

**АЕРОКОСМІЧНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ**

УДК 621.396.17(07)

**В.П. Харченко**, д.т.н., проф.  
**М.А. Міхалочкін**, д.т.н., проф.  
**Касем Аббуд Махди**, асп. (Ірак)**КЛАСИФІКАЦІЯ ПОХИБОК НАВІГАЦІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ**

*Наведено аналіз джерел похибок радіонавігаційних пристроїв і систем, їх класифікацію, опис і кількісні характеристики найбільш поширених їх оцінок.*

*Radio navigation facilities and systems inaccuracy sources, their classification and description as well as most spread amount characteristics and assessments have been analyzed.*

**абсолютні, адитивні, апаратурні, випадкові, відносні, динамічні, інструментальні, методичні, мультиплікативні, об'єктивні, рідкісні, систематичні, стаціонарні, суб'єктивні, похибки, класифікація, часті**

**Постановка завдання**

Натепер у джерелах інформації відомостей про класифікацію похибок за загальними ознаками, що визначають їх однорідність, недостатньо [1–3].

**Мета** роботи – розглянути можливості об'єднання у визначенні групи похибок, що супроводжують навігаційні визначення залежно від властивостей і ознак, їх систематизацію та ілюстрацію простих математичних операцій їх оцінки.

**Виклад основного матеріалу**

Ефективність навігаційних пристроїв (НП) і навігаційних систем (НС) оцінюється точністю.

Точність вимірювання – найважливіша характеристика НС. Вона визначається похибками вимірювань радіонавігаційного параметра (РНП) – параметра радіосигналу, що містить інформацію про координати, швидкість й інші параметри об'єкта.

У кутомірних, далекомірних, кутомірно-далекомірних, різницево-далекомірних системах вимірюваними параметрами первинного джерела інформації можуть бути амплітуда, часове, частотне зрушення або фазовий набіг коливань прийнятого сигналу відносно опорного, формованого в системі. Відповідно до вимірюваного параметра розрізняють амплітудні, імпульсні (тимчасові), частотні (доплерівські) і фазові системи.

У кутомірних НС вимірювальним параметром є кут між опорним напрямком і напрямком на об'єкт, у далекомірних – дальність між об'єктами, або висота, у різницево-далекомірних – різниця відстаней між двома фіксованими точками, а в системах вимірювання швидкості – похідна від дальності, висоти польоту й доплерівський зсув частоти прийнятих коливань відносно частоти опорних.

Алгоритми оптимальних вимірників, що забезпечують найвищу (потенційну) точність визначення наведених параметрів сигналу, обмежені власними шумами приймача вимірника. Однак у реальних умовах роботи РНС потенційна точність практично недосяжна через недосконалість методу вимірювань, його технічної реалізації й умов експлуатації, зокрема, в разі дії завад.

