

УДК 656.7: 629.7.072

О.М. Рева, д-р техн. наук, проф.  
О.М. Медведенко, асп.

М.Ф. Михайлік, канд. психол. наук, старш. наук. співроб.

## ПРАПОРИ КАТАСТРОФ В ЕТІОЛОГІЇ АВІАЦІЙНИХ ПОДІЙ

Враховуючи систематичний і сталий вплив людського фактора на безпеку польотів, розглянуто можливість застосування методології теорії катастроф для усунення недоліків сучасних методів і технологій розслідування авіаційних подій, що є особливо важливим для дослідження деформації емоційного досвіду члена льотної екіпажу. Наведено непрямі ознаки катастрофи – прапори (модальність, недосяжність, катастрофічні стрибки, розбіжність, гістерезис, розбіжність лінійного відгуку, критичне уповільнення / зм'якшення моди, аномальна дисперсія). Доведено, що в разі деформації емоційного досвіду члена екіпажу в процесі особливого випадку польоту, насправді відбувається катастрофа зборки.

Taking into consideration systematic and steady influence of human element on flight safety, and also drawbacks of modern methods and technologies of aviation accidents investigation, the possibility to use the methodology of accidents theory to eliminate defects is studied. That is especially important for the investigation of deformation of emotional experience of a member of the crew. Indirect characteristics – the so-called “signs” (modality, unattainability, catastrophic jumps, divergence, hysteresis, divergence of linear response, critical fashion slowing-down /mitigation, abnormal dispersion) - are viewed. This allows establishing the accident. It is proved that during the deformation of emotional experience of a member of the crew in a flight of a special case, the accident of assemblage does take place.

### Постановка проблеми

Людська помилка зазвичай розглядається як фактор впливу або причин авіаційних подій (АП). Не менше 70 % подій викликані саме помилками членів екіпажу (ЧЕ) повітряного судна (ПС) [1]. Процес розслідування АП/інцидентів займає головне місце у вирішенні проблем безпеки польотів, щоб через АП вказати шляхи її запобігання [2]. У документах ІКАО із розслідування АП [3], інших нормативних документах подані достатньо детальні методичні вказівки стосовно виявлення способів руйнації конструкції ПС, відмов функціональних систем і та ін. [4]. Методичні вказівки із розслідування причин АП за людським фактором (ЛФ) сформульовані у більш загальному вигляді. Отже, надзвичайно актуальним є розв'язання питання створення деякого універсального підходу для розуміння АП як феномена з обов'язковим врахуванням впливу ЛФ.

### Аналіз досліджень і публікацій

Анатомія АП у такій складній поліергатиційній системі керування, як авіаційна транспортна система, дозволяє виявити їх істинні причини шляхом використання латентної моделі виходу з ладу складних систем.

У роботі С. Бенета було показано складність нахождення істинних причин АП і подано рекомендації для систематизації всіх цих випадків [5]. Аналізуючи людські помилки, Дж. Ризон запропонував модель (рис. 1), що ґрунтується на теорії катастроф Р. Тома [6; 7] й ілюструє природу АП [1; 8; 9]. Він вважав, що істотна частина АП викликається особами, котрі не знаходяться на місці цієї події в момент її здійснення. Небезпеки, пов'язані з виконанням польотів, демпфіруються різноманітними захисними бар'єрами і заходами. Однак ефективність цих захисних бар'єрів може бути зниженою з причин дії людських, технічних і організаційних факторів, що й призводить до виникнення АП.

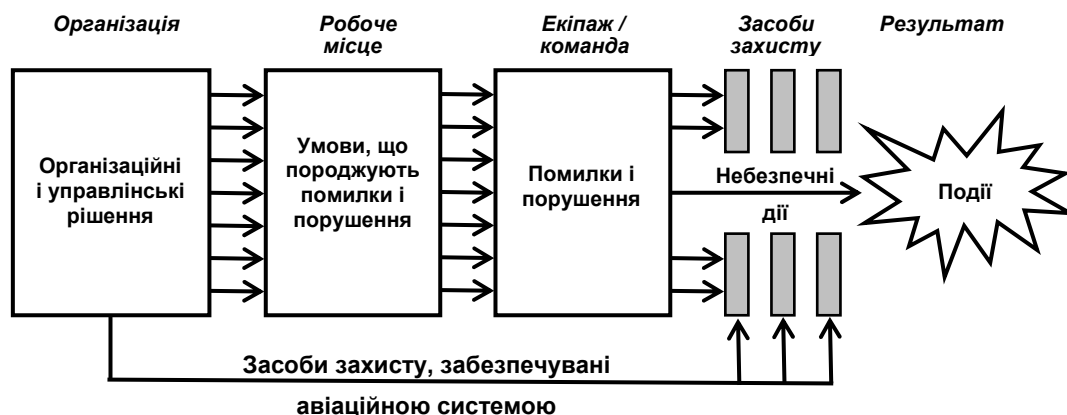


Рис. 1. Модель встановлення причин авіаційних подій

Оскільки людина і як гуманістична [10], і як активна система [11], проектує, виробляє, експлуатує складні технічні системи і керує ними в умовах ризику [12], то її рішення й дії значним чином визначають причини АП.

Складний характер етіології АП вимагає системного підходу до її аналізу. Дж. Ризон ідентифікує два типи помилок людини:

- активні помилки;
- латентні умови.

Активні помилки – це небезпечні дії людини, яка безпосередньо взаємодіє з технічною системою. Вони включають похибки, затримки в прийнятті рішень, недбалу взаємодію з технікою і процедурні порушення. Зазвичай наслідки цих активних помилок проявляються миттєво, натомість латентні умови можуть зберігатися протягом тривалого часу і не завдають шкоди доти, доки не почнуть взаємодіяти з локальними заходами із захисту дефектної системи.

