

УДК 681.518.3

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-6

Денисюк В. Ю.

Луцький національний технічний університет

МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ БЛОКІВ ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ АНАЛІТИКО-ЙМОВІРНІСНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ

У статті представлено методологію оцінювання точності блоків інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) на основі аналітико-ймовірнісного прогнозування. Розглянуто процеси, що відбуваються у функціональних блоках аналого-цифрових перетворювачів, та встановлено, що вони мають стохастичний характер і можуть призводити до метрологічних відмов у часі. Для мінімізації таких явищ запропоновано використання феноменологічних моделей, які дозволяють описати зміни метрологічних характеристик і ресурсного стану системи. На основі аналізу сучасних підходів виокремлено три основні методи прогнозування – аналітичний, статистичний і ймовірнісний – та обґрунтовано доцільність їх комбінування для підвищення достовірності прогнозів. Запропоновано математичний апарат аналітико-ймовірнісного прогнозування, що враховує зміну параметрів розподілу випадкових процесів у часі та дозволяє визначати ймовірність збереження роботоздатності вимірювальних блоків. Розроблена методологія сприяє підвищенню точності оцінювання стану ІВС, оптимізації процесів технічного контролю та забезпеченню метрологічної надійності програмно-визначуваних вимірювальних платформ.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система, аналітико-ймовірнісне прогнозування, феноменологічна модель, точність, метрологічна надійність, стохастичний процес.

Постановка проблеми. Сучасні інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) є складними багатокомпонентними структурами, у яких точність та стабільність метрологічних характеристик визначають ефективність вимірювальних процесів і достовірність отриманих результатів. У функціональних блоках таких систем, зокрема в аналого-цифрових перетворювачах, відбуваються процеси, що мають стохастичний і необоротний характер. Це призводить до поступової деградації параметрів та можливих метрологічних відмов, які складно прогнозувати традиційними методами. Наявні підходи до оцінювання точності, засновані переважно на статичних або детермінованих моделях, не дозволяють адекватно врахувати часову мінливість процесів та вплив випадкових факторів. Тому виникає необхідність у розробленні методології оцінювання точності блоків ІВС, яка базується на поєднанні аналітичних і ймовірнісних методів прогнозування, що дасть змогу підвищити достовірність оцінки технічного стану та метрологічної надійності системи [1, 2].

Проблема дослідження. У процесі аналізу сучасних ІВС встановлено низку наукових і прикладних проблем, які ускладнюють забезпечення високої точності та стабільності їх функціонування. Однією з основних проблем є відсутність універсального підходу до опису стохастичних процесів, що визначають зміну метрологічних характеристик у часі. Процеси, які відбуваються у функціональних блоках ІВС, особливо в аналого-цифрових перетворювачах, мають випадковий і необоротний характер, що зумовлює складність їх математичного моделювання та прогнозування [2, 3].

Існуючі методи оцінювання точності здебільшого базуються на детермінованих або статичних моделях, які не враховують динамічну природу зміни параметрів та вплив випадкових факторів зовнішнього і внутрішнього середовища. Це призводить до зниження достовірності результатів оцінки та неможливості оперативного прогнозування метрологічних відмов у системі [4].

Другою важливою проблемою є необхідність створення адекватних феноменологічних моделей, які б дозволяли не лише описувати фізичну природу процесів у вимірювальних блоках, але й враховувати стохастичні закономірності їх розвитку. Такі моделі мають бути здатними відображати реальні зміни стану ІВС у часі, включно з деградаційними процесами та флуктуаціями параметрів, що впливають на точність вимірювань [5].

Ще однією проблемою є відсутність розвинутого математичного апарату аналітико-ймовірнісного прогнозування, який би дозволяв кількісно оцінювати ймовірність збереження роботоздатності системи, прогнозувати відхилення метрологічних параметрів та визначати моменти настання граничних станів. Без такого підходу неможливо забезпечити науково обґрунтоване прогнозування точності та надійності функціонування ІВС у реальному часі [6, 7].

