрофі. У статті аналізуються проблеми безпеки АЕС при можливому падінні на неї військового літака.

ВСТУП

При аналізі безпеки АЕС розглядаються наступні вихідні події:

1. Внутрішні фактори: пожежа на майданчику; вибух на майданчику; падіння вантажу; відмова системи енерго- і теплопостачання; помилки персоналу.

2. Зовнішні фактори:

- зовнішні фактори природного походження: землетрус; повінь; екстремальні погодні події (смерч, блискавка і т.п.); підтоплення території (підйом рівня ґрунтових вод); зсуви різного генезису, обвали; розмиття берегів, схилів, русел; провали та осідання ґрунтів, у тому числі при підземному розмиві та карсті.
- зовнішні фактори техногенного походження: вибух за межами майданчику; пожежа за межами майданчику; прорив водосховища; викид запалювальних, вибухонебезпечних, токсичних, корозійних матеріалів; падіння ПС, його частин та інших предметів; осідання та струс ґрунту.

У ряді можливих зовнішніх техногенних впливів на АЕС значне місце займають події, які пов'язані з авіаційними катастрофами, при яких, за тих або інших обставин, ПС або його частина можуть впасти на головний корпус і зруйнувати ядерний реактор, або системи, важливі для забезпечення безпеки. У теперішній час визнано, що найбільш конструктивним підходом до оцінки адекватності мір по захисту АЕС від падіння ПС є імовірнісний аналіз.

Випадкове падіння військового повітряного судна (ВПС) на АЕС – надзвичайна подія, ймовірність якої визначається в основному рівнем забезпечення безпеки польотів, їх інтенсивністю в даному районі, а також розподілом авіаційних подій по типу і характерним для них наслідкам. Безпека польотів визначається частотою виникнення авіаційних подій на 1 год польоту і залежить, головним чином, від розвитку військової авіаційної техніки. Інтенсивність польотів в районі АЕС оцінюється з урахуванням адміністративно-організаційних заходів по їх обмеженню і є характеристикою району розташування об'єкту, як і розподіл авіаційних подій по типу.

Ціль даної статті – на основі даних про стан військової авіації в Україні, параметрів літаків і вертольотів, безпеки польотів та інших, оцінити імовірність попадання військового ПС на АЕС.

АНАЛІЗ СТАНУ ВІЙСЬКОВОЇ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

Повітряним судном військового призначення називається апарат, важчий за повітря, який рухається за допомогою силової установки. Характерними елементами ВПС є несучі поверхні (крила), які створюють підйомну силу; силові установки (двигуни), фюзеляж, вантажні відсіки та кабінку екіпажу, а також шасі. ВПС забезпечені системами ручного і автоматичного управління рухом, навігаційним обладнанням, системою кондиціонування повітря, обладнанням, яке захищає від заledenіння, протипожежним обладнанням, а також аварійно-рятувальними засобами.

Існуючий парк військової авіаційної техніки України складається в основному з ВПС виробництва СРСР, які морально і фізично застаріли. До теперішнього часу напрацювання великої кількості ВПС старих типів підходить до меж встановлених для них ресурсів. В результаті цього виникла проблема забезпечення заданого рівня безпеки і надійності тривало експлуатованих ВПС, тобто проблема підтримки льотної придатності старіючих ВПС.

Повітряні війська Збройних сил (ЗС) міністерства оборони України складають: бойові ВПС у кількості 208 штук (МІГ-29, Су-24МК, Су-24МР, Су-25, Су-27, Су-22МІ); транспортні ВПС – 37 штук (Ан-32, Ан-70, Ан-124, Ан-225, Ан-26, Ан-72); бойові вертольоти – 104 штуки (Мі-8, Мі-10, Мі-26Т, Мі-38, Ка-26, Ка-32А, Ка-126), які розташовані на 6 військових аеродромах (м. Луцьк, Дубно, Мукачево, Узин, Умань, Краматорськ).

В табл. 1 наведено експлуатаційно-технічні характеристики ВПС ЗС України.