Латентні умови завжди наявні у складних системах і є неминучим побічним продуктом стратегічних рішень [1; 13].

До латентних несправностей відносять:

- погані конструктивні характеристики системи;
- недостатній контроль;
- наявність невиявлених дефектів;
- непрацездатність деяких елементів системи;
- неефективну роботу автоматики;
- недостатній досвід експлуатації конкретної системи;
- використання невідповідного інструментарію.

Зазначене є наслідком стратегічних та інших рішень адміністративних органів, законодавців, виробників, конструкторів й експлуатаційників.

Ситуаційні фактори можуть виступати пусковим механізмом для активізації латентних умов, що спричиняють небажані наслідки і, як наслідок, до збоїв системи. Крім того, непередбачувана природа латентних умов може призвести до збільшення ймовірності активних помилок.

Теорія катастроф дозволяє прогнозувати ситуаційні зміни, що стосуються як самого досліджуваного об'єкта, так і поведінки всієї системи. Ця теорія особливо придатна для випадків, які характеризуються різкими змінами поведінки або несплавними переходами. При цьому забезпечується можливість прогнозування не кількісного протікання різноманітних процесів.

Детальний розгляд теорії катастроф та її моделі подано в роботах Т. Постона і В. Стюарта [14], Р. Гілмора [15], В.І. Арнольда [16] та ін.

Практичне застосування теорії катастроф в авіації знаходимо в роботах [10; 12; 17–20].

Застосування теорії катастроф для знаходження причин АП найчастіше обмежується описом геометричних характеристик моделі.

Математичне подання події відповідає точці в моделі системи із входом–виходом, де невеличкі зміни параметрів входу можуть привести до великих змін на виході.

Катастрофа може бути подана як стрибок з одного стану в інший. Основною її характеристикою в такому випадку є те, що час переходу системи з початкового стану до іншого дуже малий порівняно з тривалістю стійкого стану.

Концептуалізувати катастрофу можна розглядаючи моделюючу систему, коли кулька під впливом сили ваги повільно перекочується в контейнері від однієї його стінки до іншої при нахилі цього контейнера в різні боки. У такому випадку параметром входу є кут нахилу контейнера, а параметром виходу – положення кульки всередині контейнера (рис. 2).

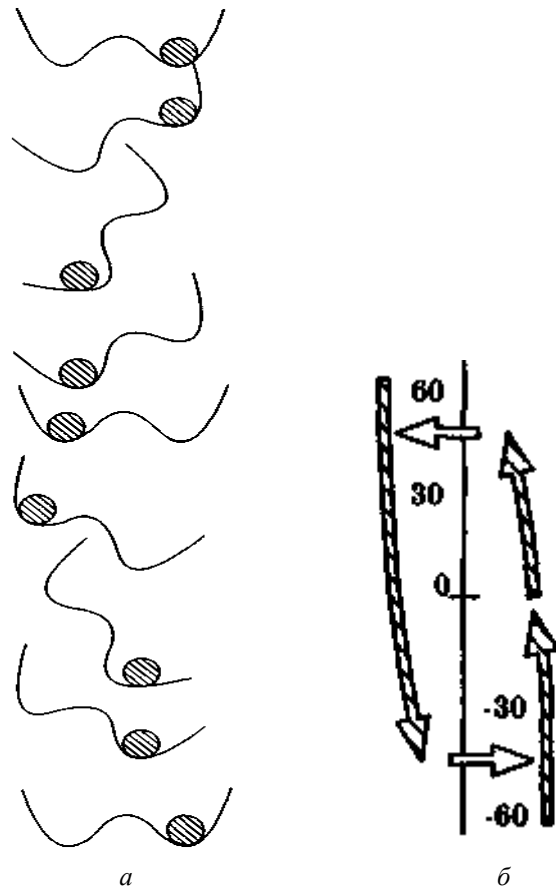


Рис. 2. Однорозмірна модель катастрофи:

- a* – положення кульки;
- б* – кут нахилу контейнера

Випадок катастрофи відповідає положенню 2 кульки. У цій точці кулька ще балансує в положенні у правої стінки контейнера, але ж може впасти вліво. Якщо кулька розташована точно в цій точці, то мінімальний нахил контейнера може привести до значного зсуву кульки. Симетричну катастрофу може викликати розташування кульки в положенні 6. Катастрофа в цій системі є подією одного параметра, тобто є одна керована змінна, а саме нахил контейнера. Важливою особливістю цієї системи є те, що вихідний параметр визначається механізмом (у цьому випадку – сила ваги, що діє на кульку), котрий дозволяє кульці займати найнижче положення з урахуванням обмежувальних факторів (стілки контейнера). Стійкий стан катастрофи можна ілюструвати за допомогою ряду точок, ліній і поверхонь. Поведінку системи, що залежить від двох контрольованих факторів та трирозмірну криволінійну поверхню зі складкою зображено на рис. 3. Рівноважні стани всередині графіка характеризуються точками на поверхні. Нижня частина складки уявляється як нестійкий максимум, тоді як границя – напівстійкі точки перегину. Бімодальна поведінка системи залежить від змін умов функціонування системи у часі. Зони, показані на рис. 3, є потенційно стійкими стінками, а затінена зона – нестійкою недоступною зоною.