Крім того, існує проблема інтеграції прогнозних методів у структуру програмно-визначуваних вимірювальних платформ, які сьогодні широко використовуються у складних вимірювальних комплексах. Необхідно розробити підходи, що дозволять реалізувати аналітико-ймовірнісні алгоритми оцінювання точності безпосередньо в апаратно-програмному середовищі вимірювальної системи, забезпечивши при цьому оптимальне співвідношення між швидкістю, обчислювальною складністю та метрологічною достовірністю результатів [8, 9].

Таким чином, розв'язання зазначених проблем вимагає розроблення єдиної методології оцінювання точності блоків ІВС на основі аналітико-ймовірнісного прогнозування, яка б поєднувала теоретичні засади математичної статистики, аналізу випадкових процесів і практичні методи прогнозування технічного стану вимірювальних систем. Це створить підґрунтя для підвищення метрологічної надійності, стабільності та ефективності сучасних інформаційно-вимірювальних платформ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оцінювання точності та надійності ІВС є однією з ключових проблем сучасної метрології та технічної діагностики. У наукових дослідженнях останніх років спостерігається тенденція до інтеграції класичних метрологічних методів із сучасними аналітико-ймовірнісними та програмно-аналітичними підходами. Це обумовлено розвитком програмно-визначуваних платформ, інтелектуальних сенсорних систем і технологій цифрових двійників, які вимагають нових засобів прогнозування метрологічних характеристик у реальному часі [1, 2].

Сучасні наукові праці зосереджені на розробленні стохастичних і феноменологічних моделей, які відображають часові зміни метрологічних параметрів вимірювальних блоків. Для опису процесів деградації та дрейфу параметрів активно застосовують марковські процеси, моделі випадкових функцій, стохастичні диференціальні рівняння та метод Монте-Карло. Такі підходи дозволяють не лише враховувати випадковий характер змін параметрів, але й визначати ймовірність виходу системи за допустимі межі точності протягом прогнозованого часу експлуатації [4, 5].

Важливе місце в сучасній метрології займають методи прогностичної аналітики (Prognostics and Health Management, PHM) та прогнозування залишкового ресурсу (Remaining Useful Life, RUL). Байєсівські алгоритми, фільтри Калмана, розширені та частинкові фільтри забезпечують можливість рекурсивної оцінки стану системи та прогнозування зміни метрологічних параметрів у динаміці. Окрім того, методи машинного навчання – регресійні моделі, ансамблеві алгоритми та глибокі нейронні мережі – активно застосовуються для оцінювання метрологічної стабільності й діагностики відмов на основі статистичних ознак і часових рядів [5, 6].

Досить поширеним напрямом є використання комбінованих моделей, у яких аналітичні фізичні описи процесів деградації поєднуються з ймовірнісними або емпіричними методами прогнозування. Такий підхід дає змогу підвищити достовірність результатів і забезпечити адаптацію алгоритмів оцінювання точності до реальних умов експлуатації системи. Феноменологічні моделі, у свою чергу, дозволяють описати взаємозв'язок між структурними змінами елементів ІВС і відхиленнями метрологічних параметрів, враховуючи дію зовнішніх факторів, таких як температура, вібрації, електромагнітні завади тощо [8, 9].

Окрему увагу дослідники приділяють статистичним методам аналізу даних та моделюванням методом Монте-Карло, які дають змогу оцінювати густини розподілу похибок і невизначеності вимірювань. Це сприяє побудові прогнозних моделей точності, де кожен метрологічний параметр розглядається як випадкова величина зі змінними статистичними характеристиками – математичним сподіванням і дисперсією, що змінюються у часі [10, 11, 12].

Розвиток концепції програмно-визначуваних вимірювальних систем сприяв появі нових підходів до онлайн-калібровки та самодіагностики. Сучасні дослідження зосереджуються на інтеграції алгоритмів прогнозного оцінювання точності безпосередньо у програмні модулі вимірювальних платформ. Використання технології цифрових двійників (Digital Twin) дає змогу створювати віртуальні копії систем для імітації їх метрологічної поведінки та оптимізації режимів роботи в умовах змінних навантажень [13].

Попри значні досягнення, у науковій літературі залишаються невирішеними низка важливих питань. Зокрема, потребують подальшого розвитку методи кількісної оцінки невизначеності прогнозування метрологічних характеристик, а також стандартизовані методики валідації аналітико-імовірнісних моделей точності. Недостатньо розробленими є алгоритми, орієнтовані на реалізацію у ресурсно-обмежених середовищах програмно-визначуваних систем, а також підходи до інтеграції фізично обґрунтованих моделей із методами машинного навчання [6, 10, 13].

