КІБЕРНЕТИКА та КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Описано запатентований в Україні метод вимірювання часу напрацювання смарт-систем на метрологічну відмову (метод динамічного прогнозування) на основі синтезованої імовірнісно-фізичної моделі метрологічних відмов смарт-систем, описаної багатопараметричною функцією розподілу Кондратова – Вейбулла з контрольованими (гнучкими) параметрами. Запропонована модель описує зв'язок між нормованою похибкою та параметрами метеорологічної надійності смарт-систем. Показано, що динамічні регресійні імовірнісно-фізичні моделі метрологічних відмов – це поєднання можливостей регресійних моделей з використанням гнучких багатопараметричних функцій розподілу, з можливістю використання динамічних (просторово-часових) процесів, що охоплюють різні тенденції зміни значення нормованих похибок та їх смуги невизначеності, довірчої імовірності, часові рамки, допустимі граничні умови тощо. Розкрито сутність нового методу визначення часу напрацювання смарт-систем на метрологічну відмову за допомогою імовірнісно-фізичної моделі метрологічної відмови на основі функції розподілу Кондратова – Вейбулла. Вперше розроблено та представлено графічний портрет імовірнісно-фізичної моделі метрологічних відмов смарт-систем у комбінованій системі шкал (координат) – із шкалами «ймовірність метрологічної похибки» та «нормована похибка» та окремої або комбінованої шкали «інтервальної шкали часу» та «календарної шкали часу».

Ключові слова: *метрологічна відмова, імовірнісно-фізичні моделі, метод динамічної регресії, функція розподілу, повірка, зразкова фізична величина.*

© В. Кондратов, 2022

УДК 389.14;006.15.7 DOI:10.34229/2707-451X.22.1.8

В. КОНДРАТОВ

ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ НАПРАЦЮВАННЯ НА МЕТРОЛОГІЧНУ ВІДМОВУ СМАРТ-СИСТЕМ ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

Вступ. Вирішення задачі (завдання) прогнозування та визначення часу напрацювання на метрологічну відмову (МВ) і проведення перших повірок смарт-систем (СС), призначених для прецизійного землеробства, можливо при вирішенні проблеми самокалібровки смарт-сенсорів, що входять до складу цих СС.

Як показано в роботі [1], завдання самокалібровки наприклад, оптичних смарт-сенсорів, вирішується при виконанні трьох основних технічних умов:

– при створенні і використанні структурно-надлишкових оптичних сенсорів, призначених для реалізації методів надлишкових вимірювань;

– при розробці високостабільних джерел оптичного випромінювання, наприклад світлодіодів з керованими параметрами на апріорі визначений спектральний діапазон довжин хвиль;

– при наявності або створенні певної номенклатури чипів світлофільтрів на апріорі заданий діапазон спектру оптичних сигналів.

Це дало можливість подальшого розвитку теорії метрологічної надійності (МН) СС в частині створення методології прогнозування та визначення часу напрацювання на МВ і часу проведення повірок зазначених смарт-систем.

Мета роботи. Опис методології динамічного прогнозування та визначення часу напрацювання на МВ і проведення перших повірок СС для прецизійного землеробства.

Результати. Розв'язання метрологічного завдання визначення значення прогнозного часу напрацювання на МВ є досить актуальним і пов'язано з використанням імовірнісно-фізичних моделей (ІФ-моделей) МН СС та інших засобів вимірювання. Ці моделі описують взаємозв'язки метрологічних характеристик (МХ), зокрема, похибок, що нормуються, з параметрами МН СС.

Такі моделі мають гнучкість зміни форми кривої при незмінному параметрі масштабу. На їх основі вирішено завдання динамічного прогнозування і визначення часу напрацювання на МВ, встановлені тонкощі використання нелінійного регресійного аналізу для

вирішення метрологічних задач, визначення часу напрацювання на МВ, розроблені методи динамічного прогнозування і визначення часу проведення першої повірки, часу напрацювання на МВ та поточного значення коефіцієнта метрологічного запасу.

В чому суть метода динамічної регресії?

Метод динамічної регресії: основні поняття і визначення. Використання ІФ-моделей МВ в теорії МН зумовило необхідність розгляду завдань прогнозування МВ як метрологічні, пов'язані з багаторазовими вимірюваннями нормованих за значенням фізичних величин (ФВ) з наступним визначенням значення похибки, що нормується, часу настання МВ і смуги невизначеності отриманих значень.

Для прогнозування і визначення часу напрацювання на МВ були розроблені метод динамічної регресії і відповідні моделі МВ СС. Як правило, для вирішення вказаних задач використовують лише гнучкі ІФ-моделі, теоретико-експериментальні дослідження яких сукупно з СС дозволяють отримати інформацію про можливі стани (імовірності МВ) і МН СС у теперішньому і майбутньому.

Метод динамічної регресії – ефективний метод прогнозування МВ СС, оскільки дозволяє враховувати вплив незалежних змінних на весь ітераційний процес прогнозування і визначення параметрів та показників МН СС.

Динамічні регресійні ІФ-моделі прогнозування і визначення календарного часу настання МВ дозволяють враховувати дію зовнішніх дестабілізуючих чинників на СС, що призводять до старіння його функціональних блоків і елементів, і, в кінцевому рахунку, до змін МХ протягом часу використання, зберігання і транспортування.

Динамічні регресійні ІФ-моделі МВ – поєднання регресивних моделей, що використовують гнучкі багатопараметрові функції розподілу (ФР), з можливістю використання динамічних (просторово-часових) умов, що охоплюють різні тенденції зміни значень похибок, що нормуються, і смуги їх невизначеності, довірчої ймовірності, часових рамок, допустимих граничних умов тощо. В результаті отримуємо точнішу ІФ-модель МВ.

Строго визначені динамічні регресивні моделі МВ відображають зв'язок між залежною змінною, зокрема похибкою СС, що нормується, і одною або декількома незалежними змінними – параметрами форми і зсуву*.

Метод динамічної регресії – це теоретико-експериментальний метод дослідження стану СС і його ІФ-моделі МВ за МХ, отриманими у результаті введення СС в експлуатацію і його повірок, заснований на зворотно-поступальному наближенні ІФ-моделі МВ, що відповідає віртуальному майбутньому, до моделі теперішнього часу (повірок) і від ІФ-моделі, що відповідає поточній повірці у теперішньому часі, до реальної моделі напрацювання на МВ у майбутньому.

З іншого боку, метод динамічної регресії – це сукупність прийомів зворотно-поступального наближення значень параметра зсуву динамічної ІФ-моделі МВ до прогнозного значення параметра зсуву статичної ІФ-моделі МВ СС, а також прийомів оцінювання достовірності і точності прогнозування та визначення часу напрацювання на МВ за відповідними рівняннями вимірювання і рівняннями похибок.

Можливі інші визначення, наприклад, розлоге: метод динамічної регресії – це сукупність прийомів зворотно-поступального наближення одна до одної кривих модельної і прогнозної багатопараметрових ФР одного аналітичного виду з незмінними і однаковими значеннями параметра масштабу і зміщення, встановленого на момент часу введення СС в експлуатацію (перша характеристична точка або ордината), причому крива прогнозної ФР проходить через усі можливі значення похибки (точки прогнозної кривої) до апріорі встановленого значення прогнозного часу напрацювання на МВ (остання 4-а критична точка), а графік модельної ФР – тільки через три відомі характеристичні точки: першу і дві наступні сусідні точки, що відповідають результатам поточних (попередній і

* У нашому випадку параметр зсуву – це час напрацювання на МВ.

наступній) повірок СС, з наступною оцінкою достовірності і точності прогнозування часу напрацювання на МВ за відповідними рівняннями вимірювання та рівняннями похибок.

Метод динамічної регресії містить ряд етапів прогнозування, що являють собою певні частини ітераційного процесу розробки прогнозів за результатами повірок СС, що характеризуються своїми задачами, цілями і результатами. Поділ на етапи пов'язано із специфікою опису об'єкта прогнозування СС за допомогою ІФ-моделі МВ, операцій збору даних, побудови моделі, оцінки достовірності і точності або обґрунтування прогнозу тощо.

Вирішення задач динамічного прогнозування і визначення часу напрацювання на МВ може бути доручено деякій експертній системі (ЕС). На неї можуть бути покладені функції накопичення, аналізу і обробки різноманітних статистичних даних повірок, вибору і побудови ІФ-моделі СС, створення графічних моделей тощо. ЕС може містити повний спектр самостійної інтерпретації гіпотез, форм зміни похибки вимірювання від повірки до повірки, досліджувати сценарії виду «що, якщо …» і виконувати інші функції.

Основні операції методу динамічної регресії. В основу метода динамічної регресії покладено виконання наступної сукупності операцій або прийомів:

1) визначення характеру зміни МХ СС при нелінійній функції перетворення (ФП) вимірювального каналу (ВК) протягом часу до МВ;

2) вибір адекватної ФР (ІФ-моделі МВ) похибок, що нормуються, для групи однотипних СС.

Зазначена ІФ-модель створюється апріорі за результатами багаторазових повірок СС протягом часу напрацювання на МВ або за результатами теоретичних розрахунків;

3) побудова кривої (рис. 1) ФР в об'єднаній системі шкал: із шкалами (двома ординатами) – «імовірність безвідмовної роботи» і «нормована похибка» та роздільних або суміщених шкал (абсцис) «інтервальної шкали часу» і «шкали календарного часу»;

4) вимірювання не встановлених, а реальних поточних інтервалів часу $\Delta t_{\text{пі}i}$ між повірками з урахуванням можливих похибок їх визначення;

5) багаторазові вимірювання нормованої за значенням ФВ x_0 в установлені моменти t_{xi} часу чергових повірок;

6) статистична обробка результатів вимірювання з метою визначення зміни в часі, наприклад, похибки СС, що нормується, або сумарної чутливості ВК, протягом часу напрацювання на МВ;

7) наближення значень параметра зсуву ФР до прогнозного значення при певних умовах проходження кривої модельної ФР через три характерні точки, що відповідають дискретним значенням аргументу.