Плавний перехід точки на поверхні відносно змін керівних факторів різко порушується за рахунок можливості переривчатої зміни, що відбувається, коли точка досягає границі складки поверхні. Зміни контрольованого фактора 1 або 2 можуть привести до переміщення точки поперек цієї складки. Це переміщення є катастрофою. Динамічний характер авіації і пов'язаних з нею ризиків є функцією ситуаційних факторів і латентних умов, які діють у певний момент часу. Обидва ці параметри створюють часовий і просторовий елементи. Модель схованої несправності Дж. Ризона наноситься на просторову модель (рис. 3), щоб показати нестабільність при комбінованій дії активних помилок (контрольований фактор 1) і латентних умов (контрольований фактор 2), що й веде до катастрофічних наслідків. У цій моделі активні помилки розглядаються як параметри всередині ситуаційних факторів. Помилки всередині моделі катастроф призводять до більш негативного ситуативного фактора. Ці активні помилки можуть виконувати функції включення в дію латентних факторів, що призводить до ряду наслідків з порушеннями в роботі системи.

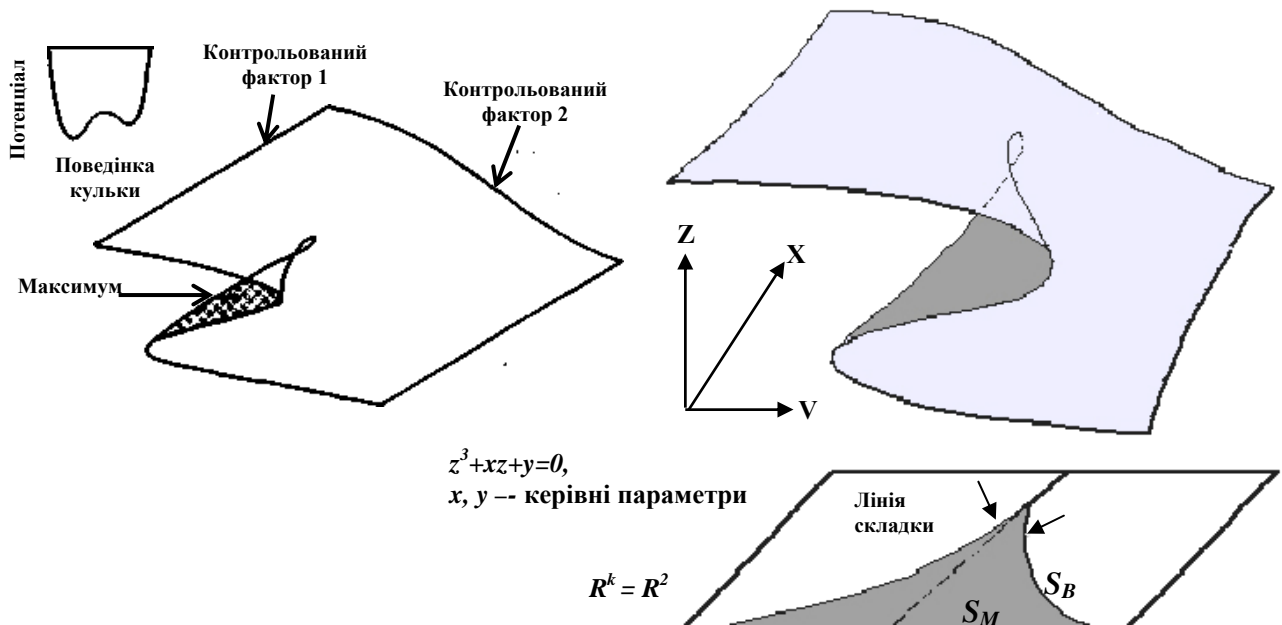


Рис. 3. Модель катастрофи

### Постановка завдання

Ризик АП зростає у разі комбінованого впливу ситуаційних і систематичних факторів, що створюють нестійкі умови і провокують катастрофічні наслідки.

Ознаки, які дозволяють визначити наявність катастрофи за деякими непрямими ознаками, Є.К. Зиман назвав прапорами [14; 15]. Завдання нашого дослідження полягає в їх адаптації для етіології АП.

Відомі вісім прапорів катастроф:

- модальність;
- недосяжність;
- катастрофічні стрибки;
- розбіжність;
- гістерезис;
- розбіжність лінійного відгуку;
- критичне уповільнення / зм'якшення моди;
- аномальна дисперсія.

Перші п'ять із прапорів завжди зустрічаються разом і з'являються, коли фізичні керівні параметри можуть змінюватися всередині деякої області простору керівних параметрів, в якій відповідна потенційна функція має більш, ніж один мінімум.

За винятком гістерезису, що не може існувати, якщо поведінка системи підкоряється принципу Максвелла [15]. Інші три прапори можуть зустрічатися навіть тоді, коли потенційна функція не має кратних мінімумів. Як тільки один із цих прапорів зафіксований, тобто встановлена ознака про наявність катастрофи, керівні параметри можна змінювати так, щоб стало можливим знайти інші прапори, які обов'язково повинні виявити себе за відповідних умов.

Хоча катастрофи можна виявити під час якісних досліджень рівнянь, існує ефект зворотного зв'язку, що іноді дозволяє одержати якісні наслідки навіть у тому випадку, коли не знаємо самих рівнянь, але ж за умови, що можемо встановити наявність і тип катастрофи.

### Модальність

Фізична система може мати два або більше різних фізичних стани, тобто, потенційна функція, яка описує систему, має більш ніж один локальний мінімум у деякій області зміни зовнішніх керівних параметрів.

### Недосяжність

Якщо система існує в стані рівноваги, котрий є морсовським ісідлом ( $i > 0$ ), то такий стан є хитким, тому що існують інфінітезимальні

збурювання, що приводять до зменшення значення потенціалу. Коли потенційна функція має більш ніж один локальний мінімум, вона повинна мати принаймні одне ісідло ( $c > 0$ ), котре відповідає стану хиткої рівноваги.