Таким чином, аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про актуальність подальшої розробки методології аналітико-імовірнісного прогнозування точності блоків інформаційно-вимірювальних систем. Це дозволить не лише підвищити достовірність оцінювання метрологічних характеристик, але й створити основу для побудови інтелектуальних систем контролю, здатних до самодіагностики, адаптації та прогнозного управління точністю у процесі експлуатації.

Мета роботи є розроблення та обґрунтування методології оцінювання точності блоків інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) на основі аналітико-імовірнісного прогнозування, що забезпечує підвищення достовірності оцінки технічного стану та метрологічних характеристик функціональних елементів системи. Для досягнення цієї мети передбачено дослідження феноменологічних моделей зміни метрологічних характеристик у часі, визначення закономірностей стохастичних процесів, які відображають деградаційні зміни параметрів ІВС, а також формування математичного апарату, який поєднує аналітичні та імовірнісні методи прогнозування для оцінювання точності та прогнозу метрологічної надійності програмно-визначуваних вимірювальних платформ.

Викладення основного матеріалу. У сучасних дослідженнях встановлено, що процеси, які відбуваються у функціональних блоках аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), що є складовими ІВС, не завжди мають оборотний характер. Як наслідок, динаміка таких процесів характеризується значними часовими інтервалами, що ускладнює оперативне визначення поточного стану та змін метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки. Для мінімізації впливу подібних явищ доцільним є застосування феноменологічних моделей, які забезпечують можливість побудови характеристик стану засобів вимірювань та проведення їх оцінювання на основі положень теорії випадкових процесів. Такі моделі дозволяють описати не лише детерміновані зміни параметрів, але й стохастичні коливання, що відображають реальні процеси функціонування систем у часі.

Під час визначення стану ІВС широко використовуються різні типи феноменологічних моделей, орієнтовані на опис процесів у режимі реального часу. У ряді наукових праць [1, 2, 4-7] показано, що зміна стану вимірювальних засобів у часі може бути подана у вигляді ймовірнісного або стохастичного процесу. При цьому характеристики такого процесу – математичне сподівання, дисперсія та кореляційні функції – визначають еволюцію метрологічних параметрів у часі та дають можливість оцінити ймовірність збереження роботоздатності системи. Вигляд типового стохастичного процесу, що описує зміну стану засобів вимірювань у часі, наведено на рисунку 1.

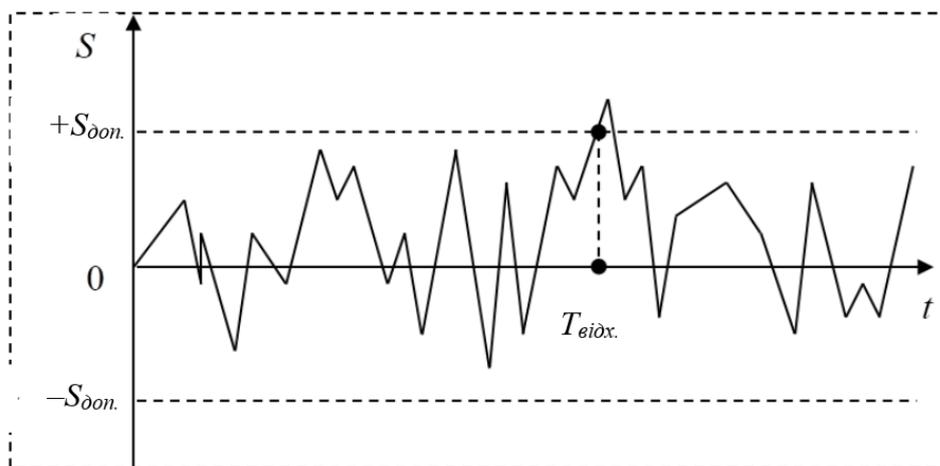
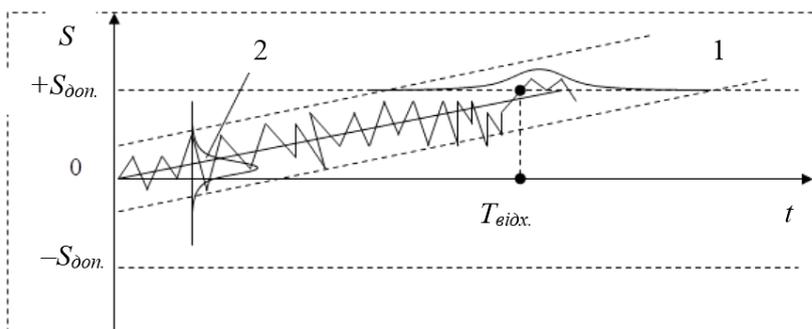