Мова йде про ФР, як про функцію дискретного аргументу. Шукається така ФР ξ_x, що проходить найближче не до всіх дискретних точок кривої заданої функції (тобто значенням похибок у моменти часу t_{xi} проведення повірок СС), а переважно тільки до першої («початкової») і до наступних двох сусідніх («поточних») точок кривої, виключаючи «критичну» точку в момент часу $t_{xn} = T_{\text{НВ}}$;

8) визначення в моменти часу t_{xi} різниці теоретично і практично отриманих значень похибок та їх знаків з урахуванням прогнозної ФР;

9) прийняття рішення по зміні значень параметра форми і/або параметра зсуву (часу напрацювання на МВ) до забезпечення нульового або близького до нього (з урахуванням похибки установки) значення різниці похибок, поточної і теоретично отриманої за ФР з встановленими за попередньої повірки параметрами. Іншими словами здійснюється зворотно-поступальне наближення функцій;

10) визначення швидкості зміни похибки, що нормується, (або сумарної чутливості) за міжповірочний інтервал $\Delta t_{\text{пі}} = t_{x(i+1)} - t_{xi}$. Швидкість зміни похибки, що нормується, визначається за рівнянням вимірювання

$$\nu(t_{x(i+1)}) = (\delta_x(t_{x(i+1)}) - \delta_x(t_{xi})) / (t_{x(i+1)} - t_{xi});$$

11) визначення різниці практично отриманих за результатами попередньої і наступної повірок і прогнозного значень швидкості зміни похибок, теоретично отриманих за кривою прогнозної ФР у ті ж моменти часу проведення повірок;

12) прийняття рішення по черговій зміні значень параметра форми або параметра зсуву до забезпечення нульового або близького до нього (з урахуванням похибки установки) значення різниці швидкостей і рішення щодо побудови нової прогнозної ФР;

13) визначення часу напрацювання на МВ і його невизначеності за відповідними рівняннями вимірювання і рівняннями похибок;

14) оцінка достовірності, точності й ефективності прогнозування і визначення часу напрацювання на МВ.

Як зазначалося в [2], для вирішення завдань МН паспорт на СС має містити документ, що представляє собою «графічний портрет ІФ-моделі МВ СС». У ньому мають бути вказані: аналітичний вираз і криві прогнозної ФР, що відповідають кожній повірці, значення параметрів даної ФР, календарний час проведення першої повірки, рекомендації щодо проведення наступних повірок (з зазначеним або без зазначеного календарного часу), значення інтервалів часу між повірками, ймовірність МВ з указаними довірчими межами та інша інформація.

Метод динамічної регресії. Розглянемо суть нового методу визначення часу напрацювання СС на МВ з використанням ІФ-моделі МВ на основі ФР Кондратова – Вейбулла. Її різновиди, властивості та функціональні можливості описані в роботах [3–9].

Допустимо необхідність визначення часу напрацювання на МВ СС певного типу і класу точності з моменту часу початку експлуатації t_{x0} ($\{t_{xi}\}_{|\text{при } i=0} = \{t_{x0}\}$) до моменту часу $t_{x+\text{T}}$ настання (наробітку) першої МВ. Підкреслимо, що t_x – це інтервальний час, відлік якого рахують від моменту введення СС в експлуатацію або надання йому класу точності.

Якщо час $t_{x+\text{T}}$ – величина, що прогнозується, то різниця між значеннями часу $t_{x+\text{T}}$ і t_{x0}, тобто $\{T_{\text{НВП}}\} = \{t_{x+\text{T}}\} - \{t_{x0}\}$, представляє собою значення часу напрацювання на МВ, що прогнозується.

Поставлено завдання визначення реальних або ймовірніших значень часу напрацювання на МВ, тобто $T_{\text{НВ}}$, і поточних значень ймовірності МВ.

Припустимо, що в результаті теоретичних досліджень на етапі проектування СС і прогнозування встановлено наступні прогнозні значення параметрів ФР: параметр зсуву (час напрацювання на МВ) $T_{\text{НО}} = 30$ років, параметр форми $k_\varphi = 6$, параметр масштабу $S_\xi = 1{,}5$. За результатами надання класу точності та початку експлуатації СС на момент часу t_{x0} експериментально було отримано від'ємне значення похибки, що нормується, вимірювання зразкової ФВ $\xi_{x0} = -0{,}25 \pm 0{,}015$ (з рівновіддаленою смугою невизначеності $\pm\Delta_\xi = \pm 0{,}15$), встановлені верхня і нижня межі симетричних довірчих інтервалів $\pm\xi_{\text{нд}} = \pm 1{,}25$, нормованих для даної СС, при заданому значені коефіцієнта метрологічного запасу $k_{\text{мз}} = 6$ (зазвичай $1 \le k_{\text{мз}} \le 10$), і значення інтервалу часу між повірками $\Delta t_{\text{п}} = 2{,}5$ роки.

На рис. 1 показано індивідуальний графічний портрет ІФ-моделі МВ деякої СС, в основі якого є крива, що описується метрологічною ФР Кондратова – Вейбулла з указаними прогнозними значеннями параметрів. Додатково зазначено значення моменту часу $t_x = 26,7$ років, небезпечного для подальшого використання СС (рис. 1, точка *T* на шкалі інтервального часу, заштрихована область навколо точки *R*1 на кривій 1 і точка U на шкалі ймовірнісних значень міри, що відповідає значенню імовірності МВ $P_\xi = 0,9 \pm 0,1$).

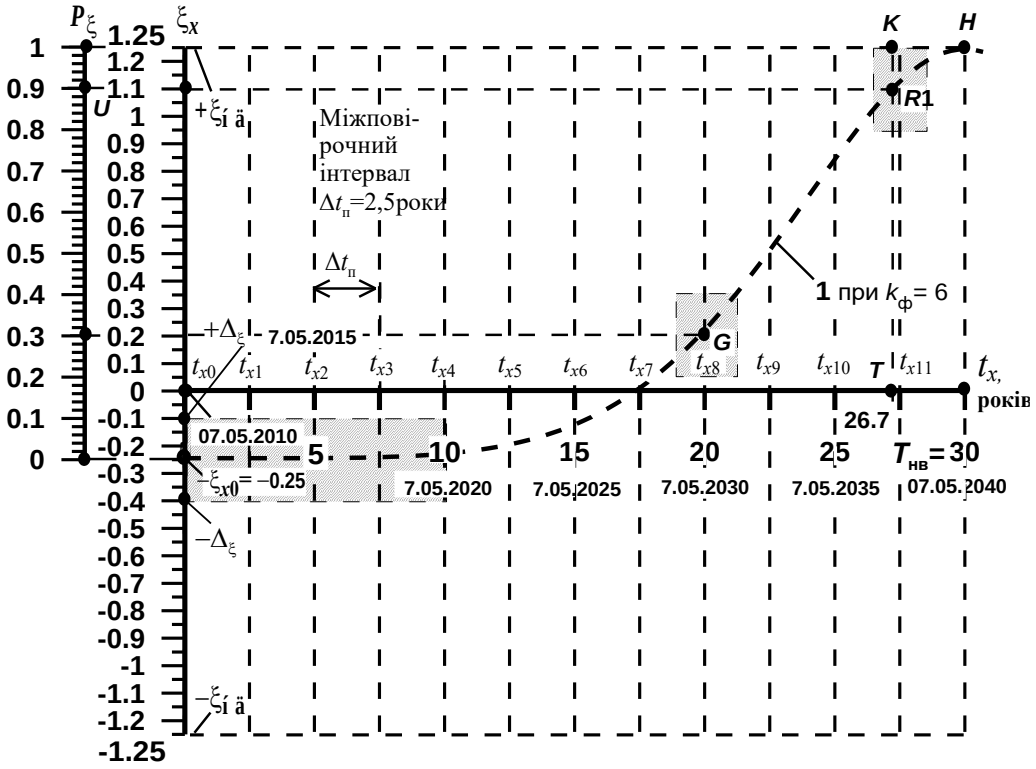

РИС. 1. Графічний портрет ІФ-моделі МВ СС з використанням ФР Кондратова – Вейбулла

Із показаної метрологічної кривої 1 видно, що в результаті отримання в момент часу t_{x0} значення похибки $\xi_{x0} = -0,25 \pm 0,15$ з невизначеністю $\pm\Delta_{\xi 0} = \pm 0,15$, МВ може настати вже через 26,7 років після початку експлуатації СС, точніше в інтервалі часу $\Delta t_{МВ} = 30 \text{років} - 26,7 \text{років} = 3,3 \text{роки}$. Зазначимо, що на рис. 1 показані всі необхідні позначення в об'єднаній системі шкал (координат), із шкалами «імовірність метрологічної відмови P_ξ » і «похибка, що нормується, ξ_x » і роздільних або суміщених шкал «інтервальної шкали часу t_x » і «шкали календарного часу».

Особливістю будь-якого графічного портрету є його наочність і можливість прогнозування МВ СС та поточні значення ймовірності МВ за результатами повірок. Як видно із показаного графічного портрету ІФ-моделі МВ при вказаній прогнозній ФР проведення першої повірки може бути здійснено не у момент t_{x1}, як заплановано, а, наприклад, у момент t_{x4}, тобто через 10 років або навіть через 20 років введення СС в експлуатацію (рис. 1, точка *G* кривої).

У першому випадку ймовірність МВ буде меншою, ніж $P_{\xi 1} \le 0{,}1$, а у другому $P_{\xi 2} = 0{,}3 \pm 0{,}1$ (рис. 1, заштриховані фрагменти смуги невизначеності значень похибок).

Аргументований вибір часу проведення першої повірки надає можливість зекономити витрати на її проведення.

Визначення моменту часу проведення першої повірки. Після визначення значення і знака відносної похибки вимірювання $\xi_{x0} = -0{,}25 \pm 0{,}15$ і довірчих інтервалів $\pm\xi_{НД} = \pm 1{,}25$, при заданому значенні параметра метрологічного запасу $k_{мз} = 6$, одним із відомих методів визначається момент часу t_{x1} (при $i = 1$) проведення першої повірки

$$\{t_{xi}\}|_{i=1} = \{t_{x1}\} = \{t_{x(i-1)}\} + \{t_{\Pi i}\}|_{\text{при } i=1} = \{t_{x0}\} + \{\Delta t_{\Pi 1}\}, \quad (1)$$

де $\Delta t_{\Pi 1}$ – інтервал часу між початком (моментом часу) введення в експлуатацію СС і його першою повіркою.

Як вищепоказано, розрізняють два підходи до проведення повірок:

1) з рівними між собою міжповірочними інтервалами $(\{\Delta t_{\Pi 1}\} = \{\Delta t_{\Pi 2}\} = ... = \{\Delta t_{\Pi i}\} = ... = \{\Delta t_{\Pi n_1}\} = \{\Delta t_{\Pi}\})$, де n_1 – число повірок при першому підході;

2) з нерівними між собою міжповірочними інтервалами, тобто при $(\{\Delta t_{\Pi 1}\} \ne \{\Delta t_{\Pi 2}\} \ne ... \ne \{\Delta t_{\Pi i}\} \ne \ne ... \ne \{\Delta t_{\Pi n_2}\}$, де n_2 – число повірок при другому підході.