### Катастрофічні стрибки

Чи використовується принцип Максвелла, чи принцип максимального зволікання, малі зміни керівних параметрів можуть викликати великі зміни (катастрофічний стрибок) у значеннях перемінних стану у міру того, як система перескакує з одного локального мінімуму в інший.

Якщо прийнятий принцип Максвелла, цей несподіваний стрибок супроводжується плавною, але не диференційованою зміною значень потенціалу. Якщо прийнято принцип максимального зволікання, – стрибок з одного зникаючого локального мінімуму в глобальний або деякий інший локальний мінімум супроводжується дискретною зміною значення потенціалу.

Перехід з області одного локального мінімуму в інший виявляє себе у великій зміні значення перемінної стану, що часто відбувається у понадшвидкій часовій шкалі.

### Розбіжність

Кінцеві зміни в значеннях керівних параметрів приводять до кінцевих змін у значеннях змінних стану в точці рівноваги. Звичайно малі збурювання у вихідних значеннях керівних параметрів ведуть лише до невеликої зміни початкових і кінцевих значень змінних стану. Однак в околі неморсовської критичної точки малі зміни початкових значень змінних стану можуть спричинити великі зміни кінцевих значень цих змінних.

Нестійкість фізичного процесу при збурюваннях у траєкторії керівних параметрів називають розбіжністю.

### Гістерезис

Гістерезис виникає, коли фізичний процес не є цілком оборотним, тобто над тією же самою точкою простору керівних параметрів стрибок з локального мінімуму 1 у локальний мінімум 2 може і не відбутися, у той час як стрибок з локального мінімуму 2 у локальний мінімум 1 відбувся гістерезис не виникає, якщо прийнято принцип Максвелла.

### Розбіжність лінійного відгуку

У разі невеликої зміни значень керівних параметрів ( $c \rightarrow c^0 + \delta c^0$ ) положення точки рівноваги також буде змінюватися ( $x \rightarrow x^0 + \delta x^0$ ).

Зв'язок між відгуком рівноваги і зміною в керуванні може бути отриманий розкладанням  $V(x; c)$  в ряд Тейлора за ступенями  $(x - x^0)$ ,  $(c - c^0)$  і наступним видаленням усіх, за винятком лінійних, членів  $\nabla v = 0$ . Тоді лінійний відгук визначають як

$$\delta x_j^o = (V^{-1})^{jk} V_{k\alpha} \delta c_\alpha^o = \chi_{j\alpha}(x^o; c^o) \delta c_\alpha^o. \quad (1)$$

Лінійний відгук  $\delta x_j^o$  на зміну  $\delta c_\alpha^o$  визначають за допомогою тензора сприйнятливості  $\chi_{j\alpha}$ , який виражається через другі похідні потенційної функції, узяті в стійкому стані рівноваги. За наближення стану рівноваги до неморсовської критичної точки ( $\det V_{ij} \rightarrow 0$ ) деякі елементи в матриці  $V^{-1}$  з рівняння (1) стають занадто великими за величиною. Це означає, що функція лінійного відгуку  $\chi_{j\alpha}$  розходиться з наближенням до виродженої критичної точки.

### Критичне уповільнення / зм'якшення моди

Якщо динамічні явища в системі загасають поступово, то досягається рівень апроксимації, за якого залежно від характеру динамічного стану системи вона може бути або градієнтною динамічною, або градієнтною ньютонівською системою, причому в обох випадках вона буде мати різні прапори катастроф.

Для градієнтної динамічної системи при підході до біфуркаційної множини  $\det V_{ij} \rightarrow 0$  так, що одне або більше власних значень матриці прагне до нуля. Отже, час релаксації відповідних коливань зростає. Тобто, у разі підходу до неморсовської критичної точки принаймні для однієї з мод стає все важче релаксуватися до нуля. Подовження шкали часу релаксації називають критичним уповільненням.

Для градієнтної ньютонівської системи під час підходу до біфуркаційної множини  $\det V_{ij} \rightarrow 0$  одна або більш частот коливань  $\omega_j$  прагне до 0. Зменшення частоти коливання для визначених мод і є зм'якшенням моди.

### Аномальна дисперсія

Фізична система може бути задана скоріше за допомогою ймовірності  $P(x)$ , визначеної над простором змінної стану, чим за допомогою ізольованої точки (розподілу) у просторі змінних стану. Така система характеризується моментами функції розподілу. Якщо така фізична система асоціюється з потенційною функцією  $V(x; c)$ , заданою над простором  $R^n$  змінних функцій стану  $x$  і залежною від керівних параметрів  $c \in R^k$ , то незалежна від часу ймовірнісна функція розподілу часто пов'язана з потенційною функцією простою експонентою:

$$P(x; c) = Ne^{-\frac{V(x; c)}{D}},$$

де  $N$  – константа нормалізації;

$D$  – позитивна константа дифузії.

Зазвичай константа  $D$  мала. Тоді виділяють найглибший мінімум  $V(x; c)$ . Якщо найглибший мінімум є морсовською критичною точкою в  $x = x^o$ , то

$$P(x; c) \cong Ne^{-\frac{V_{ij}(x-x^o)_i(x-x^o)_j}{D}}.$$

Коли потенціал  $V$  в околі точки  $x^o$  приведений до канонічного вигляду, то дисперсія в цій критичній точці може бути обчислена за формулою:

$$\langle \Delta x_i, \Delta x_j \rangle = \frac{1}{2} \delta_{ij} \frac{D}{\lambda_i}.$$

Оскільки  $D$  мала, то дисперсія також мала, якщо тільки одне з власних значень матриці  $V_{ij}$  не є малим. Це означає, що в деяких випадках дисперсія в околі неморсовської критичної точки може бути великою (аномальною). Р. Тома звів усі функції катастроф до елементарних катастроф вигляду

$$\text{Cat}(l, k) = CG(l) + \text{Pert}(l, k),$$

де  $l$  – розмірність нульового простору  $V_{ij}$  в неморсовській критичній точці;

$k$  – кількість керівних параметрів.