Рисунок 1 – Стохастичний процес зміни у часі стану метрологічних характеристик

Під час розв'язання задачі щодо визначення залежності між залежними та незалежними змінними ресурсний стан програмно-визначуваної платформи, зокрема її функціонального блока – АЦП, зберігається доти, доки миттєве значення стану $S(t)$ не виходить за межі встановлених граничних значень метрологічних характеристик. Іншими словами, система перебуває у роботоздатному стані, поки $S(t) \in [-S_{\text{дон}}, S_{\text{дон}}]$.

У випадку, коли випадковий процес, що описує зміну стану АЦП у часі, перетинає одну з меж інтервалу при $t = t_{\text{відх}}$, цей момент фіксується як метрологічна відмова (рис. 1). Такий підхід дозволяє інтерпретувати процес деградації або відхилення метрологічних параметрів як стохастичний процес із ймовірнісною оцінкою моменту втрати роботоздатності.

Однією із типів феноменологічних моделей, придатних для опису зміни ресурсного стану вимірювальних систем у часі, є модель, наведена на рисунку 2. Вона може бути застосована не лише до окремих функціональних елементів програмно-визначуваних платформ, таких як АЦП, але й для опису загального стану всієї вимірювальної платформи.



Рисунки 2 – Феноменологічна модель зміни у часі метрологічних характеристик

Такі моделі дозволяють врахувати часову динаміку змін параметрів, вплив випадкових збурень, а також ймовірнісний характер процесів старіння та деградації елементів. Використання подібного підходу створює підґрунтя для побудови методів аналітико-ймовірнісного прогнозування точності та надійності блоків ІВС у режимі реального часу.

Клас завдань, пов'язаний із забезпеченням стабільності метрологічних характеристик програмно-визначуваних вимірювальних платформ у процесах їх розробки та експлуатації, може бути розглянутий як прогнозована величина, що описує ресурсну характеристику системи та її поточний ресурсний стан. Визначення такого стану є ключовим елементом при оцінюванні точності функціональних блоків, зокрема АЦП, та забезпеченні їх метрологічної надійності.

Зазначений клас завдань вирішується за допомогою комплексу методів, заснованих на прогнозуванні характеристик платформи, що дозволяють передбачати зміни параметрів, які виникають унаслідок вимірювальних процедур, як у вигляді результатів спостереження фізичних процесів, так і у формі аналітичних залежностей.

У наукових джерелах, присвячених питанням прогнозування технічного стану та ресурсу елементів вимірювальних систем [1-7], наведено різні методи та підходи, які систематизовано відповідно до їх принципів і цілей. Одним із ефективних напрямів є методологія, описана у [13], яка ґрунтується на диференціації методів прогнозування за певними ознаками. Згідно з цим підходом, виділяють такі основні групи методів:

- визначення параметрів, що підлягають дослідженню впродовж певного інтервалу часу;
- зіставлення отриманих результатів прогнозування із заздалегідь визначеними класами за критеріями надійності;
- представлення результатів прогнозування у вигляді значень ресурсних станів із урахуванням граничних обмежень.

Узагальнюючи викладене, можна визначити три основні групи методів, що використовуються для прогнозування стану ресурсів програмно-визначуваних вимірювальних платформ:

- аналітичне прогнозування, що базується на математичному описі процесів і побудові функціональних залежностей;
- статистична класифікація, яка враховує розподіл параметрів за класами станів;
- ймовірнісне прогнозування, спрямоване на оцінювання ймовірності збереження роботоздатності системи в часі.