Таблиця 1. Типи ПС та їх польотні характеристики [1]

Тип ПС	Параметри						
	Довжина, м	Висота, м	Розмах крила, м	Злітна маса, тон	Швидкість польоту, км/год	Дах, км	Дистанція польоту, км
1	2	3	4	5	6	7	8
Бойові ПС							
Су-24МК	24	6,0	17	39,7	1200	17,0	600
Су-24МР	24	6,0	16	39,7	1200	16,0	650
Су-25	15	5,0	14	19,5	1320	10,0	700
Су-22МІ	13,7	5,0	19	19,4	1300	15,0	700
МІГ-29	11,4	6	17,3	18,5	2500	17,0	1100

Таблиця 1 (продовження)

1	2	3	4	5	6	7	8
Транспортні ПС							
Ан-32Б, 32П	23,8	8,6	29,2	27,01	500	9,5	650
Ан-26	33,8	8,3	29,2	24,0	420	7,3	760
Ан-30	24,26	8,3	29,2	22,1	320	7,3	280
Ан-70	40,7	16,4	44,1	145	800	10,0	7460
Ан-72	23,07	8,25	31,81	33,5	720	11,8	1000
Ан-124 «Руслан»	69,1	21,1	73,6	405	800	11,1	4300
Ан-225 «Мрія»	84,0	18,1	83,4	600	850	11,0	14700
Вертольоти							
Мі-8	25,24	5,65	14,8*	15,1	225	4,5	480
Мі-26Т	40,03	8,05	15,2*	56	255	4,6	670
Мі-10	32,86	7,8	16,0*	43,45	180	4,5	420
Мі-38	19,95	5,56	16,0*	14,75	275	5,0	800
Ка-26	7,75	4,05	12,4*	4,3	130	3,0	465
Ка-32А	12,25	5,4	15,7*	12,6	230	4,5	570
Ка-126	7,75	4,15	13,2*	4,25	160	4,0	660
* – діаметр пропелера							

Аналіз використання світової військової авіації показує, що число катастроф по всьому парку ВПС має стійку тенденцію до зниження. За статистикою авіаційних катастроф в період з 1990 до 2000 рр. загальне число катастроф для ВПС типу F-16С, F-18Е, F-22 знизилось з 50-80 до 30 на рік, з 0,8 до 0,5 на 10^5 годин польотів, з 0,9 до 0,6 на 10^5 посадок, а для СУ та МІГ з 2,5 до 1,1 на 10^5 годин польотів (Росія).

За даний період інциденти пов'язані з діями екіпажів склали в середньому 14%. Інциденти, пов'язані з відмовами авіатехніки, складають в середньому 82%, від загального числа, а відмови двигунів складають 51%, від всіх відмов авіатехніки.

РОЗПОДІЛ ВІРОГІДНОСТІ ПАДІННЯ ВІЙСЬКОВОГО ПОВІТРЯНОГО СУДНА НА АЕС

З метою аналізу стану безпеки у військовій авіації ЗС України були розглянуті авіаційні події, що відбулися з ПС за період з 1999 по 2006 рр. Розглянуті події відбувались при виконанні як бойових чергувань, так і навчальних, рятувальних та інших польотах, як на внутрішніх так і на міжнародних лініях. По видах розглянемо наступні авіаційні події: інциденти (F0), серйозні інциденти (F1), аварії (F2) і катастрофи (F3).

Для використання ймовірностного підходу до обробки даних по авіаційним подіям введемо додаткові умови, котрі повинні задовільняти небезпеці події F [2]:

- порушення в роботі ВПС розташовуються в порядку рангу важкості наслідків, який припускається;
- розподілення ймовірності відмов по категоріям повинно мати, по можливості, один максимум;
- події зліва від максимуму стаються з зовнішніх причин або не пов'язані безпосередньо з важкістю наслідків;
- виникнення події з високим номером носить випадковий характер та описується спадаючою експоненціальною залежністю.