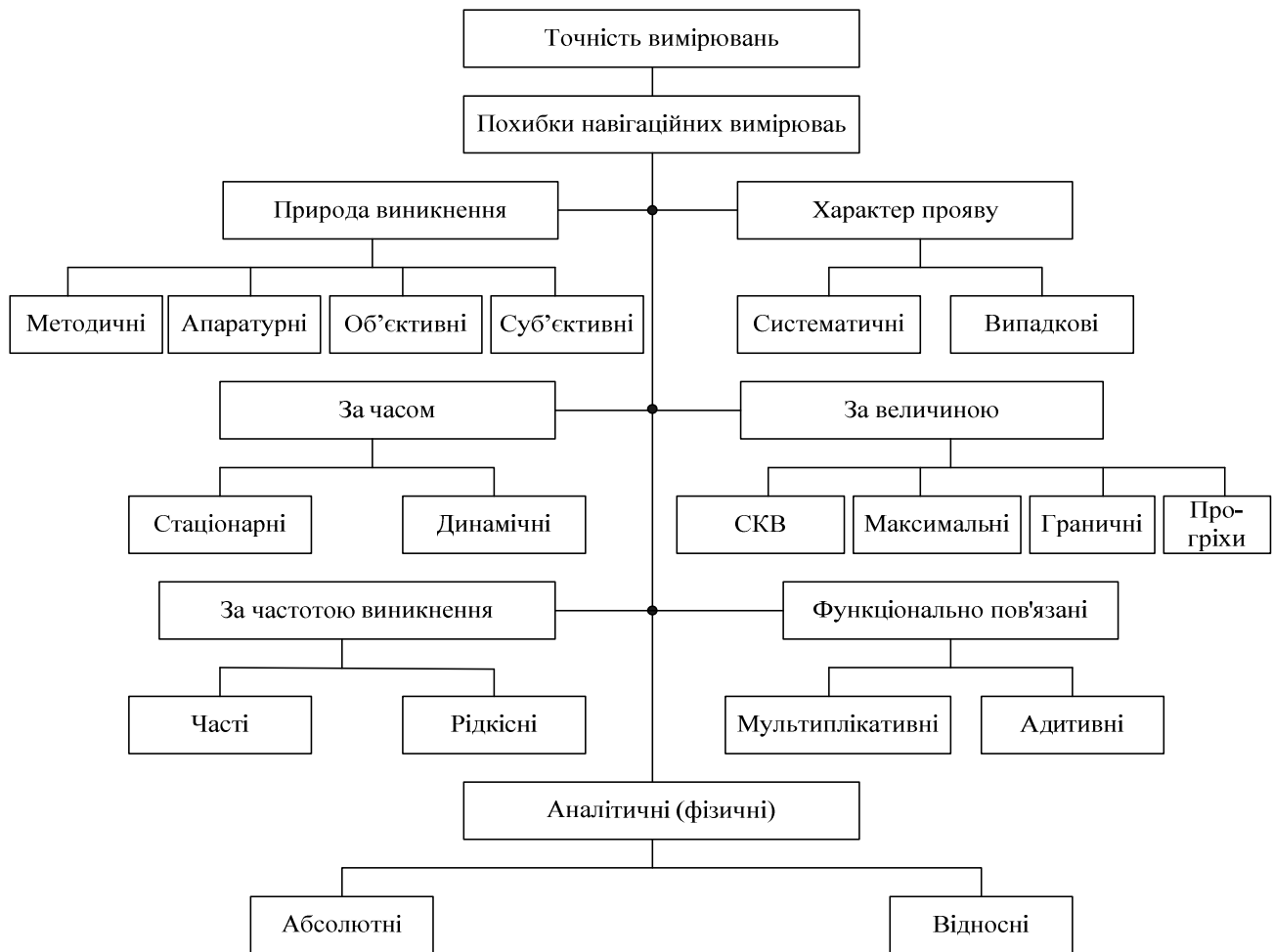
Вимірювання навігаційних величин, за допомогою НП і НС неминуче супроводжуються похибками, які можна розділити на класи.

Доречно згадати висловлювання видатного вченого Д.І. Менделєєва (1834–1907), що наука починається відтоді, як починають вимірювати, та його класифікаційну таблицю елементів. Класифікувати похибки можна за різними ознаками. Залежно від причин, що породжують ці похибки, їх можна розділити на чотири групи (див. рисунок) [2; 3].

Перша група охоплює *методичні* похибки, які виникають через недосконалість використовуваних методів вимірювання. Як приклад подібних похибок можна навести методичну похибку частотного радіовисотоміра, спричинену дискретністю відліку висоти польоту літака.

До другої групи належать *апаратурні* похибки. Їх поява зумовлюється недосконалістю реалізації методів і розробок навігаційної апаратури. Причинами появи апаратурних похибок є обмеженість градування шкал приладів, недостатня чутливість вимірників, залежність показань від мінливості напруг джерел живлення та ін.

Третю групу становлять *об'єктивні* похибки, зумовлені впливом зовнішнього середовища, змінами умов експлуатації систем.