Оцінювання можливостей кожного з цих методів з позицій їх застосування для вирішення завдань прогнозування стану метрологічних характеристик програмно-визначуваних вимірювальних платформ є важливим етапом формування узагальненої методології аналітико-ймовірнісного прогнозування точності блоків ІВС.

Метод прогнозування складається з наступного підходу. Є якийсь процес, що визначає стан об'єкта у вигляді об'єктивної функції, являє собою n -вимірний гаусовий розподіл, який можна записати в наступному вигляді: $\vec{\xi}(t) = \{\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_n(t)\}$, який можна спостерігати як у вигляді дискрети або безперервно, у визначені тимчасові інтервали $t_0 = 0$ до $t_q \in T_1$, коли вона може набувати наступних значень $\vec{\xi}(t_0), \vec{\xi}(t_1), \dots, \vec{\xi}(t_q)$ у задані моменти часу t_0, t_1, \dots, t_q . За відомими значеннями $\vec{\xi}(t_j)$, $j = 0, 1, \dots, q$ визначимо параметри функції $\vec{\eta}(t_{q+1}), \vec{\eta}(t_{q+r}), \dots, \vec{\eta}(t_{q+m})$ у задані інтервали часу $t_{q+1}, t_{q+r}, \dots, t_{q+m} \in T_2$, де T_2 – деяка область прогнозованих моментів часу. Вирішення завдання буде зводитися до знаходження деякого оператора W , який встановлює зв'язок між контролюючими параметрами та прогнозованими:

$$\vec{\xi}(t_{q+r}) = W \left\{ \vec{\xi}(t_j) \right\}, \quad (1)$$

де $r = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, q$.

Методи аналітичного прогнозування використовуються для прогнозування як одновимірних, так і багатовимірних детермінованих процесів. У першому випадку завдання прогнозування полягає у побудові інтерполяційного виразу, що визначає залежність досліджуваного процесу від часу управління, та в екстраполяції отриманого виразу у області прогнозування. У другому варіанті набір параметрів $\{\xi_1, \dots, \xi_l\}$ характеризуватиме стан об'єкта, який може бути представлений у вигляді вектора в l -мірному просторі. Положення цього вектора визначить певний рівень роботоздатності об'єкта. Таким чином, виникає проблема, що полягає в попередньому періодичному контролі параметрів, $\xi_1(t), \dots, \xi_l(t)$, визначення у моменти

контролю значень функції стану $S \left[\vec{\xi}(t) \right] = S \left[\xi_1(t), \dots, \xi_l(t) \right]$ та розрахунку за відомими

значеннями функції стану $S \left[\vec{\xi}(t_d) \right]$, $t_d \in T_1$, $d = 0, 1, \dots, q$ її значень у області прогнозування

$S \left[\vec{\xi}(t_{q+e}) \right]$, $t_{q+e} \in T_2$, $e = 1, 2, \dots, m$.

Для розгляду складних процесів, що мають випадковий характер, можливе застосування наступного методу, особливістю якого є використання узагальненого показника, який характеризується якоюсь багатовимірною компонентою, яку у свою чергу можна описати використовуючи подання одновимірних компонентів, які залежать від параметрів, що визначаються програмно-визначувальними засобами вимірювань. Для складних випадкових процесів можливе застосування методу так званого узагальненого параметра, суть якого полягає в тому, що якийсь процес, який може бути охарактеризований багатовимірними компонентними складовими можна описати якоюсь функцією, що представляє одновимірний масив, який залежить від реєстрованих параметрів вимірювального засобу. Ця інтегральна функція являє собою деякий набір аналітичних виразів, які були заздалегідь визначені. Таким чином, завдання прогнозування зводиться саме до прогнозування даної узагальненої чи одновимірної моделі.

Застосування цього методу не дозволяє використовувати його в повному обсязі, оскільки він має ряд обмежень, пов'язаних із застосуванням його тільки для найпростіших об'єктів.