Останню умову можна обґрунтувати виходячи з загального положення, що авіаційні події з високим номером рівноможливі та рідкі, тобто потік подій стаціонарний, ординарний та не має наслідків.

Позначимо середній інтервал між подіями, які стались, через ξ та функцію розподілення ймовірностей випадкової величини χ через $P(\chi)$, таким чином, можна написати диференціальне рівняння 1-го порядку для $P(\chi)$ у вигляді [3]:

$$dP(\chi)/dx = [1-P(\chi)]/\xi, \tag{1}$$

Вирішуючи це рівняння, отримуємо розподіл ймовірності у вигляді:

$$dP(\chi) = 1-C_1 \exp(-\chi/\xi), \tag{2}$$

Постійну інтегрування C_1 визначають по значенню $P(\chi)$ в нульовій точці.

Диференціюючи $P(\chi)$ перейдемо до вирішення для щільності розподілення ймовірності аварійних подій у вигляді спадаючої експоненціальної функції:

$$y(\chi) = a \cdot \exp(-\chi/\xi), \tag{3}$$

Стала a та величина ξ визначаються з відносної частоти подій в точках F1 та F2. Результати розрахунків по формулі (?) після нормування представлені в табл. 2.

Таблиця 2. Розрахункові оцінки щільності ймовірності авіаційних подій з інтерполяцією на випадок дуже рідких відмов (F3)

Категорія події	F0	F1	F2	F3
Ймовірність події	0,632	$8,54 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-4}$	$4,68 \cdot 10^{-5}$
Центр розподілення	$\xi = 1,95$, дисперсія $\sigma^2 = 0,63$, $\sigma = 0,79$			

Як видно з табл. 2 ймовірність події F0 достатньо велика.

Для дослідження періодичності у виникненні тої чи іншої категорії відмов використовувався класичний спектральний аналіз часових рядів на основі перетворення Фур'є. Після звичайний процедур, які випереджають отримання спектральних оцінок (видалення середнього, детренд та ін.) для усереднення в табл. 3 чотирьохкоефіцієнтного часового ряду отримані оцінки періодичності виникнення авіаційних подій у вигляді спектральної щільності (див. рис. 1).

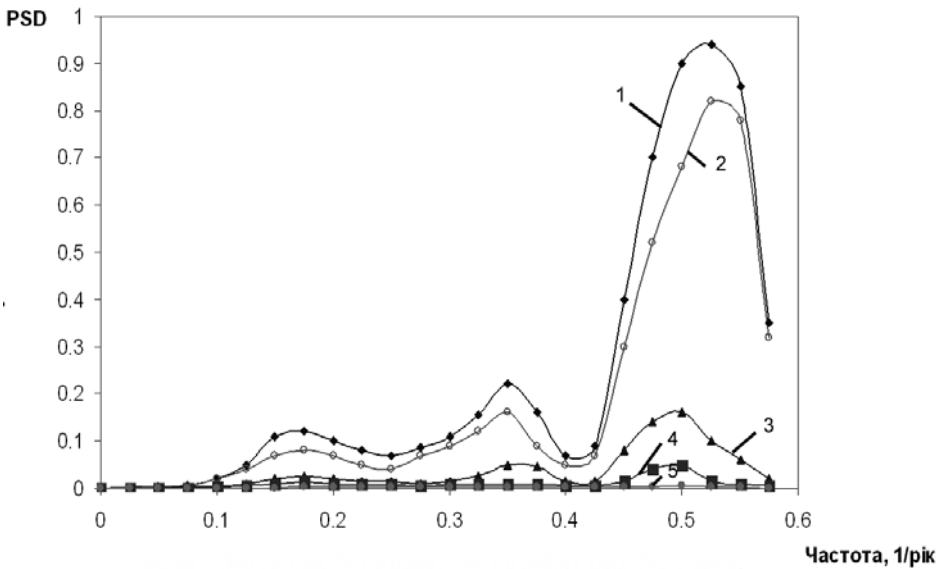


Рис. 1. Спектральна щільність коливань авіаційних подій:

- 1 – всі події ($f=0,55$; $T=1,9$ років);
- 2 – F0 ($f=0,41$; $T=2,5$ років);
- 3 – F1 ($f=0,123$; $T=8,15$ років);
- 4 – F2 ($f=0,091$; $T=10,06$ років);
- 5 – F3.