Класифікація похибок навігаційних вимірювань

Джерелами об'єктивних похибок є електричні й акустичні завади, коливання температури, тиску, вологості навколишнього середовища, зміни умов поширення радіохвиль, напруги живлення, гравітаційні й магнітні поля Землі, активність Сонця, вібрація апаратур тощо.

У четверту групу входять *суб'єктивні* похибки. Вони виникають через недостатній професіоналізм і натренованість оператора, що виконує вимірювання, і через недосконалість його органів чуття.

Методичні й інструментальні похибки можна зменшити через:

- підвищення якості проектування апаратури з використанням більш досконалих методів;
- застосуванням ЕОМ для моделювання й розрахунку;
- переходу від аналогових до цифрових методів обробки;
- максимальне використання апріорної інформації про характеристики сигналів і завод;
- спільне оброблення (комплексування) даних різних датчиків інформації.

Для зменшення впливу наведених факторів під час створення системи потрібно обирати раціональні схемотехнічні й конструктивні рішення, розміщувати апаратуру з їх урахуванням.

Крім того, необхідно передбачити можливість періодичної перевірки й калібрування параметрів апаратури в процесі експлуатації.

За характером прояву (повторюваності) похибки поділяють на систематичні й випадкові. Результат кожного окремого вимірювання, що містить похибки, в загальному випадку є сумою систематичної й випадкової похибок.

*Систематичні* похибки повторюються під час кожного вимірювання. Як приклад систематичної похибки можна навести девіацію магнітного компаса, радіодевіацію пеленгаторів. Зазвичай причини виникнення систематичних похибок піддаються аналізу, а самі похибки – обліку. Систематичні похибки, як правило, вилучають із результатів вимірювань, уводячи виправлення або усуваючи причини виникнення цих похибок.

Виправлення дорівнює систематичній похибці, узятій зі зворотним знаком.

Значення виправлень беруть з таблиць або графіків, які будують на підставі результатів серії контрольних вимірювань, виконуваних для визначення систематичних похибок.

Похибки, величина й знак яких змінюються під час кожного окремого вимірювання, називають випадковими.

*Випадкові* похибки є наслідком одночасної дії багатьох причин, що по-різному проявляють себе під час кожного окремого відліку.

Унаслідок цього випадкова похибка заздалегідь невідома і її не вдається вилучити з результату одиночного відліку.

Випадкові похибки, що виникають під час навігаційних вимірювань, спричиняються мінливістю умов поширення радіохвиль, дією хаотичних шумових або імпульсних завад та іншими причинами.

Правильне конструювання апаратури й оптимальний вибір її параметрів дають змогу зменшити випадкові похибки до потенційно досяжного рівня. Однак повністю усунути їх неможливо. Оцінюючи точність навігаційних вимірювань, доводиться вдаватися до статистичної обробки результатів вимірювань на основі теорії ймовірностей, математичної статистики й фільтрації.

Випадкові похибки навігаційних вимірювань можуть набувати безліч різних значень. Тому їх варто розглядати не тільки як перервні (дискретні), але і як безперервні випадкові величини, що характеризуються властивими їм законами розподілу, які забезпечують функціональний зв'язок між можливими значеннями випадкової величини і відповідними їм імовірностями і є функціями розподілу або інтегральним законом розподілу.

Зазвичай похибка  $\varepsilon$ , так само як і вимірюваний параметр  $p$ , є функцією часу, тобто

$$\varepsilon(t) = p(t) - \hat{p}(t),$$

де

$p(t)$  – істинне значення вимірюваного параметра;

$\hat{p}(t)$  – його оцінка, отримана в результаті вимірювання.

Вичерпний статистичний опис  $\varepsilon(t)$  утримується в багатовимірній щільності ймовірності або у функціоналі щільності ймовірності.