Для вирішення завдань прогнозування у системах, побудованих на основі програмно-визначуваних платформ, необхідно використовувати модернізовані феноменологічні моделі, які не лише здійснюють відображення вимірювального засобу в процес вимірювання, а також здійснюють початкову або попередню фільтрацію, які ґрунтуються на методах математичної статистики. У загальному випадку компонента феноменологічної моделі, що забезпечує фільтрацію за заданими алгоритмами, це, як правило, деяка передавальна система або

передавальна структура, яка виконує відповідно до критеріїв оптимальності функцію фільтрації сигналів у перешкоді. Один із варіантів реалізації такої фільтрації це використання величини середньоквадратичної похибки, представленої у вигляді деякого рекурсивного запису, який придатний при реалізації цього алгоритму інтегрованого в структуру моделі.

Ці розглянуті методи прогнозування можна використовувати тільки для тих процесів, результат яких може бути визначено певними значеннями вхідних та вихідних змінних та станом системи.

Завдання прогнозування з наведеними вище підходами можна сформулювати наступним чином. Нехай у момент t_0 або в обмежений початковий період часу отримано значення параметрів контрольованого процесу $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_l$, що характеризують функцію $S\left(\vec{\xi}\right)$. Необхідно

за сукупністю параметрів – координат векторної функції $S\left(\vec{\xi}\right)$ ухвалити рішення про належність досліджуваного процесу до того чи іншого класу Z^w , $w = 1, 2, \dots, k$, де Z^w можуть бути параметричними або тимчасовими. Набір та розмір класів визначаються специфічними характеристиками діагностичних об'єктів Вони об'єднують об'єкти, що характеризуються ідентичністю індикаторів стану, набором властивостей тощо.

Класи Z^w – це свого роду стандарти чи еталони, які часто виражаються у вигляді еталонних «образів». Завдання полягає у порівнянні «образу» вивченого об'єкта з вихідним (еталонним), а потім до прийняття рішення. Проблеми такого роду вирішуються або методами статистичної класифікації, чи методами теорії розпізнавання «образів».

Застосування цього методу під час вирішення завдань пов'язаних з прогнозуванням полягає у виборі системних характеристик з наступною їх класифікацією. Розглянуті характеристики описаної групи можуть бути застосовані тільки для тих завдань, які мають індивідуальний характер при визначенні стану об'єкта та її ресурсу.

Більшість складних об'єктів чи складних систем, зокрема програмно-визначуваної або програмно-конфігурованої платформи та засобів вимірювань, побудованих на цих платформах, мають у своїй структурі множини різних протікаючих складних процесів, які при описі або ідентифікації являють собою певний набір випадкових процесів та для їх вирішення необхідно використовувати ті методи, які можуть забезпечити ймовірнісне прогнозування цих процесів.

Розв'язання такого завдання можна подати у такому вигляді. Нехай отримано значення параметрів $\xi_1(t), \dots, \xi_l(t)$ у моменти часу t_g , $g = 0, 1, \dots, q$ і в кожному тимчасовому перерізі стан об'єкта повністю характеризується функцією розподілу $Q_g\left(\vec{\xi}\right)$. За відомими значеннями

$\vec{\xi}(t_g)$, $Q_g\left(\vec{\xi}\right)$ необхідно обчислити ймовірність збереження роботоздатності об'єктом:

$$Q_{q+c}\left(\vec{\xi}^*\right) = K \left\{ \vec{\xi}(t_{q+c}) < \vec{\xi}^* \right\} = \int_{-\infty}^{\xi^*} p_{t_{q+c}}\left(\vec{\xi}\right) d\vec{\xi}, \quad (2)$$

де $\vec{\xi}^*$ – допустиме значення функції $\xi(t)$;

$p_{t_{q+c}}$ – густина розподілу значень $\xi(t)$ для значень часу t_{q+c} , $c = 1, 2, \dots, m$ з математичним очікуванням $m_{\vec{\xi}}$ та дисперсією $\sigma_{\vec{\xi}}^2$.

Проблема ймовірнісного прогнозування одновимірних процесів становить найбільший інтерес. Знаючи зміну густини розподілу $p(\xi)$ або пов'язані з ним статистичні характеристики дослідженого параметра $\xi(t)$ за часом, можна визначити ймовірність виходу (невиходу) за допустимі межі у майбутні моменти часу.