Перший підхід використовується у тих випадках, коли необхідно визначити темп зміни (показник порівняльної динаміки) і швидкість зміни похибки, що нормується. Як приклад на рис. 1 показано рівномірний міжповірочний інтервал $\Delta t_{\Pi} = 2{,}5$ роки, хоча доцільніше використовувати міжповірочні інтервали кратні року [2]. Як рекомендується в [2], повірки доцільно проводити в один і той же час року, в один і той же день тижня і місяць. Цим враховується повний природний цикл впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів на СС, усереднений за роком.

Повірники завжди мають вибір – зекономити витрати на повірку або забезпечити високу точність визначення часу напрацювання на МВ та інших показників МН СС.

Другий підхід передбачає економію витрат на проведення повірок у цілому при розроблених критеріях і методах визначення першої і наступних повірок. У цьому випадку встановлюється оптимальна кількість повірок $n_2 < n_1$, не понижуючи їх якість.

Опишемо новий метод визначення часу напрацювання на МВ при використанні першого підходу при міжповірочному інтервалі $\Delta t_{\Pi} = 2{,}5$ роки. Запропонований метод з однаковим успіхом може бути використаним і при другому підході. Після надання СС класу точності і встановлення прогнозних параметрів ФР Кондратова – Вейбулла складається графічний портрет ІФ-моделі МВ СС у вигляді, показаному на рис. 1.

Припустимо, що експлуатація СС почалася 7.05.2010 року о 12 год. 00 хв. (рис. 1). Отже, перша повірка буде здійснена 7.11.2012 року о 12 год. 00 хв. (рис. 1).

Міжповірочний інтервал часу Δt_{Π} встановлюється, як правило, з похибками

$$\{\Delta t_{\Pi 1в}\} = \{\Delta t_{\Pi}\} + \{\Delta_{t_{\Pi 1в}}\} \quad (2)$$

або

$$\{\Delta t_{\Pi 1н}\} = \{\Delta t_{\Pi}\} - \{\Delta_{t_{\Pi 1н}}\}, \quad (3)$$

де $\{\Delta_{t_{\text{П1в}}}\}$ – значення похибки визначення міжповірочного інтервалу часу (МІЧ), що характеризує значення верхньої (індекс «в») півширини смуги невизначеності; $\{\Delta_{t_{\text{П1Н}}}\}$ – значення похибки, що характеризує нижнє (індекс «н») значення півширини смуги невизначеності.

Похибки вимірювання часу досить малі і складають частки секунди. Але запланований календарний час t_{x1} проведення першої повірки, що визначається в роках або годинах, найчастіше порушується з виробничих причин або з недбалості повірників (суб'єктивна складова похибки). Іншими словами, повірка може бути проведена пізніше $(\{t_{xi2}\}|_{\text{при } i=1} = \{t_{x12}\} = \{t_{x1}\} + \{\Delta_{t_{\text{П1в}}}\})$ або раніше $(\{t_{xi1}\}|_{\text{при } i=1} = \{t_{x11}\} = \{t_{x1}\} - \{\Delta_{t_{\text{П1н}}}\})$ запланованого часу, наприклад, до або після травневих свят. Ураховуючи дане з цим під похибками $\Delta_{t_{\text{п1в}}}$ і $\Delta_{t_{\text{п1н}}}$ будемо розуміти сумарні похибки визначення інтервалу часу $\Delta t_{\text{п1}}$ до початку проведення першої повірки. У загальному випадку вони не рівні між собою і складають одиниці, десятки і сотні годин або (0,01 – 10) % від $\Delta t_{\text{п}}$.

Проведення першої повірки. В установлений момент часу t_{x1}, наприклад, о 12 год. 00 хв. 07.11.2012 року – тобто через 2,5 роки від початку експлуатації СС, проводиться перша запланована повірка СС (рис. 2, позначка t_{x1} на шкалі часу).

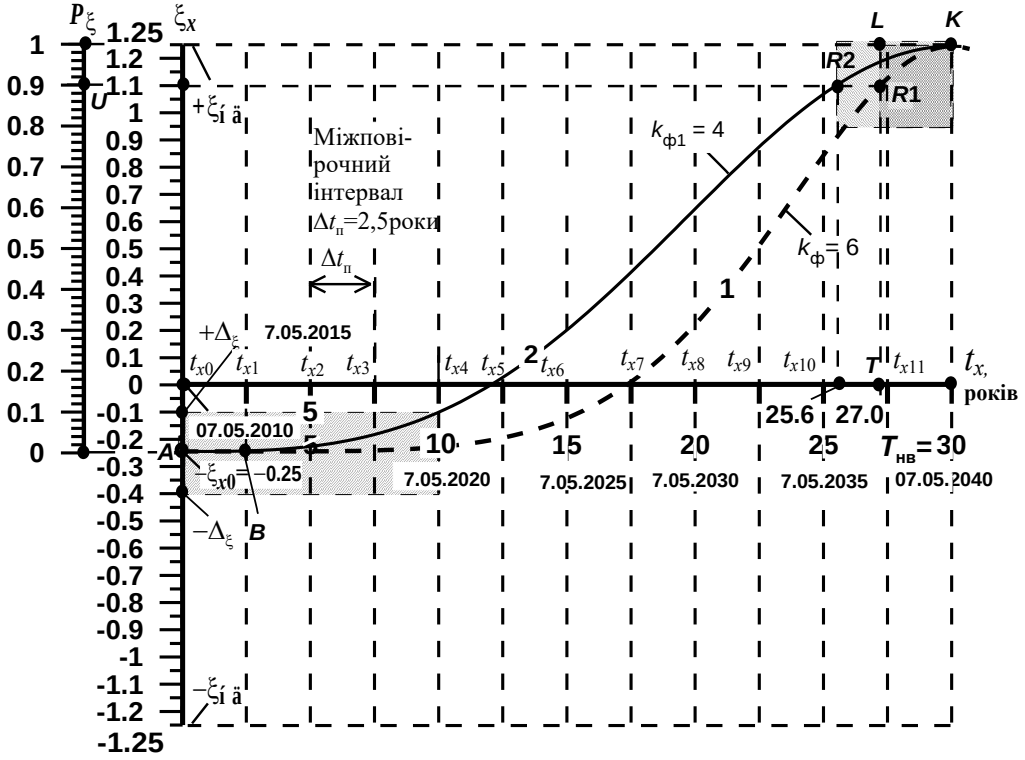

РИС. 2. Графічний портрет ІФ-моделі МВ СС, що пояснює суть методу визначення часу напрацювання на МВ (перша повірка)

За допомогою СС, що повіряється, багаторазово вимірюється зразкова ФВ x_0, а отримані значення статистично оброблюються за рівнянням величин:

$$\xi_{x1} = \overline{\xi_{xi}}(t_{xi})\,|_{\text{при } i=1} = \overline{\xi_{x1}}(t_{x1}) = \frac{n^0}{n}\sum_{i=1}^{i=n}\xi_{x1i}(t_{xi}) = \frac{n^0}{x_0 n}\sum_{i=1}^{i=n}\Delta_{o1i} = \overline{\Delta_{o1}} / x_0, \quad (4)$$

де $\xi_{x1}(t_{x1})$ – середня за значенням відносна похибка результату багаторазових вимірювань; $\overline{\Delta_{o1}}$ – середня за значенням абсолютна похибка результатів вимірювань при довірчій імовірності P_δ; Δ_{o1i} і $\xi_{x1i}(t_{x1})$ – i-а абсолютна і відносна похибки вимірювання; $n^0 = 1$.

Зазначимо, що при використанні як нормованої абсолютної похибки Δ_{o1i}, середня за значенням похибка результату багаторазових вимірювань дорівнюватиме:

$$\xi_{x1} = \frac{n^0}{n}\sum_{i=1}^{i=n}\Delta_{o1i} = \overline{\Delta_{o1}}.$$

Одночасно з отриманим значенням похибки, що нормується (4) визначаються і запам'ятовуються значення верхньої і нижньої меж смуги невизначеності за заданими значеннями довірчої ймовірності P_ξ і коефіцієнта запасу $k_{з1}$. Останній вибирається в межах $1 \le k_{з1} \le 1{,}42$ в залежності від закону розподілу випадкової складової похибки. Індекс «1» вказує на значення даного коефіцієнта при першій повірці.

Вибір того або іншого значення $k_{з1}$ дуже важливо при визначенні тривалості особливо першого та інших поточних інтервалів часу повірок, особливо при вирішенні завдання зменшення або оптимізації кількості повірок з тими же витратами.

Верхня ($\Delta\xi_{1в}$) і нижня ($\Delta\xi_{1н}$) півширина смуги невизначеності відносної похибки ξ_{x1} на момент часу t_{x1} визначається відповідно до рівнянь величин

$$\Delta\xi_{1в} = k_{з1}\xi_{σв1} = k_{з1}\sigma_{в1}[\Delta_{o1}]/x_0, \quad (5)$$

$$\Delta\xi_{1н} = k_{з1}\xi_{σн1} = k_{з1}\sigma_{н1}[\Delta_{o1}]/x_0, \quad (6)$$

де $\xi_{σв1} = \sigma_{в1}[\Delta_{o1}]/x_0$ і $\xi_{σн1} = \sigma_{н1}[\Delta_{o1}]/x_0$ – верхнє і нижнє відносне середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань у момент часу t_{x1};

$$\sigma_{в1}[\Delta_{o1}] = +\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left((x_{oi} - \overline{x_{o1}})_{>0}\right)^2}{n(n-n^0)}}, \quad (7)$$

де $\overline{x_{o1}}$ – середнє значення результату вимірювання нормованої за значенням ФВ x_o, якщо позитивний знак відхилення $x_{oi} - \overline{x_{o1}}$;

$$\sigma_{н1}[\Delta_{о1}] = +\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left((x_{оi} - \overline{x_{о1}})_{<0}\right)^2}{n(n-n^0)}}\ , \qquad (8)$$

якщо негативний знак відхилення $x_{оi} - \overline{x_{о1}}$.

У формулах (7) і (8) $\sigma_{в1}$ і $\sigma_{н1}$ – верхнє і нижнє середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань, отримані в момент часу t_{x1}. На це вказує нижній індекс «1».