Однак на практиці частіше використовують лише середнє (математичне сподівання) і дисперсію

$$m_\varepsilon = \overline{\varepsilon(t)};$$

$$D_\varepsilon(t) = \overline{[\varepsilon(t) - \overline{\varepsilon(t)}]^2}.$$

Коли похибка  $\varepsilon(t)$  відповідає ергодичному випадковому процесу, статичне усереднення при обчисленні показників точності  $m_\varepsilon$  і  $D_\varepsilon(t) = \overline{\varepsilon(t)^2}$  ( $\overline{\varepsilon}$  – центрована випадкова величина) замінюють усередненням за часом.

Відомо [1], що за досить великого значення  $T$  математичне сподівання  $m(t)$  можна приблизно розрахувати за формулою

$$m_\varepsilon(t) = 1/T \int_0^T \varepsilon(t) dt.$$

На основі наближеного виразу для кореляційної функції (КФ)

$$K_\varepsilon(\tau) = 1/(T - \tau) \int_0^{T-\tau} \varepsilon(t) \varepsilon(t + \tau) dt$$

визначається спектральна щільність  $S_\varepsilon(\omega)$  похибки. Математичне сподівання похибки  $m_\varepsilon$ , назване зсувом, дає систематичну складову похибки, яку раціональним проектуванням й експлуатацією системи можна зробити багато менше випадкової складової, тобто  $m_\varepsilon < \sqrt{D_\varepsilon}$ .

Для характеристики точності вимірника використовують середньоквадратичне відхилення (СКВ)  $\sigma_\varepsilon$ :

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\overline{\varepsilon(t)^2}}.$$

Ці показники визначають точність системи лише в середньому й не дозволяють передбачити, як часто можливі похибки, що перевищують їхні усереднені значення. На практиці зазвичай інтегралі замінюють кінцевими сумами

$$m_x = 1/n \sum_{i=1}^n \varepsilon(t_i).$$

Аналогічно можна обчислити КФ для значень  $\tau$ , що дорівнюють нулю,  $\Delta t$ ,  $2\Delta t$ , ... .

Величина  $\tau$  набуває значення

$$\tau = m\Delta t = mT/n.$$

Інтеграл КФ замінюємо сумою

$$K_\varepsilon\left(\frac{mT}{n}\right) = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^{n-m} \varepsilon(t_i) \varepsilon(t_{i+m}).$$

Розрахунок КФ за цією формулою виконуємо для  $m = 0, 1, 2, \dots$  аж до таких значень  $m$ , за яких КФ стає фактично рівною нулю або коливається близько нуля. Загальний хід функції  $K_\varepsilon(\tau)$  відтворюється по окремих точках.

Для того, щоб математичне сподівання  $m_\varepsilon$  і кореляційну функцію  $K_\varepsilon(\tau)$  визначити достатньо надійно, потрібно, щоб кількість точок  $n$  була досить великою (декілька десятків, а в деяких випадках навіть сотень).

Довжину елементарної ділянки  $\Delta t$  вибирають з урахуванням характеру зміни випадкової функції. Якщо випадкова функція змінюється порівняно плавно, ділянку  $\Delta t$  можна вибирати більшою, ніж коли функція здійснює різкі і часті коливання. Чим більш високочастотний склад мають коливання, що утворюють випадкову функцію, тим частіше потрібно розміщувати опорні точки при обробці.

Орієнтовно можна рекомендувати вибирати елементарну ділянку  $\Delta t$  так, щоб на повний період найбільш високочастотної гармоніки в складі випадкової функції припадало 5–10 опорних точок.

За величиною або значенням похибки вимірювань точність системи залежить від імовірності того, що похибка не перевищить допустимого значення

$$\varepsilon_{\text{доп}} P(|\varepsilon| \leq \varepsilon_{\text{доп}}).$$

У зв'язку з більшою кількістю різноманітних причин, що впливають на вимірювання РНП, можна вважати, що похибка вимірювань, відповідно до центральної граничної теореми російського математика А.М. Ляпунова (1857–1918), має нормальний розподіл й імовірність  $P(|\varepsilon| \leq \varepsilon_{\text{доп}})$  повністю задається значеннями  $\bar{\varepsilon}$  й  $\sigma_{\varepsilon}$ .