Методи прогнозування випадкових процесів із нормальною функцією розподілу добре розроблені для практичного використання. Це пов'язано з тим, що процеси поступової зміни, деградації параметрів більшості технічних об'єктів характеризуються нормальною густиною розподілу випадкових функцій у кожному перерізі часу.

Нормальна густина розподілу визначається за формулою (3):

$$p_{t_g}(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\xi(t_g)} \cdot \exp\left\{-\frac{[\xi - m_\xi(t_g)]^2}{2\sigma_\xi^2(t_g)}\right\} \quad (3)$$

Вона описана математичним очікуванням досліджуваної випадкової змінної $m_\xi(t_g)$ та середньоквадратичним відхиленням $\sigma_\xi(t_g)$ у кожному відрізьку часу t_i , які через дрейф часу параметра також є функціями часу, що призводить до зміни густини розподілу в часі $p[\xi(t)]$. Далі, за відомою густиною розподілу в різні моменти часу ймовірність виходу (або не виходу) параметра, що вивчається для встановлених меж може бути визначено.

Статистичні характеристики m_ξ та σ_ξ обчислюються на основі даних за окремими реалізаціями досліджуваного процесу в різних тимчасових перерізах. Вивчення поведінки у часі параметрів функції розподілу m_ξ та σ_ξ дозволяє апроксимувати їх різними залежностями, такими як лінійна, експоненційна, логарифмічна, поліноміальні, і, зрештою, здійснити екстраполяцію їх на область прогнозування. Таким чином, прогнозування ймовірнісних характеристик досліджуваного параметра ξ полягає у прогнозуванні аналітичними методами характеристик m_ξ та σ_ξ на область прогнозування T_2 та обчисленні за знайденими $m_\xi(t_{q+c})$ та $\sigma_\xi(t_{q+c})$ ймовірностей виходу (невиходу) досліджуваного процесу за допуск:

$$K\{\xi(t_{q+c}) < \xi^*\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\xi(t_{q+c})} \int_{-\infty}^{\xi^*} \exp\left\{-\frac{[\xi - m_\xi(t_{q+c})]^2}{2\sigma_\xi^2(t_{q+c})}\right\} d\xi. \quad (4)$$

Метод статистичного моделювання дозволяє вирішувати дуже складні завдання і має суттєві переваги перед аналітичними методами [13]. Він дозволяє повніше врахувати особливості функціонування складної системи, використовувати будь-які закони розподілу випадкових величин, має наочне ймовірнісне трактування, просту обчислювальну схему, можливість значно збільшити точність методу за допомогою збільшення кількості моделюваних реалізацій випадкового процесу і має широке поширення під час вирішення різних прикладних завдань. Таким чином, ймовірнісне прогнозування полягає у визначенні ймовірнісних характеристик апостеріорних випадкових процесів зміни випадкових параметрів, тобто процесів, що є продовженнями відрізків реалізацій, отриманих шляхом індивідуального контролю, моделювання цих процесів. Аналізуючи розглянуті групи методів із позицій використання їх при вирішенні задачі прогнозування стану метрологічних характеристик ІВС, можна зробити висновок про можливість застосування для розглянутої задачі методів ймовірнісного прогнозування з елементами аналітичного прогнозування, тобто застосування математичного апарату аналітико-ймовірнісного прогнозування технічного стану різних об'єктів.

Висновки. Проведений аналіз показав, що процеси у функціональних блоках ІВС, зокрема АЦП, мають стохастичний характер, що потребує застосування методів ймовірнісного аналізу для оцінювання точності та прогнозування метрологічних характеристик. Запропоновано використання феноменологічних моделей, які дозволяють описати зміну стану вимірювальних засобів у часі та враховують як аналітичні, так і статистичні залежності між параметрами. Обґрунтовано доцільність застосування аналітико-ймовірнісного підходу до прогнозування стану ІВС, який поєднує точність математичного аналізу з гнучкістю статистичного моделювання стохастичних процесів.

Розроблена методологія дає можливість підвищити достовірність оцінювання точності блоків ІВС, скоротити ризики метрологічних відмов та забезпечити стабільність роботи програмно-визначуваних вимірювальних платформ у реальному часі. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні та експлуатації сучасних ІВС для побудови систем автоматичного контролю точності та прогнозування метрологічної надійності їх компонентів.