При заданих прогнозних значеннях часу напрацювання на МВ $T_{НВ} = 30$ років і параметру форми $k_ф = 6$ (рис. 2, пунктирна крива 1), визначається можливе (теоретичне) значення похибки в момент часу t_{x1}, що пройшов від початку експлуатації СС, відповідно до рівняння вимірювання

$$\xi_{т1} = \xi_т(t_{x1}) = S_\xi \cdot \left(\frac{t_{x1}}{T_{НВ}}\right)^{k_ф - k_ф^0} \cdot \exp\left(-\left(\frac{t_{x1}}{T_{НВ}}\right)^{k_ф - k_ф^0}\right) + \xi_{x0}\,, \qquad (9)$$

де $k_ф^0 = 1$; $S_\xi = e\cdot(\xi_{нд} - \xi_{x0}) = e\cdot\xi_{нд}\cdot(1 - \xi_{x0}/\xi_{нд}) = e\cdot\xi_{нд}(1 - 1/k_{мз})$ – параметр масштабу (або параметр чутливості функції до МХ СС певного виду і класу точності); e – дійсне число Ейлера $(e = 2,71828182...)$; $\xi_{x0} = \overline{\xi_{x0}}(t_{x0})$ – зміщення функції розподілу, що дорівнює за значенням середній відносній похибці результату багаторазових вимірювань нормованої за значенням ФВ x_0 в момент часу t_{x0}; $\xi_{нд}$ – нормована за значенням довірча межа похибки, що нормується, результату вимірювання; $k_{мз}$ – коефіцієнт метрологічного запасу; t_{x1} – інтервальний час проведення першої повірки, в роках; $k_ф^0 = 1$.

Слід зазначити, що при розрахунках в (9) використовується не календарний, а інтервальний час $t_{x1} = 2,5$ роки.

Потім визначається (і запам'ятовується) знак і числове значення різниці $\Delta\xi_{xт1}$ практично і теоретично отриманих похибок результатів вимірювань у момент часу t_{x1} за рівнянням величин

$$\Delta\xi_{xт1} = \overline{\xi_{x1}}(t_{x1}) - \xi_{т1}(t_{x1})\,. \qquad (10)$$

У всіх повірках, крім першої, проводяться дві, що повторюються одна за одною, операції з уточнення прогнозних значень параметрів ФР: спочатку здійснюється операція підбору значення параметра форми $k_ф$, а потім – часу напрацювання на МВ. Ці операції повторюються до досягнення умови (10) нулю.

Після цього визначається знак і положення прогнозної ФР. При першій повірці проводиться лише уточнення значення параметра форми $k_ф$, а значення часу $T_{НВ}$ напрацювання на МВ зазвичай залишається незмінним.

На практиці підбір параметрів ФР здійснюється графоаналітичним методом, тобто з використанням аналітичних розрахунків і графічних побудов. При першій повірці шляхом підбору значен-

ня параметра форми ФР змінюють значення $k_{\text{ф}} = 6$ до, наприклад, $k_{\text{ф}1} = 4,$ при якому значення різниці $\Delta\xi_{x\text{т}1}$ похибок стане рівним нулю за умови

$$\{\xi_{x1}\} = \{\xi_{\text{т}1}\} \tag{11}$$

або

$$\xi_{x1} = S_{\xi} \cdot \left(\frac{t_{x1}}{T_{\text{НВ}1}}\right)^{k_{\text{ф}1} - k_{\text{ф}}^0} \cdot \exp\left(-\left(\frac{t_{x1}}{T_{\text{НВ}1}}\right)^{k_{\text{ф}1} - k_{\text{ф}}^0}\right) + \xi_{x0}. \tag{12}$$

Якщо за рахунок зміни параметру форми вдалося забезпечити рівність (11) при прогнозному (першому) значенні часу напрацювання на МВ ($T_{\text{НВ}} = T_{\text{НВ}1} = 30$ років), то надалі цей час не уточнюється. При отриманих значеннях параметрів $k_{\text{ф}1} = 4$ і $T_{\text{НВ}1} = 30$ років на графічному портрету ІФ-моделі МВ проводиться (будується) друга прогнозна крива ФР, що проходить через точку *A*, відповідну похибці $\xi_{x0}(t_{x0}) = -0,25$, робочу точку *B*, відповідну похибці $\xi_{x1}(t_{x1}) = -0,24 \pm 0,15,$ і задану точку *K*, відповідну моменту часу $T_{\text{НВ}1} = T_{\text{НВ}} = 30$ років (рис. 2, безперервна крива 2). Як видно із рис. 2 точка *K* є точкою дотику кривої 2 з прямою, що характеризує верхнє граничне значення похибки, що нормується, СС. Описана сукупність операцій забезпечує перше наближення ФР до реальної.

Вказаний графік дає можливість наочно оцінити тенденцію зміни і положення прогнозного графіка на вісі календарного часу за встановленими значеннями параметрів ФР. Зокрема, наприклад, із показаної на графічному портреті кривої 2 видно, що в результаті зміни коефіцієнта форми настання МВ відбудеться не після 27,0 років використання (експлуатації) СС, а через 25,6 років або з 09.12.2035 року (рис. 2, точка *R*2 кривої 2, заштрихована область невизначеності і календарний час).

Отримані дані та графіки документуються з метою їх використання при проведенні другої повірки СС на паперовому і електронному носіях з додатком графічного портрету ІФ-моделі МВ СС. На момент часу закінчення першої повірки графічний портрет буде містити уже дві ФР, як показано на рис. 2.

Проведення другої повірки. За одним із відомих методів (або за раніше встановленого графіка) визначається момент часу t_{x2} проведення другої (поточної) повірки, що дорівнює, наприклад, 12 год. 00 хв. 07.05.2015 року (рис. 3, позначка t_{x2} на шкалі часу), тобто

$$\{t_{x2}\} = \{t_{xi}\}|_{\text{при } i=2} = (\{t_{x(i-1)}\} - \{t_{\text{п}i}\})_{\text{при } i=2} = \{t_{x1}\} + \{\Delta t_{\text{п}2}\}. \tag{13}$$

Згідно (13) момент часу t_{x2} відрізняється від t_{x1} на інтервал часу $\Delta t_{\text{п}2}$. З урахуванням похибок $+\Delta_{t_{\text{п}2\text{В}}}, -\Delta_{t_{\text{п}2\text{н}}}$, верхнє і нижнє значення півширини смуги невизначеності інтервалу часу повірки визначаються відповідно до рівнянь числових значень

$$\{\Delta t_{\text{п}2\text{в}}\} = \{\Delta t_{\text{п}2}\} + \{\Delta_{t_{\text{п}2\text{в}}}\}, \tag{14}$$

$$\{\Delta t_{\text{п}2\text{н}}\} = \{\Delta t_{\text{п}2}\} - \{\Delta_{t_{\text{п}2\text{н}}}\}. \tag{15}$$

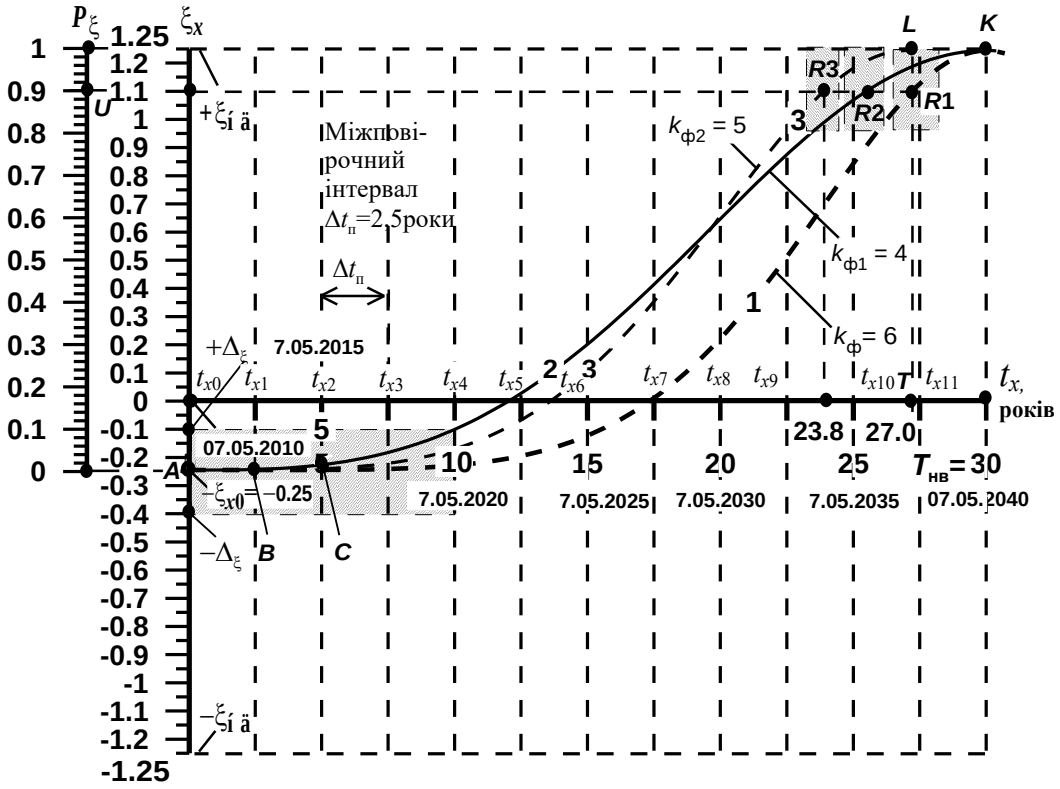

РИС. 3. Графічний портрет ІФ-моделі МВ СС, що пояснює суть методу визначення часу напрацювання на МВ (після перших двох повірок)

В установлений момент часу t_{x2} знову багаторазово вимірюється зразкова ФВ x_0. Отримані результати статистично оброблюються, тобто визначаються і запам'ятовуються середнє значення і знак відносної похибки

$$\xi_{x2} = \overline{\xi_{xi}}(t_{xi})\,|_{\text{при } i=2} = \overline{\xi_{x2}}(t_{x2}) = \frac{n^0}{n}\sum_{i=1}^{i=n}\xi_{x2i}(t_{xi}) = \frac{n^0}{x_0 n}\sum_{i=1}^{i=n}\Delta_{o2i} = \overline{\Delta_{o2}} / x_0\,, \tag{16}$$

де $\overline{\Delta_{o2}}$ – середня за значенням абсолютна похибка результатів багаторазових вимірювань з довірчою ймовірністю P_ξ; $\overline{\xi_{x2}}(t_{x2})$ – середня за значенням відносна похибка результату вимірювання; Δ_{o2i} і $\xi_{x2i}(t_{x2})$ – i-а абсолютна і відносна похибки вимірювань; $n^0 = 1$.

Одночасно в момент часу t_{x2} визначаються і запам'ятовуються значення верхньої та нижньої півширини смуги невизначеності результатів вимірювань за заданими значеннями довірчої ймовірності P_ξ і коефіцієнта запасу $k_{з2}$. Останній вибирається, як і $k_{з1}$, у межах $1 \le k_{з2} \le 1{,}42$.