Функцію  $\text{Cat}(l, k)$  називають функцією катастрофи або просто катастрофою.

Функція катастрофи дорівнює сумі функцій ростка катастрофи і її збурювань  $\text{Pert}(l, k)$ .

Функцію  $CG(t)$  називають ростком катастрофи. Якщо  $x^o$  – неморсовська критична точка потенційної функції сім'ї  $V(x, c)$  за  $c = c^o$ , то у відкритому околі точки  $(x^o, c^o)$  простору  $R^n \otimes R^k$

$$V = \text{Cat}(l, k) + \sum_{j=l+1}^n \lambda_j(c) \cdot y_j^2.$$

Таким чином, ростком катастрофи  $CG(t)$  є неморсовська функція  $l$ -змінних.

Збурювання не впливають на якісний характер поведінки функції в околі некритичної або морсовської критичної точок.

У першому випадку незначно змінюється величина і напрямок градієнта функції, у другому злегка зміщається критична точка і змінюється критичне значення функції, але тип морсовського сідла в цій точці залишається без зміни.

У тих випадках, коли сім'я функцій містить члени з неморсовською критичною точкою, можна знайти таку координатну систему, яка розщеплює цю функцію на «погану» неморсовську і «гарну» морсовську частини.

Цей результат справджується і для сім'ї функцій, близьких до розглянутої неморсовської функції, тобто, завжди можна знайти деяку координатну систему, в якій збурена функція розщеплюється на дві частини, причому кожна з них може бути вивчена окремо. Якщо  $k \leq 5$ , канонічних ростків всього 14. Найчастіше в практиці зустрічається катастрофа типу  $A_3$ , названа через властиву їй геометрію катастрофою зборки (рис. 3) [15].

На практиці найважливішим питанням є застосовність того або іншого математичного апарату до конкретної досліджуваної проблеми, у контексті наших досліджень йдеться про деформацію емоційного досвіду (ЕД) ЧЕ ПС. Про наявність елементарної катастрофи свідчать неморсовські критичні точки в сім'ї потенційних функцій, що описують цю систему або певне явище.

Однак з деяких причин такі точки не можуть бути розпізнані відразу. Наприклад, потенційна функція занадто складна або точно невідома, система не є навіть градієнтною системою або немає уявлення щодо вигляду рівняння, що належним чином описує систему. Проте катастрофи зустрічаються в реальних ситуаціях, і тому важливо вміти їх розпізнати.

Процес деформації ЕД ЧЕ в процесі ОС найкращим чином може бути описаний саме в термінах певної катастрофи. Для окремих ізольованих функцій більшість точок  $x \in R^n$  є некритичними, проте якісно глобальна поведінка розглянутої функції цілком визначається ізольованими критичними точками.

Для сім'ї функцій більшість точок  $x \in R_n$  параметризує морсовські функції, але все-таки глобальна якісна поведінка сім'ї функцій цілком визначається множиною міри нуля у просторі  $R_n$ , точки якого параметризують функції з виродженими точками. Цю множину міри нуля, або сепаратрису, називають множиною біфуркації і позначають  $\Phi_M$ .

Множину Максвелла визначають за допомогою рівнянь Клаузиуса-Клапейрона. Критичні, двічі і тричі вироджені критичні точки катастрофи  $A_3$  визначають прирівнюванням відповідно першої, другої і третьої похідних  $F(x; a, b)$  до нуля:

$$F(x; a, b) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ax^2 + bx; \quad (2)$$

$$x^3 + ax + b = 0; \quad (3)$$

$$3x^2 + a = 0; \quad (4)$$

$$6x = 0. \quad (5)$$

Умова (3) виконується в критичних точках; умови (3) і (4) – у двічі вироджених критичних точках, а умови (4)–(5) – у тричі вироджених критичних точках.

Зв'язок між керівними параметрами визначають так:

$$\left(\frac{a}{3}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 = 0.$$

Будь-яка точка простору параметрів  $(a, b) \in R^2$ , крім точок сепаратриси, параметризує функції з однієї або трьома ізольованими критичними точками. Графік функції (2) усередині області, що має форму зборки,  $F(x; a, b)$ , має три ізольовані критичні точки, а поза цією областю – всього одну. На границі функція сім'ї має ізольовану критичну точку і двічі вироджену критичну точку, а на початку координат – тричі вироджену критичну точку. Положення критичних точок знаходять рішенням рівняння (3), що задає двовимірне різноманіття, у тривимірному просторі з координатними осями  $x-a-b$ . Рішення рівняння  $\nabla F = 0$  зображене вкладеним у простір  $R^3 = R^1 \otimes R^2$ . Проекція цього різноманіття на площину керівних параметрів  $R^2$  є лінією складки. Перекручена лінія складки

$$\left(\frac{a}{3}\right)^3 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 + 0$$

є тінню понадскладчастої частини різноманіття. Штрихова лінія  $a < 0, b = 0$  в площині керівних параметрів є множиною Максвелла або нелокальною сепаратрисою і служить межею розвинення між функціями, що мають більш глибокий лівосторонній мінімум, і функціями, що мають більш глибокий правосторонній мінімум.

Критичні значення функції  $F$  визначають розв'язуванням рівняння (3) для критичних точок і оцінюванням (2) у цих критичних точках.

Оскільки під час розгляду деформації ЕД є лише експериментальні дані і немає якої-небудь загальноприйнятої теорії їх інтерпретації, то немає готової потенційної функції, котру можна було б досліджувати. Більше того, навіть вигляд рівняння, яке її описує, невідоме і не може бути виведене з відомих положень сучасної інженерної психології.