З рис. 1 видно, що складова частоти появи усіх авіаційних подій коливається з періодом 1,9 років, та практично обумовлена відмовами по категоріям F0, F1. Встановити причину такої періодичності авіаційних подій в даному випадку було неможливо. Необхідно відмітити, що статистичною оцінкою елементів часового ряду відмов було взято число відмов за рік, тому основний період відмов, який становить (1,9-2,0) років є лише оцінка мінімального спостережного періоду. Більш детальна частотна картина авіаційних подій, наприклад по місяцям або кварталам, в даному випадку не має надійної статистичної точності.

Для визначення частоти падіння ПС під час польоту (f_{ac}) використовується формула:

$$f_{ac} = \sum_i \sum_j N_{ij} \lambda_j d_j \frac{A_{kj}}{A_m} \quad (4)$$

де N_{ij} – кількість ВПС j -го типу (висота ешелону), пролітаючих за рік по i -му повітряному коридору;

λ_j – інтенсивність падіння ВПС j -го типу на 1 м польоту;

d_j – довжина ділянки повітряного коридору на якому катастрофа ВПС j -го типу

є небезпечною для АЕС – $d_j = \sqrt{(gh)^2 - b^2}$ – (дивись рис.?).

A_{kj} – площа важливих для безпеки об'єктів АЕС, які ушкоджуються ВПС j -го типу;

A_m – площа, на яку може впасти ВПС j -го типу.

На рис. 2 показані геометричні характеристики ймовірностей моделі падіння ВПС на АЕС. Якщо прийняти, що катастрофа відбувається на висоті h , то відстань, яку пролетить ВПС перед падінням на землю визначається як gxh , де g – коефіцієнт

планирування (планирування ВПС до вертикальної втрати висоти). Можна консервативно прийняти, що падіння на землю станеться у будь-якій точці сектора з кутом $\varphi = 180^\circ$ уздовж траєкторії польоту. Таким чином, площа на яку може впасти ВПС (A_{pi}) дорівнює половині площі кола з радіусом gh (максимальний коефіцієнт планування ВПС (g) складає 17).

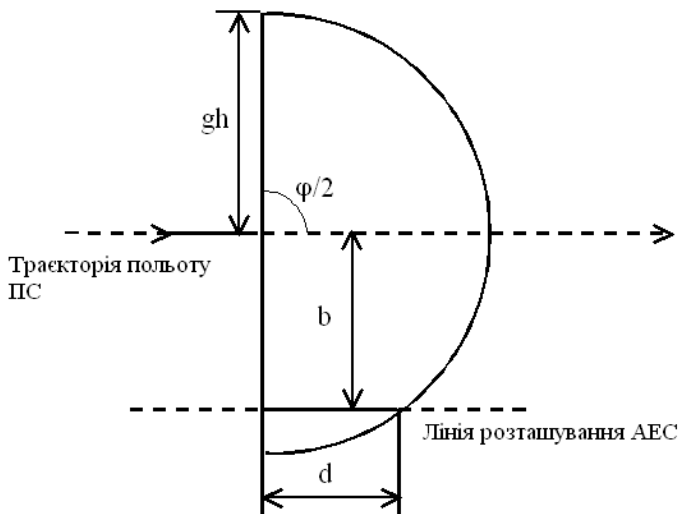


Рис. 2. Геометричні характеристики ймовірностної моделі падіння ПС на АЕС

На рис. 3 приведені області розкиду уламків ВПС (площа ураження) при авіаційній катастрофі.