Верхня ($\Delta\xi_{2в}$) і нижня ($\Delta\xi_{2н}$) півширина смуги невизначеності похибки ξ_{x2} на момент часу t_{x2} визначається відповідно до рівнянь величин:

$$\Delta\xi_{2в} = k_{з2}\sigma_{в2}[\Delta_{o2}]/x_0 = k_{з2}\xi_{σв2}\,, \tag{17}$$

$$\Delta\xi_{2н} = k_{з2}\sigma_{н2}[\Delta_{о2}]/x_0 = k_{з2}\,\xi_{\sigma н2}\,, \tag{18}$$

де $\sigma_{в2}$ і $\sigma_{н2}$ – верхнє і нижнє відносне середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань на календарний момент часу t_{x2}; $\xi_{\sigma в2} = \sigma_{в2}[\Delta_{о2}]/x_0$ і $\xi_{\sigma н2} = \sigma_{н2}[\Delta_{о2}]/x_0$ – верхнє і нижнє відносне середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань на той же момент часу;

$$\sigma_{в2}[\Delta_{о2}] = +\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left((x_{оi} - \overline{x_{о2}})_{>0}\right)^2}{n(n-n^0)}} = \sigma_{в2}(t_{x2}) \tag{19}$$

– середньоквадратичне відхилення результатів вимірювання, якщо $x_{оi} - \overline{x_{о2}}$ має позитивний знак відхилення;

$$\sigma_{н2}[\Delta_{о2}] = +\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left((x_{оi} - \overline{x_{о2}})_{<0}\right)^2}{n(n-n^0)}} = \sigma_{н2}(t_{x2}) \tag{20}$$

– середньоквадратичне відхилення результатів вимірювання, якщо $x_{оi} - \overline{x_{о2}}$ має негативний знак відхилення; $\overline{x_{о2}}$ – середнє значення результату вимірювання зразкової ФВ $x_о$.

Слід зазначити, що похибка ξ_{x2} (16) може набувати різні випадкові значення і знаки. При визначенні часу напрацювання на МВ можливі випадки, коли приріст похибки, отриманої у момент часу t_{x0}, і похибок, отриманих у момент часу t_{x1} і t_{x2}, мають різні знаки. Тому, починаючи з моменту часу t_{x2} проведення другої повірки, визначаються і запам'ятовуються значення і знаки приростів

$$\Delta\xi_{x10} = \overline{\xi_{x1}}(t_{x1}) - \overline{\xi_{x0}}(t_{x0})\,, \tag{21}$$

$$\Delta\xi_{x20} = \overline{\xi_{x2}}(t_{x2}) - \overline{\xi_{x0}}(t_{x0})\,, \tag{22}$$

$$\Delta\xi_{x21} = \overline{\xi_{x2}}(t_{x2}) - \overline{\xi_{x1}}(t_{x1})\,, \tag{23}$$

отриманих у моменти часу t_{x0}, t_{x1} і t_{x2} повірок, що послідовно здійснюються одна за одною.

Отримані значення аналізуються з метою визначення знака змінної складової ФР. Знак змінної складової ФР не змінюється при наступних знаках приростів (21), (22) та (23) і відповідних їм умовах:

$$+\Delta\xi_{x10}\,,\ +\Delta\xi_{x20}\,,\ +\Delta\xi_{x21}\,,\ \text{за умови, що}\ \Delta\xi_{x20} \ge \Delta\xi_{x10}\,; \tag{24}$$

$$+\Delta\xi_{x10}\,,\ +\Delta\xi_{x20}\,,\ -\Delta\xi_{x21}\,,\ \text{за умови, що}\ \Delta\xi_{x20} \le \Delta\xi_{x10}\,; \tag{25}$$

$$-\Delta\xi_{x10},\ +\Delta\xi_{x20},\ +\Delta\xi_{x21},\text{ за умови, що }\Delta\xi_{x21}\geq|-\Delta\xi_{x10}|. \tag{26}$$

Причому в двох останніх випадках враховуються лише похибки $\overline{\xi_{x0}}(t_{x0})$ і $\overline{\xi_{x2}}(t_{x2})$, а похибка $\overline{\xi_{x1}}(t_{x1})$ вважається промахом.

Знак змінної (залежної від часу) складової ФР змінюють на протилежний у наступних випадках:

$$-\Delta\xi_{x10},\ -\Delta\xi_{x20},\ -\Delta\xi_{x21},\text{ за умови, що }|-\Delta\xi_{x20}|\geq|-\Delta\xi_{x10}|; \tag{27}$$

$$-\Delta\xi_{x10},\ -\Delta\xi_{x20},\ +\Delta\xi_{x21},\text{ за умови, що }|-\Delta\xi_{x20}|\leq|-\Delta\xi_{x10}|; \tag{28}$$

$$+\Delta\xi_{x10},\ -\Delta\xi_{x20},\ -\Delta\xi_{x21},\text{ за умови, що }(-\Delta\xi_{x10})-|-\Delta\xi_{x20}|\leq 0. \tag{29}$$

При цьому в двох останніх випадках при розрахунках також використовуються лише похибки $\overline{\xi_{x0}}(t_{x0})$ і $\overline{\xi_{x2}}(t_{x2})$, а похибку $\overline{\xi_{x1}}(t_{x1})$ вважають промахом.

Допустимо, що знаки приростів (21), (22) і (23) відповідають умові (24). Тоді знак змінної складової ФР не змінюється, тобто залишається той же, що і за попередньої повірки.

Після вимірювання середнього значення і знака похибки $\xi_{x2}=\overline{\xi_{xi}}(t_{xi})|_{\text{при } i=2}$ у момент часу t_{x2} визначається і запам'ятовується теоретичне або прогнозне значення похибки відповідно до рівняння вимірювання

$$\xi_{\text{т}2}=S_{\xi}\cdot\left(\frac{t_{x2}}{T_{\text{НВ}1}}\right)^{k_{\text{ф}1}-k_{\text{ф}1}^{0}}\cdot\exp\left(-\left(\frac{t_{x2}}{T_{\text{НВ}1}}\right)^{k_{\text{ф}1}-k_{\text{ф}1}^{0}}\right)+\xi_{x0}, \tag{30}$$

де $T_{\text{НВ}1}$ – час напрацювання на МВ в роках, отриманий за попередньої повірки; $k_{\text{ф}1}$ – параметр форми, значення якого встановлено за результатами проведення попередньої повірки; $k_{\text{ф}1}^{0}=1$.

Теоретично отримане значення похибки $\xi_{\text{т}2}(t_{x2})$ порівнюється з практично отриманим у момент часу t_{x2} середнім значенням похибки $\overline{\xi_{x2}}(t_{x2})$ (з урахуванням знака), тобто визначається їх різниця

$$\Delta\xi_{x\text{т}2}=\overline{\xi_{x2}}(t_{x2})-\xi_{\text{т}2}(t_{x2}). \tag{31}$$

З урахуванням знаків значень різниць $\Delta\xi_{x\text{т}1}$ (10) і $\Delta\xi_{x\text{т}2}$ (31) значення параметра форми $k_{\text{ф}1}$ і часу напрацювання на МВ $T_{\text{НВ}1}$ почергово змінюються до найімовірніших числових значень параметрів $k_{\text{ф}1}^{'}$ і $T_{\text{НВ}1}^{'}$. У цьому випадку значення різниць $\Delta\xi_{x\text{т}1}$ (10) і $\Delta\xi_{x\text{т}2}$ (31) стануть рівними нулю у межах теоретично заданих значень похибок $\pm\Delta_{\xi x\text{т}1}$ і $\pm\Delta_{\xi x\text{т}2}$, тобто $\{\Delta\xi_{x\text{т}1}\}\cong 0\pm\{\Delta_{\xi x\text{т}1}\}$ і $\{\Delta\xi_{x\text{т}2}\}\cong 0\pm\{\Delta_{\xi x\text{т}2}\}$.

Спочатку досягається рівність нулю другої різниці $\Delta\xi_{xт2}$ ($\{\Delta\xi_{xт2}\}=0$) шляхом зміни, наприклад, значення параметра $T'_{НВ1}$ (рис. 3, крива 3 з новим значенням параметра зсуву). Потім перевіряється виконання умови рівності нулю першої різниці $\{\Delta\xi_{xт1}\}$ ($\{\Delta\xi_{xт1}\}=0?$). За умови її невиконання, тобто при $\{\Delta\xi_{xт1}\}\neq 0$ і при встановленому значенні часу наробітку на МВ $T'_{НВ1}$, змінюється значення параметра $k'_{ф1}$ до найімовірнішого (дійсного) значення, наприклад, до $k_{ф2}=5$, при якому значення першої різниці (10) стає рівним нулю. Ці дві операції повторюють у різній послідовності до забезпечення умов (10) і (31).

Найімовірніше (дійсне) значення часу $T_{НВ2}$ ($\{T_{НВ2}\}=\{T_{НВ1}\}\pm\{\Delta T_{НВ2}\}$) напрацювання часу на МВ (на момент часу t_{x2} ($\{t_{x2}\}=\{t_{x1}\}+\{\Delta t_{п2}\}$)) визначається за отриманим у неявному вигляді рівнянням вимірювання

$$\left(\frac{t_{x1}+\Delta t_{п2}}{T_{НВ1}\pm\Delta T_{НВ2}}\right)^{(k_{ф1}-k^0_{ф1}\pm\Delta k_{ф2})}-(k_{ф1}-k^0_{ф1}\pm\Delta k_{ф2})\cdot\ln\left(\frac{t_{x1}+\Delta t_{п2}}{T_{НВ1}\pm\Delta T_{НВ2}}\right)=$$
$$=\left(\frac{t_{x1}}{T_{НВ1}}\right)^{(k_{ф1}-k^0_{ф1})}-(k_{ф1}-k^0_{ф1})\ln\left(\frac{t_{x1}}{T_{НВ1}}\right)-\ln\frac{\xi_{x2}-\xi_{x0}}{\xi_{x1}-\xi_{x0}} \qquad (32)$$

або

$$\left(\frac{t_{x2}}{T_{НВ2}}\right)^{(k_{ф2}-k^0_{ф2})}-(k_{ф2}-k^0_{ф2})\cdot\ln\left(\frac{t_{x2}}{T_{НВ2}}\right)=\left(\frac{t_{x1}}{T_{НВ1}}\right)^{(k_{ф1}-k^0_{ф1})}-(k_{ф1}-k^0_{ф1})\ln\left(\frac{t_{x1}}{T_{НВ1}}\right)-\ln\frac{\xi_{x2}-\xi_{x0}}{\xi_{x1}-\xi_{x0}}, \qquad (33)$$

де $T_{НВ2}$ – остаточно встановлений час МВ СС за другої повірки; $k^0_{ф1}=1$; $k^0_{ф2}=1$; $\Delta t_{п2}$ – інтервал часу від початку першої до початку другої повірки; $\pm\Delta k_{ф2}$ – зміни (приріст) параметра форми відносно його значення, отриманого в момент часу t_{x1}; $\pm\Delta T_{НВ2}$ – приріст часу напрацювання на МВ відносно $T_{НВ1}$.