Середньоквадратичне відхилення задається ймовірністю того, що похибка незміщених вимірів не перевищить  $\sigma_{\varepsilon}$  і дорівнює 0,683.

Максимальна похибка дорівнює подвоєному СКВ  $- 2\sigma_{\varepsilon}$  і відповідної ймовірності

$$P(|\varepsilon| \leq 2\sigma_{\varepsilon}) = 0,95.$$

Гранична похибка, яка дорівнює потроєному СКВ  $- 3\sigma_{\varepsilon}$ , за ймовірності

$$P(|\varepsilon| \leq 3\sigma_{\varepsilon}) = 0,997.$$

В останньому випадку тільки 0,3 % вимірювань мають похибку, що перевищує  $3\sigma_{\varepsilon}$ .

*Прогріх* – це похибка, що дорівнює ймовірності більш 0,97.

Залежно від часу, розрізняють стаціонарні (статичні) і динамічні (нестационарні) похибки.

Стаціонарні похибки не залежать від часу і виникають за постійних режимів польоту.

Динамічні похибки з'являються в разі зміни динаміки польоту, еволюції повітряного корабля, зміни режимів польоту: повороту, розвороту, посадки та ін.

Залежно від частоти появи похибки можуть бути частими (майже безперервними) і рідкісними.

Часті похибки постійно виникають і безперервно супроводжують вимірювання.

Рідкісні похибки, які з'являються час від часу, спричиняються частковою відмовою чи відмовою системи, порушенням доступності у роботі, зіткненням літаків у повітрі або із землею та ін.

Функціонально пов'язані похибки залежать від багатьох факторів, які являють собою систему змінних (наприклад, сума, різниця похибок

$$z = x + y, z = x - y,$$

багаторівнева обробка результатів вимірювання та ін.), що зв'язані мультиплікативно або адитивно, і підрозділяються на мультиплікативні та адитивні.

*Мультиплікативні* (лат. multi – багато) похибки, – що означають множинність, багаторазовість впливу.

*Адитивні* (лат. additivus – додатковий) похибки, що отримані шляхом додавання.

Аналітично (фізично) похибки вимірювань характеризують або абсолютною, або відносною величиною.

*Абсолютною* похибкою вимірювань  $\Delta\alpha$  називають різницю між виміряним значенням деякої величини  $\alpha$  і її істинним значенням  $A$ :

$$\Delta\alpha = \alpha - A.$$

Під вимірюваною величиною розуміють ту чи іншу навігаційну координату, яку визначають за допомогою навігаційної апаратури (пеленг, відстань, шляхову швидкість, висоту польоту та ін.).

*Відносною* похибкою вимірювань  $\eta$  називають відношення абсолютної похибки до істинного значення виміряної величини

$$\eta = \frac{\Delta\alpha}{A}.$$

Абсолютну похибку можна подати функцією багатьох змінних у звичайному випадку у вигляді суми  $\Delta A_{\text{абс}} = \Delta A_{\text{мет}} + \Delta A_{\text{ін}} + \Delta A_{\text{об}} + \Delta A_{\text{суб}} + \Delta A_{\text{вип}} + \Delta A_{\text{дин}} + \Delta A_{\text{ф}} + \dots$ ,

враховуючи всі можливі джерела похибок для ідентифікації і визначення значущості (ваги) оцінки кожної з них у сумарній абсолютній похибці.

## Висновки

Таким чином, розглядаючи численні джерела похибок НП і НС і великої кількості факторів, що їх зумовлюють, для аналізу, математичного описування апріорних даних і оцінки точності навігаційних вимірювань доцільно розглядати окремо похибки за властивостями й ознаками.

## Література

1. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Высш. шк., 1999. – 576 с.
2. *Ярлыков М.С.* Статистическая теория радионавигации / М.С. Ярлыков. – М.: Радио и связь, 1985. – 344 с.
3. *Радиотехнические системы:* учеб. для вузов / под ред. Ю.М. Козаринова. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.