Отже, наявність катастрофи можна визначити лише за наявністю її прапорів.

Узагальнені дані про ОВ, описані М.Ф. Михайліком, В.О. Булавою та В.Л. Каменєвим (рис. 4, 5), мають координати, що спроектовані на площині "небезпека – нейротизм" і "стан – нейротизм" відповідно:

$\Phi_{УО}$  – "умовно-об'єктивна оцінка небезпеки ОС" (далі – "небезпека");

$n$  – нейротизм;

$S$  – стан страти "емоційний досвід ЧЕ" (далі – "стан").

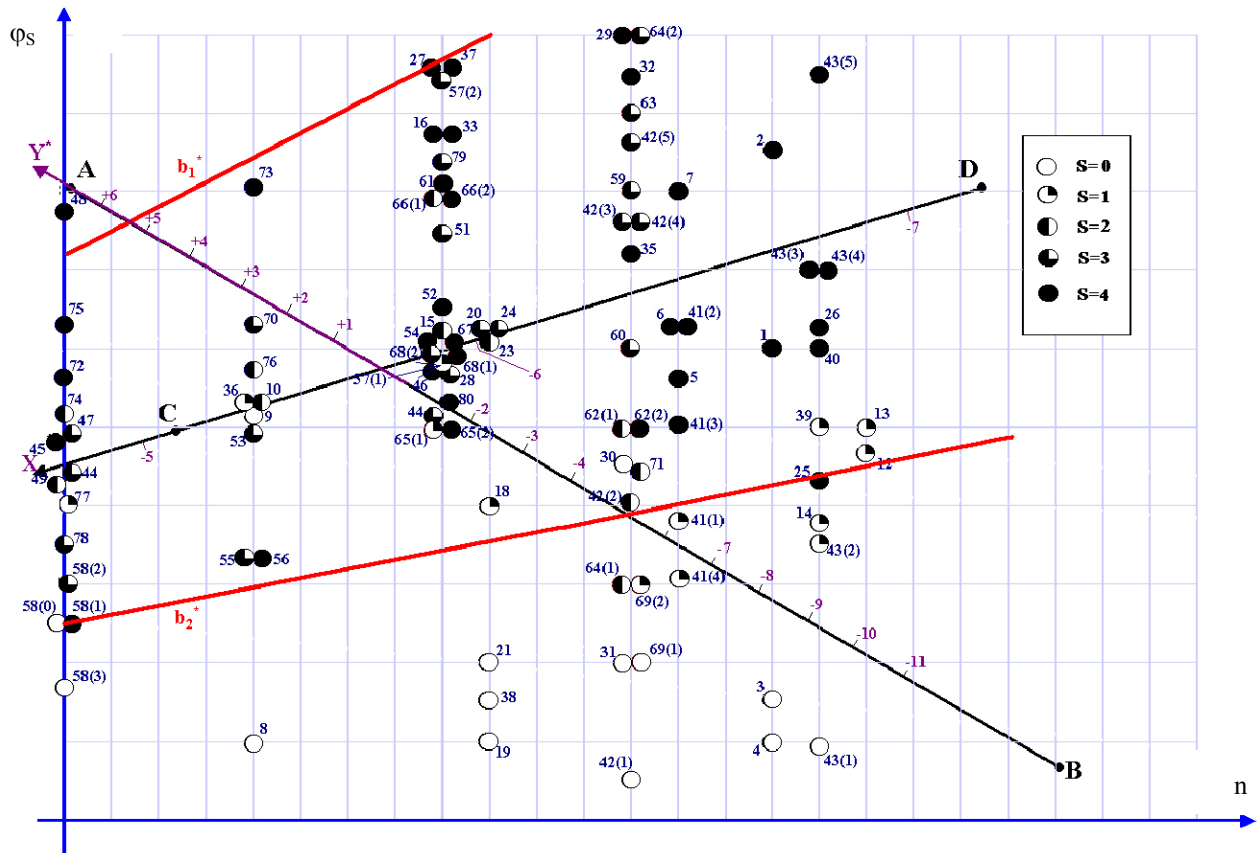


Рис. 4. Проекція різноманіття катастрофи і системи координат, отриманих у результаті лінійного перетворення вихідної системи координат на площину керуючих параметрів

Починаючи з деякого значення керівного параметра, а саме з  $n \geq 12$ , в експериментальних даних немає станів з  $1 < S < 4$ . Значення стану  $S$  при цьому щільно групуються навколо  $S = 4$  і навколо  $S = 0$ , а за більшого значення  $n$  – навколо  $S = 1$ . Це дозволяє стверджувати, що наявні відразу два прапори катастрофи: зона недосяжності і бімодальності за відповідного значення керівних параметрів. Це збігається з гіпотезою [14; 15] про те, що тут є у неявному вигляді потенційна функція, яка описує систему, з більш ніж одним локальним мінімумом у деякій області зміни зовнішніх керівних параметрів. У цьому випадку це буде справджуватися за наявності двох локально стійких мінімумів (рис. 4), розділених середнім недосяжним шаром, що є хитким локальним максимумом.

Наявність ще одного прапора – катастрофічних стрибків – було зафіксовано надійно і давно. Більшість опитуваних пілотів однозначно підтверджує наявність катастрофічних стрибків у деформації ЕД.