Отримане значення часу напрацювання на МВ, що дорівнює, наприклад, $T_{НВ2}=26,7$ років запам'ятовується. За встановленим значенням параметрів $T_{НВ2}$ і $k_{ф2}$ ФР на графічному портреті ІФ-моделі МВ остаточно проводиться (будується) прогнозна крива 3, що проходить через точку *A*, точку *B*, відповідну похибці $\xi_{x1}(t_{x1})=-0,22$ і точку *C*, відповідну похибці $\xi_{x2}(t_{x2})=-0,23\pm 0,15$ (рис. 3, крива 3 при $k_{ф2}=5$ і $T_{НВ2}=26,7$ років). Із отриманого графічного портрету видно, що на момент часу другої повірки настання МВ СС відбудеться не після 25,5 років використання (експлуатації) СС, а після 23,8 років (рис. 3, область невизначеності з точкою *R*3 на кривій 3) замість прогнозних 30 років.

Отримані за другої і першої повірок дані і графіки документуються з метою використання при проведенні третьої повірки СС на паперовому і електронному носіях з додаванням графічного портрету ІФ-моделі МВ СС.

При визначенні часу напрацювання на МВ завжди необхідно пам'ятати і враховувати, що ФР є метрологічною функцією. Тому значення часу напрацювання на МВ має визначатися з вказівкою

значень верхньої і нижньої допустимих меж смуги невизначеності відносно встановленого прогнозного значення.

Визначення значень верхньої і нижньої допустимих меж смуги невизначеності часу напрацювання на метрологічну відмову. При проведенні другої повірки значення верхньої допустимої межі $T_{\text{НВ2в}}$ смуги невизначеності, тобто

$$\{T_{\text{НВ2в}}\} = \{T_{\text{НВ2}}\} + \{\Delta_{T_{\text{НВ2в}}}\} \tag{34}$$

визначається з урахуванням знака значень абсолютних похибок $\Delta_{T_{\text{НВ2в}}}$, $\Delta_{k\text{ф2в}}$ і $\Delta_{t_{\text{п2в}}}$ визначення часу напрацювання на МВ, параметра форми і верхньої межі смуги невизначеності $\Delta\xi_{\text{дв0}}$ похибки ξ_{x0}, відповідно.

Верхня допустима межа $T_{\text{НВ2в}}$ смуги невизначеності визначається за отриманим у неявному вигляді рівнянням вимірювань

$$\begin{aligned}&\left(\frac{t_{x2}+\Delta_{t_{\text{п2в}}}}{T_{\text{НВ2в}}}\right)^{(k_{\text{ф}2}-k^0_{\text{ф}1}+\Delta_{k_{\text{ф2в}}})} - (k_{\text{ф}2}-k^0_{\text{ф}1}+\Delta_{k_{\text{ф2в}}})\cdot\ln\left(\frac{t_{x2}+\Delta_{t_{\text{п2в}}}}{T_{\text{НВ2в}}}\right) = \\ &= \left(\frac{t_{x1}}{T_{\text{НВ1}}}\right)^{(k_{\text{ф}1}-k^0_{\text{ф}1})} - (k_{\text{ф}1}-k^0_{\text{ф}1})\ln\left(\frac{t_{x1}}{T_{\text{НВ1}}}\right) - \ln\frac{\overline{\xi_{x2}}(t'_{x2}) - (\overline{\xi_{x0}}(t_{x0}) + \Delta\xi_{\text{дв0}})}{\overline{\xi_{x1}}(t_{x1}) - \overline{\xi_{x0}}(t_{x0})},\end{aligned} \tag{35}$$

де $T_{\text{НВ2в}} = T_{\text{НВ2}} + \Delta_{T_{\text{НВ2в}}} = T_{\text{НВ1}} \pm \Delta T_{\text{НВ2}} + \Delta_{T_{\text{НВ2в}}}$ – верхня допустима межа смуги невизначеності; $\overline{\xi_{x2}}(t'_{x2})$ – похибка результату багаторазових вимірювань зразкової ФВ x_0 в момент часу t'_{x2} ($\{t'_{x2}\} = \{t_{x1}\} + (\{\Delta t_{\text{п2}}\} + \{\Delta_{t_{\text{п2в}}}\} = \{t_{x2}\} + \{\Delta_{t_{\text{п2в}}}\})$.

Після цього визначається значення

$$\{T_{\text{НВ2н}}\} = \{T_{\text{НДГ}}(t_{x2})\} = \{T_{\text{НВ2}}\} + \{\Delta_{T_{\text{НВ2н}}}\} \tag{36}$$

нижньої допустимої межі $T_{\text{НВ2н}}$ смуги невизначеності також з урахуванням знака значень абсолютних похибок $\Delta_{T_{\text{НВ2н}}}$, $\Delta_{k\text{ф2н}}$ і $\Delta_{t_{\text{п2н}}}$ визначення часу напрацювання на МВ, параметра форми, моменту часу t_{x2} проведення другої повірки і похибки визначення значення нижньої межі $\Delta\xi_{\text{дн0}}$ смуги невизначеності похибки ξ_{x0}, відповідно.

В результаті нижня допустима межа визначається відповідно до рівняння вимірювання

$$\begin{aligned}&\left(\frac{t_{x2}-\Delta_{t_{\text{п2н}}}}{T_{\text{НВ2н}}}\right)^{(k_{\text{ф}2}-k^0_{\text{ф}1}-\Delta_{k_{\text{ф2н}}})} - (k_{\text{ф}2}-k^0_{\text{ф}1}-\Delta_{k_{\text{ф2н}}})\cdot\ln\left(\frac{t_{x2}-\Delta_{t_{\text{п2н}}}}{T_{\text{НВ2н}}}\right) = \\ &= \left(\frac{t_{x1}}{T_{\text{НВ1}}}\right)^{(k_{\text{ф}1}-k^0_{\text{ф}1})} - (k_{\text{ф}1}-k^0_{\text{ф}1})\cdot\ln\left(\frac{t_{x1}}{T_{\text{НВ1}}}\right) - \ln\frac{\overline{\xi_{x2}}(t''_{x2}) - (\overline{\xi_{x0}}(t_{x0}) - \Delta\xi_{\text{дн0}})}{\overline{\xi_{x1}}(t_{x1}) - (\overline{\xi_{x0}}(t_{x0})},\end{aligned} \tag{37}$$

де $T_{\text{НВ2н}} = T_{\text{НВ2}} - \Delta_{T_{\text{НВ2н}}} = T_{\text{НВ1}} \pm \Delta T_{\text{НВ2}} - \Delta_{T_{\text{НВ2н}}}$ – нижня допустима межа смуги невизначеності; $\overline{\xi_{x2}}(t''_{x2})$ – відносна похибка результату багаторазових вимірювань зразкової ФВ x_0 в момент часу t''_{x2} ($\{t''_{x2}\} = \{t_{x1}\} + (\{\Delta t_{\text{п2}}\} - \{\Delta_{t_{\text{п2н}}}\})$.

Необхідно зазначити, що при визначенні верхньої і нижньої меж смуги невизначеності можна враховувати і відповідні (верхнє і нижнє) значення меж смуг, отримані при першій повірці, тобто значення $\{T_{\text{НВ1в}}\}$ і $\{T_{\text{НВ1н}}\}$, замість $T_{\text{НВ1}}$ у (35) і (37). Увесь сенс у тому, що потрібні різні витрати часу на вирішення рівнянь величин (35) і (37), заданих у неявному вигляді. Це зумовлено різними витратами часу на підбір значень приростів $\pm\Delta T_{\text{НВ2}}$ при визначенні значень $T_{\text{НВ1в}}$ і $T_{\text{НВ1н}}$.

Визначення ширини смуги невизначеності значень часу напрацювання на МВ

Ширина смуги невизначеності значень часу напрацювання на МВ і приросту $\Delta T_{\text{НВ2в}}$ і $\Delta T_{\text{НВ2н}}$ до верхньої і нижньої довірчих меж визначаються відомим методом. Так, наприклад, значення смуги невизначеності значень часу напрацювання на МВ може бути визначено за рівнянням числових значень

$$\{\Delta T_{\text{НВ2}}\} = \{T_{\text{НВв}}(t_{x2})\} - \{T_{\text{НВн}}(t_{x2})\}. \tag{38}$$

Прирости часу напрацювання на МВ до верхньої і нижньої допустимих меж смуги невизначеності визначаються, відповідно, за рівняннями числових значень:

$$\{\Delta T_{\text{НВ2в}}\} = \{T_{\text{НВв}}(t_{x2})\} - \{T_{\text{НВ2}}(t_{x2})\}, \tag{39}$$

$$-\{\Delta T_{\text{НВ2н}}\} = \{T_{\text{НВ2}}(t_{x2})\} - \{T_{\text{НВн}}(t_{x2})\}. \tag{40}$$

Отримані значення $T_{\text{НВ2в}}$, $T_{\text{НВ2н}}$, $\Delta_{T_{\text{НВ2в}}}$ і $\Delta_{T_{\text{НВ2н}}}$ запам'ятовуються.

Проведення третьої повірки. Допустимо, що наступна – третя повірка СС здійснюється в момент часу t_{x3}, що дорівнює 12 год. 00 хв. 07.11.2017 року (рис. 4). Практично значення моменту часу t_{x3} визначається за рівнянням числових значень

$$\{t_{x3}\} = \{t_{xi}\}|_{\text{при}\,i=3} = (\{t_{x(i-1)}\} - \{t_{\text{п}i}\})|_{\text{при}\,i=3} = \{t_{x2}\} + \{\Delta t_{\text{п3}}\}, \tag{41}$$

де $\{\Delta t_{\text{п3}}\}$ – значення інтервалу часу між другою і третьою повірками.