Інформаційні джерела

1. Защепкіна Н. М., Шульга О. В., Наконечний О. А., Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем: навч. посіб. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 176 с.

2. Яцук В. О., Бубела Т. З., Микийчук М. М., Походило Є. В. Забезпечення метрологічної надійності в розпорощених вимірювальних системах. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2018. Т. 79, Вип. 3. С. 71-82.

3. Денисюк В. Ю., Проблеми забезпечення точності та метрологічної надійності інформаційно-вимірювальних систем. *Приладобудування: стан і перспективи*: зб. матер. XXIII Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 14-15 трав. 2024 р.). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. С. 345-348.
4. Григоренко І. В., Кондрашов С. І., Григоренко С. М. Інформаційно-вимірювальні технології та системи: навч. посіб. Харків: «Факт», 2023. 254 с.
5. Дубовий В. М. Кветний Р. Н., Михальов О. І. Моделювання та оптимізація систем: підручник. Вінниця: ПП «ТД Едельвейс», 2017. 804 с.
6. Кондрашов С. І., Гусельников В. К., Медведєва Л. О. Інформаційні технології проектування вимірювальних перетворювачів: навч. посіб. Харків: НТУ «ХП», 2008. 288 с.
7. Денисюк В. Ю. Оцінка метрологічної надійності аналого-цифрового блоку перетворювача інформаційно-вимірювальних систем на етапі його проектування. *«Приладобудування: стан і перспективи»*: зб. матер. XXIII Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 13-14 трав. 2025 р.). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025, С. 419-421.
8. Григоренко І. В., Кондрашов С. І., Григоренко С. М. Вступ в теорію систем. Харків: «Факт», 2021. 202 с.
9. Oba Z. M., Kabiru L. Fabrication of microcontroller based speed detection and measurement system. *Journal of Engineering and Earth Sciences* 15(1), 2022, P. 140-150.
10. Кондрашов С. І., Чинков В. М., Харченко О. Л. Невизначеність вимірювання: навч. посіб. Харків: НТУ «ХП», 2010. 80 с.
11. Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Новосад Б. І. Метрологічне забезпечення точності приладів активного контролю в процесі обробки. *Збірник статей «Перспективні технології та прилади»*. 2020. Вип. 16. С. 38-47. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16>
12. Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Шибковський І. А. Метрологічне забезпечення вимірювання механічних та трибологічних властивостей матеріалів на субмікронному і нанометровому діапазонах лінійних розмірів. *Збірник статей «Перспективні технології та прилади»*. 2020. Вип. 17. С. 33-41. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-17-5>
13. Григоренко І. В. Багатопараметричний контроль якості функціонування інформаційно-вимірювальних систем різного призначення з урахуванням факторних впливів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.13. Харків, 2024. 390 с.

Denysiuk V.

Lutsk National Technical University

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE ACCURACY OF INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS BLOCKS BASED ON ANALYTICAL-PROBABILISTIC FORECASTING

The article presents a methodology for assessing the accuracy of blocks of information and measuring systems (IMS) based on analytical and probabilistic forecasting. The processes occurring in the functional blocks of analog-to-digital converters are considered, and it is established that they are stochastic in nature and can lead to metrological failures over time. To minimize such phenomena, the use of phenomenological models is proposed, which allow describing changes in metrological characteristics and the resource state of the system. Based on the analysis of modern approaches, three main forecasting methods are distinguished - analytical, statistical and probabilistic - and the expediency of combining them to increase the reliability of forecasts is substantiated. A mathematical apparatus for analytical and probabilistic forecasting is proposed, which takes into account the change in the parameters of the distribution of random processes over time and allows determining the probability of maintaining the operability of measuring blocks. The developed methodology contributes to increasing the accuracy of assessing the state of the IMS, optimizing technical control processes and ensuring metrological reliability of software-defined measuring platforms.

Keywords: information and measurement system, analytical and probabilistic forecasting, phenomenological model, accuracy, metrological reliability, stochastic process.

Дата першого надходження
статті до видання
09.10.2025 р

Дата прийняття статті
до друку
25.09.2025 р.

Дата
оприлюднення
23.12.2025 р.