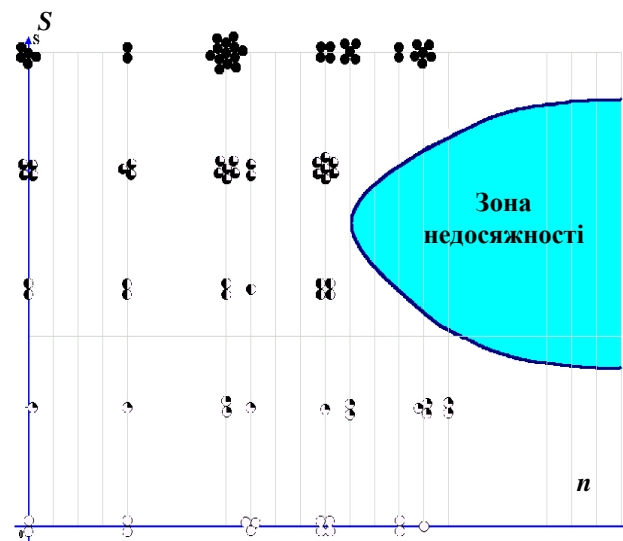


Рис. 5. Проекція різноманіття катастрофи і системи координат, отриманих у результаті лінійного перетворення вихідної системи координат на площину "стан – нейротизм" (зона недосяжності)

Якщо спроектувати ОВ на координатну площину «небезпека – стан», як це показано на рис. 6, то стане очевидною наявність ще одного прапора катастрофи – гістерезису.

Це спостерігається, коли поворотний стрибок з одного листа різноманіття катастрофи на іншій не трапляється за тих же значень керівних параметрів, що і прямий стрибок.

Якщо гарна просторова уява, легко бачити можливість явища гістерезису вже за загальним розташуванням проекцій ОВ. На рис. 6 подано проекцію ОВ на площину, а не перетин різноманіття катастрофи площиною  $n = \text{const}$ . Аркуші різноманіття мають нахил до координатної площини "небезпека – нейротизм".

Факт наявності гістерезису наочно ілюструє ОВ 41, що докладно описаний у роботах [18; 20].

Проекція шляху «1–2–3–4» точно відповідає гістерезисної петлі на рис. 6. Це очевидно з огляду

на те, що площина  $n = 13$ , якій належать точки ОВ 41, розгорнута під кутом до координатної площини  $YZ$ , отриманої після лінійного перетворення координат "небезпека – нейротизм – стан".

Гістерезис не виникає, якщо прийнято принцип Максвелла, тобто його наявність – це додаткове підтвердження отриманого на підставі інтерв'ю факту, що при вивченні деформації ЕД ЧЕ варто виходити з наявності принципу максимального зволікання, тобто стан системи визначається стабільним або метастабільним мінімумом доти, доки він існує.

Якщо вважати гіпотезу наявності катастрофи за деформації ЕД ЧЕ у процесі ОВ доведеною, то різноманіття катастрофи може мати вигляд тільки зборки Уїтні [16], оскільки будь-які особливості являють собою сукупність окремих зборок і складок. Варіант складки Уїтні тут відпадає.

Серед описаних Р. Тома елементарних катастроф тільки зборка має два керівних параметри.