Результат розрахунків (41) запам'ятовується. Значення ширини смуги невизначеності інтервалу часу повірки з урахуванням похибок $+\Delta_{t_{\text{п3в}}}$ і $-\Delta_{t_{\text{п3н}}}$ дорівнюють:

$$\{\Delta t_{\text{п3в}}\} = \{\Delta t_{\text{п3}}\} + \{\Delta_{t_{\text{п3в}}}\}, \tag{42}$$

$$\{\Delta t_{\text{п3н}}\} = \{\Delta t_{\text{п3}}\} - \{\Delta_{t_{\text{п3н}}}\}. \tag{43}$$

У загальному випадку

$$\{\Delta t_{\text{п3}}\} \neq \{\Delta t_{\text{п2}}\}, \tag{44}$$

$$|\{+\Delta_{t_{\text{п3в}}}\}| \neq |\{-\Delta_{t_{\text{п3н}}}\}|. \tag{45}$$

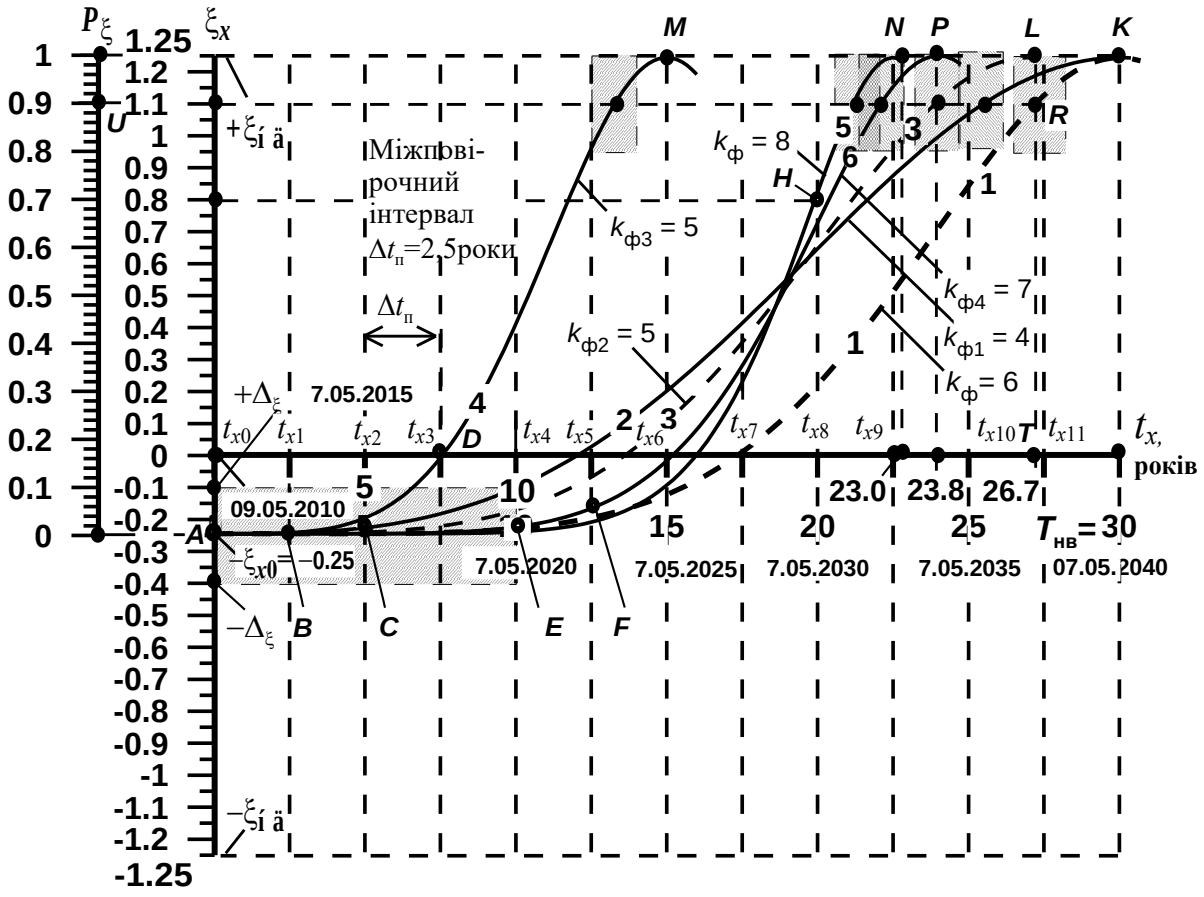

РИС. 4. Графічний портрет ІФ-моделі МВ СС, що пояснює суть методу визначення часу напрацювання на МВ (за результатами шести повірок)

У наступні календарні моменти часу повірки СС (t_{x3}, t_{x4} і т. д.) аналогічним чином проводиться визначення значень параметрів ФР. При отриманні за k-ї повірки значення $T_{\text{НВП}} = (0{,}8 - 0{,}9)T_{\text{НВ}}$ вирішується питання про дроблення інтервалу часу, що залишився, на мілкіші інтервали, наприклад, що відповідають $\Delta t_{\text{п}}^{'}$ =1рік .

Опишемо одну із особливостей запропонованого метода визначення часу напрацювання на МВ, пов'язаного з поняттям «умовного промаху», на прикладі третьої повірки СС. Під «умовним промахом» розуміємо реальний результат повірки СС, який «спростовується» лише за наступної повірки.

При проведенні третьої повірки в установлений момент календарного часу t_{x3} зразкова ФВ x_0 знову багаторазово вимірюється СС, що повіряється, а отримані результати статистично обробляються. В результаті отримуємо:

середнє значення (і відповідний знак) похибки

$$\xi_{x3} = \overline{\xi_{x3}}(t_{x3}) = \overline{\Delta_{o3}} / x_0 , \tag{46}$$

де $\overline{\xi_{x3}}(t_{x3}^{'})$ – середня за значенням абсолютна похибка вимірювання;

верхню ($\Delta\xi_{3в}$) і нижню ($\Delta\xi_{3н}$) смуги невизначеності відносної похибки ξ_{x3} на момент часу t_{x3}, тобто

$$\Delta\xi_{3в} = k_{з3}\sigma_{в3}[\Delta_{о3}] / x_0 = k_{з3}\xi_{\sigma в3}, \tag{47}$$

$$\Delta\xi_{3н} = k_{з3}\sigma_{н3}[\Delta_{о3}] / x_0 = k_{з3}\xi_{\sigma н3}, \tag{48}$$

де $k_{з3}$ – коефіцієнт запасу ($1 \le k_{з3} \le 1,42$),

$$\sigma_{в3}[\Delta_{о3}] = +\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left((x_{оi} - \overline{x_{о3}})_{>0}\right)^2}{n(n-n^0)}} \tag{49}$$

– середньоквадратичне відхилення результатів вимірювання, якщо знак відхилення $x_{оi} - \overline{x_{о3}}$ позитивний,

$$\sigma_{н3}[\Delta_{о3}] = +\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left((x_{оi} - \overline{x_{о3}})_{<0}\right)^2}{n(n-n^0)}} \tag{50}$$

– середньоквадратичне відхилення результатів вимірювання, якщо знак відхилення $x_{оi} - \overline{x_{о3}}$ негативний; $\overline{x_{о3}}$ – середнє значення результату вимірювання зразкової ФВ x_0; $\sigma_{в3}$ і $\sigma_{н3}$ – верхнє і нижнє середньоквадратичне відхилення результатів вимірювання на момент часу t_{x3}.

Похибка ξ_{x3} (46) вимірювання зразкової ФВ x_0 у момент часу t_{x3} проведення третьої повірки може набувати різні випадкові значення і знаки. Припустимо, що $\xi_{x3} = 0,01 \pm 0,15$ (рис. 4, точка D кривої 4).

Далі у t_{x3}-й момент часу (після проведення перших двох повірок) визначається і запам'ятовується знак і значення приросту

$$\Delta\xi_{x32} = \overline{\xi_{x3}}(t_{x3}) - \overline{\xi_{x2}}(t_{x2}). \tag{51}$$

Потім аналізуються і враховуються значення і знаки приростів $\Delta\xi_{x10}$ (33), $\Delta\xi_{x20}$ (34), а також знак поточного приросту $\Delta\xi_{x32}$ (51), отримані в моменти часу t_{x0}, t_{x2} і t_{x3} повірок. Дані значення і знаки порівнюють між собою і вирішують питання про зміну знака (і напрямку) змінної складової ФР Кондратова – Вейбулла.

Допустимо, що всі знаки отриманих приростів (21), (22) і (51) є позитивними і має місце умова (24). У цьому випадку позитивний знак змінної складової ФР також не змінюється.

Після цього визначається можливе (теоретичне або прогнозне) значення похибки відповідно до рівняння вимірювання

$$\xi_{т3} = S_\xi \cdot \left(\frac{t_{x3}}{T_{НВ2}}\right)^{k_{фл2} - k^0_{фл2}} \exp\left(-\left(\frac{t_{x3}}{T_{НВ2}}\right)^{k_{фл2} - k^0_{фл2}}\right) + \xi_{x0}, \tag{52}$$

яке мало б місце в момент часу t_{x3} при прогнозних значеннях часу напрацювання на МВ $T_{\text{НВ2}}$ (в роках) і значенні параметра форми $k_{\text{ф}2}$, отриманих при проведенні попередньої (другої) повірки.

Отримане значення теоретичної похибки $\xi_{\text{т}3}$ (52) запам'ятовується і порівнюється з практично отриманим у момент часу t_{x3} середнім значенням відносної похибки $\overline{\xi_{x3}}$ (46). Для цього визначаються знак і абсолютне значення різниці похибок вимірювання, тобто

$$\Delta\xi_{x\text{т}3} = \overline{\xi_{x3}}(t_{x3}) - \xi_{\text{т}3}(t_{x3}) = \xi_{x3} - \xi_{\text{т}3}. \tag{53}$$

З урахуванням знаків різниць $\Delta\xi_{x\text{т}2}$ (32) і $\Delta\xi_{x\text{т}3} \cong 0 \pm \Delta_{\xi x\text{т}3}$ (53), значення параметра форми $k_{\text{ф}2}$ і часу напрацювання на МВ $T_{\text{НВ2}}$ почергово змінюються до найімовірніших (з деякою похибкою) числових значень $\{k'_{\text{ф}3}\}$ і $\{T'_{\text{НВ3}}\}$. При вказаних параметрах прогнозної ФР значення різниць $\Delta\xi_{x\text{т}2}$ (31) і $\Delta\xi_{x\text{т}3}$ (53) дорівнюватимуть нулю (тобто $\{\Delta\xi_{x\text{т}2}\} \cong 0 \pm \{\Delta_{\xi x\text{т}2}\}$ і $\{\Delta\xi_{x\text{т}3}\} \cong 0 \pm \{\Delta_{\xi x\text{т}3}\}$) у межах заданих значень похибок $\pm\Delta_{\xi x\text{т}2}$ і $\pm\Delta_{\xi x\text{т}3}$, тобто у випадку, коли верхня і нижня смуги невизначеності значень різниць $\Delta\xi_{x\text{т}2}$ і $\Delta\xi_{x\text{т}3}$ рівні між собою: $\{\Delta_{\xi x\text{т}2\text{в}}\} = |\{-\Delta_{\xi x\text{т}2\text{н}}\}| = \{\Delta_{\xi x\text{т}2}\}$ і $\{\Delta_{\xi x\text{т}3\text{в}}\} = |\{-\Delta_{\xi x\text{т}3\text{н}}\}| = \{\Delta_{\xi x\text{т}3}\}$.