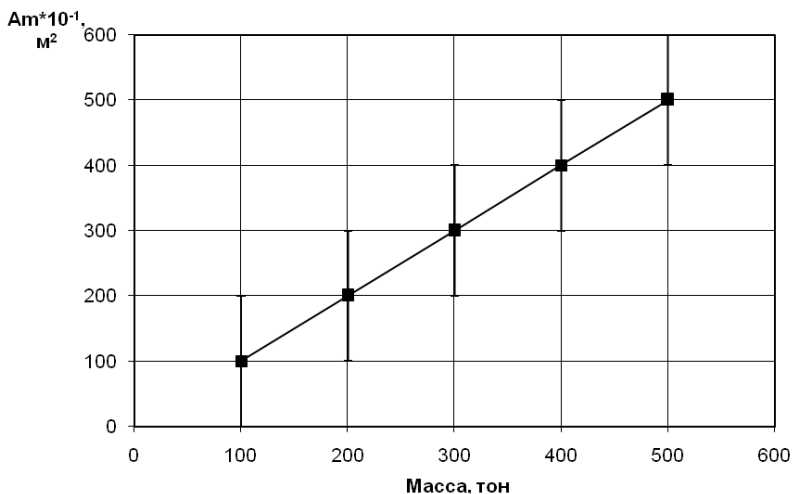


Рис. 3. Дані для оцінки області розльоту уламків ВПС

Ймовірність ураження АЕС при руйнуванні ВПС у польоті [2,3]:

$$P_1^{\Pi} = \frac{S_{об}}{S_{над}^1} \frac{\sqrt{4S_{об}}/p}{p(L_2 - L_1)}, \quad (5)$$

де $S_{об}$ – площа об'єкту;
 $S_{над}^1$ – площа зони розкидання при падінні уламків ВПС;
 L_1, L_2 – середні значення відносу уламків (важкого і легкого), які визначаються на основі статистичного аналізу даних про катастрофи, які мали місце та балістичного розрахунку траєкторій уламків для ВПС різних типів.

Ймовірність ураження АЕС при падінні на нього некерованого ВПС:

$$P_2^{\Pi} = \frac{S_{об}}{S_{над}^2} \frac{\sqrt{4S_{об}}/p}{pR_e}, \quad (6)$$

де $S_{над}^2$ – площа зони можливого падіння;
 R_e – радіус зони досяжності, який визначається виходячи з балістичних властивостей ПС, висоти польоту та можливого відхилення від траси польоту.

Ймовірність ураження АЕС у разі втрати просторової орієнтації в умовах обмеженої видимості. Зіткнення ВПС з об'єктом при втраті екіпажем просторової орієнтації в умовах обмеженої видимості може статись тоді, коли літак втратить орієнтацію в повздовжньому (знизиться на недопустимо малу висоту) або боковому напрямку (підє з траси в сторону об'єкта). Ймовірність ураження об'єкта в такому разі для несумісних подій визначається згідно теоремі множення ймовірностей як множення $PmPpPb$, де Pm – ймовірність виникнення умов обмеженої видимості поблизу АЕС, яка визначається в результаті статистичного аналізу метеоданих; Pp – умовна ймовірність суміщення місця падіння ВПС з АЕС в повздовжньому напрямку; $P_p = 2r/L_0$, де r – розмір об'єкту; L_0 – довжина маршруту в умовах обмеженої видимості поблизу об'єкту; Pb – умовна ймовірність суміщення місця падіння ВПС з АЕС в боковому напрямку:

$$P_b = \frac{1}{2} \exp(-D/\sigma) \cdot [1 - \exp(2r/\sigma)] \quad (7)$$

де r – розмір об'єкту;
 σ – середньоквадратичне відхилення ВПС від траси польоту, яке вибирається виходячи з конкретних умов забезпечення польотів по трасі і характеристик ВПС, які виконують польоти;

D – відстань від об'єкту до траси польоту в горизонтальному напрямку.

У якості вхідних даних для оцінки ймовірнісних характеристик попадання ВПС цивільної авіації в АЕС, були досліджені дані (табл. 3).

Результати оцінок ураження АЕС при падінні ВПС, кількість подій за рік з довірчою ймовірністю $P=0,95$ наведені в табл. 4.