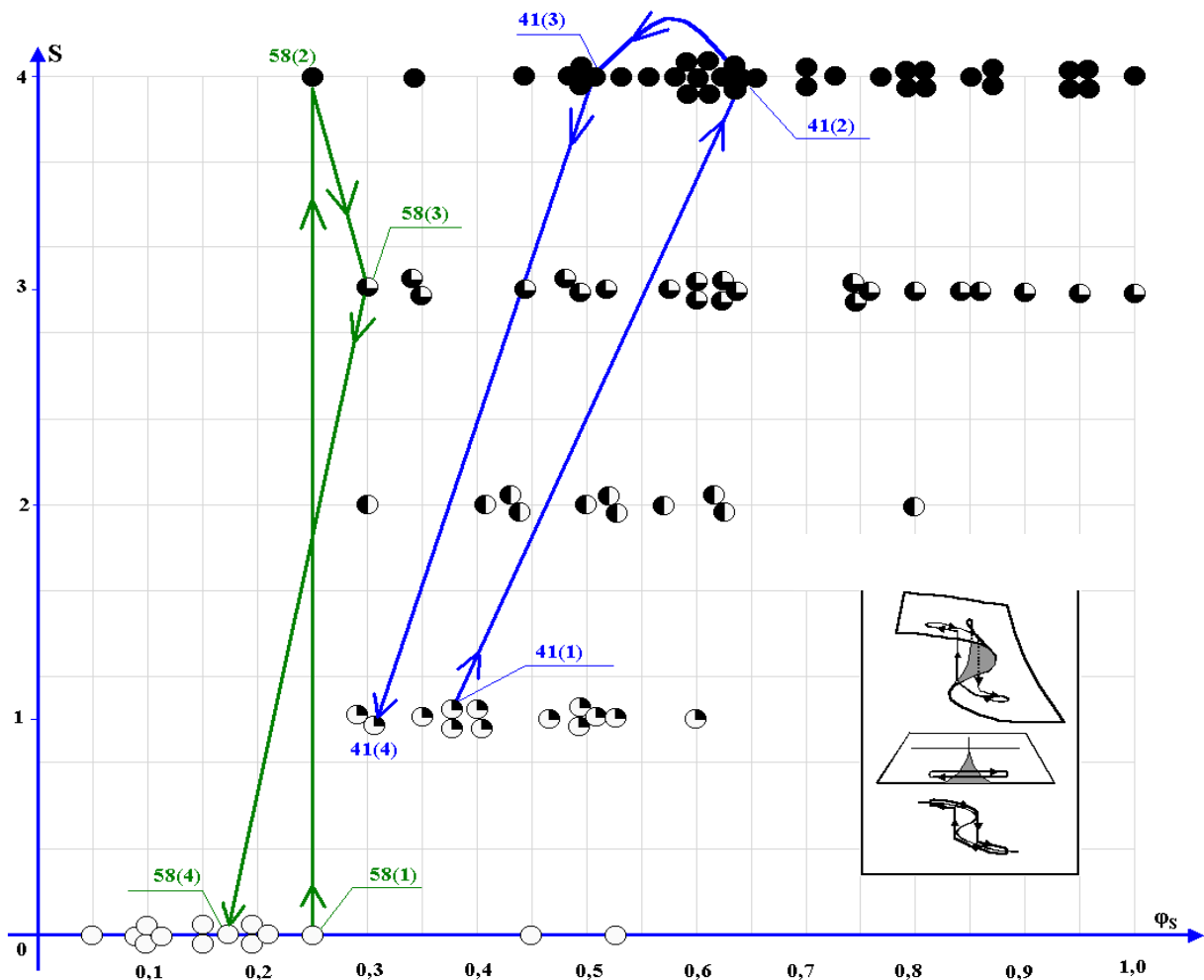


Рис. 6. Проекція різноманіття катастрофи на площину «стан – небезпека»



Якщо вибір двох керівних параметрів не приводить до катастрофи зборки, значить або неправильно обрані параметри або хибна сама гіпотеза. Наявність же катастрофи в нашому випадку доведено, а вибір керівних параметрів добре узгоджується з результатами експерименту.

За достатньої просторової уяви із зображеного подібну проекцію на координатну площину «небезпека – нейротизм» може дати тільки різноманіття катастрофи у вигляді зборки Уїтні.

### Висновки

1. Анатомія збоїв і катастроф в авіаційній транспортній системі як складній поліергатиційній системі керування показує етіологію, котра відображається в моделі латентної несправності складних систем.
2. Ситуаційні і систематичні фактори (латентні умови) наносяться на модель катастрофи, котра ілюструє пусковий ефект активних збоїв.
3. Доведено можливість застосування математичного апарата теорії катастроф для опису деформації ЕД ЧЕ в ОВ польоту. Встановлено, що в такому випадку спостерігається катастрофа зборки.
4. Розкритий зміст прапорів катастроф як діагностуючих критеріїв потенційно-небезпечної польотної ситуації.
5. Подальші дослідження доцільно проводити у напрямі визначення оптимальної працездатності пілотів в ОВ польоту.

### Література

1. *Изучение роли человеческого фактора при авиационных происшествиях и инцидентах* // Человеческий фактор: сб. материалов. – № 7. – Циркуляр ICAO 240-AN/144. – Монреаль, Канада, 1993. – 76 с.
2. *Железняков Ю.Д.* Обзор современных методов исследования авиационных происшествий / инцидентов: По материалам зарубежных источников / Ю.Д. Железняков, В.Д. Кофман // Проблемы безопасности полетов: обзорная информ. – М.: ВИНТИ, 2004. – № 5. – С. 3–14.
3. *Руководство по расследованию авиационных происшествий* // Док. ICAO 6920 - AN / 855 / 4. – Монреаль, Канада, 1970.
4. *Руководство по предотвращению авиационных происшествий* // Док. ICAO 9422 – AN / 923. – Монреаль, Канада, 1984. – 144 с.

5. *Bennet S.* Human Error – by Design? – Perpetuity Press, Leicester, 2001.
6. *Thom R.* Topological models in biology // *Topology*. – 1969. – Vol. 8. – P. 313–336.
7. *Дугин Г.С.* Перспективы использования теории катастроф для определения причин авиационных происшествий // Проблемы безопасности полетов: обзорная информ. – М.: ВИНТИ, 2005. – Вып. 5. – С. 3–8.
8. *Reason J.* Human Error. – Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
9. *Reason J.* Managing the Risks of Organizational Accidents. – Ashgate, Aldershot, 1998.
10. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: пер. с англ. Н.И. Ринго / под ред. Н.Н. Моисеева, С.А. Орловского. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
11. *Касьянов В.* Субъективный анализ: монография. – К.: НАУ, 2007. – 512 с.
12. *Safety Management Manual (SMM): DOC ICAO 9859 – AN/460.* – Montreal, Canada, 2006.
13. *Человеческий фактор в управлении и организации* // Человеческий фактор: сб. материалов. – № 10. – Циркуляр ICAO 247 – AN / 148. – Монреаль, Канада, 1993. – 47 с.
14. *Постон Т.* Теория катастроф и ее приложения / Т. Постон, И. Стюарт. – М.: Мир, 1980. – 607 с.
15. *Гилмор Р.* Прикладная теория катастроф: в 2 кн. – М.: Мир, 1984: – Кн. 1. – 350 с.; Кн. 2. – 285 с.
16. *Арнольд В.И.* Теория катастроф. – М.: Наука, 1990. – 128 с.
17. *Балясников В.В.* Возникновение и развитие неустойчивых рабочих состояний человека-оператора в системе «экипаж – воздушное судно» / В.В. Балясников, А.Р. Ин // Применение аналитических методов в исследовании деятельности специалистов гражданской авиации. – СПб.: АГА, 1997. – С. 55–59.
18. *Ленгаров А.О.* Условия использования теории катастроф // Методы и модели исследования деятельности специалистов гражданской авиации. – СПб.: АГА, 1997. – С. 43–55.
19. *Джафарзаде Р.М.* Методика подготовки членов экипажей к действиям в особых ситуациях с позиций теории катастроф / Р.М. Джафарзаде, Г.В. Коваленко // Проблема человеческого фактора в авиации. – СПб.: Академия ГА, 1998. – С. 41–45.
20. *Лейченко С.Д.* Человеческий фактор в авиации / С.Д. Лейченко, А.В. Малышевский, Н.Ф. Михайлик: монография: в 2 кн. – СПб.; Кировоград, 2006. – Кн. 1. – 480 с.; Кн. 2. – 512 с.