Таблиця 3. Розрахункові оцінки виникнення авіаційних катастроф за одну годину польоту при довірчій ймовірності $P = 0,95$

Тип ВПС	Нижня довірча межа	Оцінка ймовірності	Верхня довірча межа
Розпушення в польоті			
Бойовий літак	$9,61 \cdot 10^{-5}$	$2,42 \cdot 10^{-4}$	$8,33 \cdot 10^{-4}$
Транспортний літак	$4,92 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-5}$	$4,26 \cdot 10^{-5}$
Вертоліт	$9,87 \cdot 10^{-7}$	$1,45 \cdot 10^{-6}$	$2,18 \cdot 10^{-6}$
Некерований польот			
Бойовий літак	$2,55 \cdot 10^{-4}$	$4,21 \cdot 10^{-4}$	$1,19 \cdot 10^{-3}$
Транспортний літак	$2,02 \cdot 10^{-5}$	$4,13 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-4}$
Вертоліт	$3,56 \cdot 10^{-6}$	$4,21 \cdot 10^{-6}$	$5,32 \cdot 10^{-6}$
Зазублення орієнтації			
Бойовий літак	$9,68 \cdot 10^{-5}$	$2,05 \cdot 10^{-4}$	$8,41 \cdot 10^{-4}$
Транспортний літак	$3,14 \cdot 10^{-6}$	$1,03 \cdot 10^{-5}$	$4,25 \cdot 10^{-5}$
Вертоліт	$4,92 \cdot 10^{-6}$	$6,25 \cdot 10^{-6}$	$9,11 \cdot 10^{-6}$

Таблиця 4. Оцінка ймовірності ураження АЕС, 1/рік

Тип ВПС	Нижня довірча межа	Оцінка ймовірності	Верхня довірча межа
Бойовий літак	$5,91 \cdot 10^{-13}$	$2,66 \cdot 10^{-11}$	$2,87 \cdot 10^{-10}$
Транспортний літак	$5,45 \cdot 10^{-5}$	$4,60 \cdot 10^{-14}$	$5,25 \cdot 10^{-13}$
Вертоліт	$6,05 \cdot 10^{-10}$	$9,86 \cdot 10^{-10}$	$2,53 \cdot 10^{-9}$

З наведених результатів в табл. 4 слідує, що падіння ВПС або його уламків на АЕС для бойових ВПС та вертольотів не є малоймовірною подією, особливо при їх зльоті та посадці. Точкова оцінка ймовірності авіаційної катастрофи з ураження АЕС складає для вертольотів $9,86 \cdot 10^{-10}$ та бойових ПС – $2,66 \cdot 10^{-11}$ 1/рік. Прогноз темпів розвитку Повітряних сил України показує, що за 10 років ймовірність ураження АЕС складе для АЕС $2,9 \cdot 10^{-8}$ 1/рік.

ЗАКЛЮЧЕННЯ

З наведених результатів розрахунків слідує, що падіння ВПС на АЕС є малоймовірною подією в мирний час, але стрімко зростає в надзвичайній ситуації, а точкова оцінка такої аварійної події може досягти консервативної.

У якості мір запобігання падінню ВПС на АЕС необхідно ввести обмеження на польоти вблизи зон розміщення АЕС та інші.

ЛІТЕРАТУРА

1. Азаров С.І., Сорокін Г.А. Авіаційні катастрофи та їх можливий вплив на безпеку об'єктів підвищеної небезпеки // Екологія та ресурси. Зб. наук. праць. – Київ: ПНБ. – 2007. – №16. – С. 25–37.
2. Азаров С.І., Сорокін Г.А. Застосування імовірнісного методу при аналізі авіаційних подій // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2007. – Вип. 4. – С. 72–75.
3. Азаров С.І., Сорокін Г.А. Визначення наслідків авіаційних катастроф пов'язаних з повітряними судами військового призначення // Системи озброєння і воєнна техніка. – 2008. – Вип. 1 (13). – С. 25–29.