При досягненні рівності нулю третьої різниці $\Delta\xi_{x\text{т}3}$ (53) ($\{\Delta\xi_{x\text{т}3}\} = 0$) – за рахунок зміни часу напрацювання на МВ, перевіряється виконання умови рівності нулю другої різниці $\Delta\xi_{x\text{т}2}$ (44) (тобто $\{\Delta\xi_{x\text{т}2}\} = 0?$). При її невиконанні, тобто при $\{\Delta\xi_{x\text{т}2}\} \neq 0$ і при отриманому значені часу напрацювання на МВ, змінюється значення параметра форми $k'_{\text{ф}3}$ до найімовірнішого (дійсного) значення, наприклад, $k_{\text{ф}3} = 5$, при якому значення другої різниці стає рівним нулю ($\{\Delta\xi_{x\text{т}2}\} = 0$). Необхідно зазначити, що значення параметра форми $k_{\text{ф}3}$ встановлюється з похибкою $+\Delta_{k_{\text{ф}3\text{в}}}$ або $-\Delta_{k_{\text{ф}3\text{н}}}$.

Найімовірніше (дійсне) значення часу $T_{\text{НВ3}}$ ($\{T_{\text{НВ3}}\} = \{T_{\text{НВ3}}(t_{x3})\} = \{T_{\text{НВ2}}\} \pm \{\Delta T_{\text{НВ3}}\}$) напрацювання на МВ (на момент часу t_{x3} ($\{t_{x3}\} = \{t_{x2}\} + \{\Delta t_{x3}\}$)) визначається за отриманим у неявному вигляді рівнянням вимірювання

$$\begin{aligned}
&\left(\frac{t_{x2} + \Delta t_{x3}}{T_{\text{НВ2}} \pm \Delta T_{\text{НВ3}}}\right)^{(k_{\text{ф}2} - k^0_{\text{ф}2} \pm \Delta k_{\text{ф}3})} - (k_{\text{ф}2} - k^0_{\text{ф}2} \pm \Delta k_{\text{ф}3}) \cdot \ln\left(\frac{t_{x2} + \Delta t_{x3}}{T_{\text{НВ2}} \pm \Delta T_{\text{НВ3}}}\right) = \\
&= \left(\frac{t_{x2}}{T_{\text{НВ2}}}\right)^{(k_{\text{ф}2} - k^0_{\text{ф}2})} - (k_{\text{ф}2} - k^0_{\text{ф}2}) \cdot \ln\left(\frac{t_{x2}}{T_{\text{НВ2}}}\right) - \ln\frac{\xi_{x3} - \xi_{x0}}{\xi_{x2} - \xi_{x0}}
\end{aligned} \tag{54}$$

або

$$\left(\frac{t_{x3}}{T_{\text{НВ3}}}\right)^{(k_{\text{фд}3} - k^0_{\text{ф}2})} - (k_{\text{ф}3} - k^0_{\text{ф}2}) \cdot \ln\left(\frac{t_{x3}}{T_{\text{НВ3}}}\right) = \left(\frac{t_{x2}}{T_{\text{НВ2}}}\right)^{(k_{\text{ф}2} - k^0_{\text{ф}2})} - (k_{\text{ф}2} - k^0_{\text{ф}2}) \cdot \ln\left(\frac{t_{x2}}{T_{\text{НВ2}}}\right) - \ln\frac{\xi_{x3} - \xi_{x0}}{\xi_{x2} - \xi_{x0}}, \tag{55}$$

де Δt_{x3} – інтервал часу до початку третьої повірки; $k^0_{\text{ф}2}=1$; $k^0_{\text{ф}3}=1$.

Отримане із рівнянь (54) або (55) значення часу напрацювання на МВ дорівнює, наприклад, $T_{\text{НВ}3}=15$років, запам'ятовується. Необхідно враховувати, що в загальному випадку $T_{\text{НВ}3}$ також визначається з урахуванням похибок $\Delta_{t_{\text{п}3\text{в}}}$ і $\Delta_{t_{\text{п}3\text{н}}}$ визначення моменту часу t_{x3}.

Після визначення значень $k_{\text{ф}3}=5$ і $T_{\text{НВ}3}=15$років будується крива ФР на графічному портреті ІФ-моделі МВ (рис. 4, крива 4), що проходить через робочу точку *A*, відповідну похибці $\xi_{x0}(t_{x0})=-0,25\pm0,15$, робочу точку *C*, відповідну похибці $\xi_{x2}(t_{x2})=-0,23\pm0,15$, і точку *D*, відповідну похибці $\xi_{x3}=0,01\pm0,15$ (рис. 4, крива 4 при $k_{\text{ф}2}=5$ і $T_{\text{НВ}2}=15$років).

За отриманими даними МВ СС може настати вже після 13,3 – 15,0 років її використання (експлуатації). Ці дані суттєво відрізняються від отриманих за попередньої повірки. Оскільки до настання МВ в запасі є інтервал часу, що відповідає двом – трьом повіркам, то МВ не проявиться ще протягом 5 – 6 років. За цей час буде проведена четверта повірка, яка внесе ясність в результат третьої повірки.

При проведенні третьої повірки визначається також значення верхньої допустимої межі $T_{\text{НВ}\text{в}}(t_{x3})$ смуги невизначеності значень часу напрацювання на МВ. Визначення її значення

$$\{T_{\text{НВ}3\text{в}}\}=\{T_{\text{НВ}3}\}+\{\Delta_{T_{\text{НВ}3\text{в}}}\} \tag{56}$$

здійснюється з урахуванням знака отриманих значень похибок часу $T_{\text{НВ}2}$ напрацювання у на МВ, параметра форми, моментів часу проведення другої повірки і верхньої межі смуги невизначеності похибки ξ_{x0}, тобто $\Delta_{T_{\text{нв}3\text{в}}}$, $\Delta_{k\text{ф}3\text{в}}$, $\Delta_{t_{\text{п}3\text{в}}}$ і різниці $\Delta\xi_{\text{дн}0}$.

Значення верхньої допустимої межі $T_{\text{НВ}3\text{в}}$ смуги невизначеності визначається за рівнянням вимірювань

$$\begin{aligned}&\left(\frac{t_{x3}+\Delta_{t_{\text{п}3\text{в}}}}{\Delta T_{\text{НВ}3\text{в}}}\right)^{(k_{\text{ф}3}-k^0_{\text{ф}2}+\Delta_{k_{\text{ф}3\text{в}}})}-(k_{\text{ф}3}-k^0_{\text{ф}2}+\Delta_{k_{\text{ф}3\text{в}}})\cdot\ln\left(\frac{t_{x3}+\Delta_{t_{\text{п}3\text{в}}}}{T_{\text{НВ}3}+\Delta_{T_{\text{НВ}3\text{в}}}}\right)=\\&=\left(\frac{t_{x2}}{T_{\text{НВ}2}}\right)^{(k_{\text{ф}2}-k^0_{\text{ф}2})}-(k_{\text{ф}2}-k^0_{\text{ф}2})\cdot\ln\left(\frac{t_{x2}}{T_{\text{НВ}2}}\right)-\ln\frac{\overline{\xi_{x3}}(t'_{x3})-(\overline{\xi_{x0}}(t_{x0})+\Delta\xi_{\text{дв}0})}{\overline{\xi_{x2}}(t_{x2})-\overline{\xi_{x0}}(t_{x0})},\end{aligned} \tag{57}$$

де $T_{\text{НВ}3\text{в}}=T_{\text{НВ}3}+\Delta_{T_{\text{НВ}3\text{в}}}$ – верхня допустима межа смуги невизначеності; $\overline{\xi_{x3}}(t'_{x3})$ – похибка результату багаторазових вимірювань зразкової ФВ x_0 в момент часу t'_{x3} ($\{t'_{x3}\}=\{t_{x3}\}+\{\Delta_{t_{\text{п}3\text{в}}}\}$).

Далі, як і при другій повірці, визначається і запам'ятовується значення нижньої допустимої межі $T_{\text{НВ}3\text{н}}(t_{x3})$ смуги невизначеності значень часу напрацювання на МВ, тобто

$$\{T_{\text{НВ}3\text{н}}\}=\{T_{\text{НВ}3}\}-\{\Delta_{T_{\text{НВ}3\text{н}}}\}. \tag{58}$$

Це значення визначається з урахуванням знака і значень абсолютних похибок $\Delta_{T_{\text{НВ}3\text{н}}}$, $\Delta_{k\text{ф}3\text{н}}$, $\Delta_{t_{\text{п}3\text{н}}}$ і різниці $\Delta\xi_{\text{дн}0}$ за рівнянням вимірювання

$$\left(\frac{t_{x3}-\Delta_{t_{\text{п3н}}}}{\Delta T_{\text{НВ3н}}}\right)^{(k_{\text{ф3}}-k^0_{\text{ф2}}-\Delta_{k_{\text{ф3н}}})}-(k_{\text{ф3}}-k^0_{\text{ф2}}-\Delta_{k_{\text{ф3н}}})\cdot\ln\left(\frac{t_{x3}-\Delta_{t_{\text{п3н}}}}{T_{\text{НВ3}}-\Delta_{T_{\text{НВ3н}}}}\right)=$$
$$=\left(\frac{t_{x2}}{T_{\text{НВ2}}}\right)^{(k_{\text{ф2}}-k^0_{\text{ф2}})}-(k_{\text{ф2}}-k^0_{\text{ф2}})\cdot\ln\left(\frac{t_{x2}}{T_{\text{НВ2}}}\right)-\ln\frac{\overline{\xi_{x3}}(t^{"}_{x3})-(\overline{\xi_{x0}}(t_{x0})-\Delta\xi_{\text{дн0}})}{\overline{\xi_{x2}}(t_{x2})-\overline{\xi_{x0}}(t_{x0})}, \quad (59)$$

де $T_{\text{НВ3н}}=T_{\text{НВ3}}-\Delta_{T_{\text{НВ3н}}}$ – нижня допустима межа смуги невизначеності; $\overline{\xi_{x3}}(t_{x3}-\Delta_{t_{\text{п3н}}})$ – похибка результатів багаторазових вимірювань нормованої за значенням ФВ x_0 в момент часу $t^{"}_{x3}$ ($\{t^{"}_{x3}\}=\{t_{x3}\}-\{\Delta_{t_{\text{п3н}}}\}$).

Про значення ширини смуги невизначеності часу $T_{\text{НВ3}}$ напрацювання на МВ судять відповідно до рівняння числових значень

$$\Delta T_{\text{НВ3}}=T_{\text{НВ3в}}(t^{"}_{x3})-T_{\text{НВ3н}}(t^{'}_{x3}). \quad (60)$$

Потім визначається значення приросту часу напрацювання на МВ до верхньої і нижньої допустимих меж смуги невизначеності, відповідно:

$$\{\Delta T_{\text{НВ3в}}\}=\{T_{\text{НВ3в}}\}-\{T_{\text{НВ3}}\}, \quad (61)$$

$$\{\Delta T_{\text{НВ3н}}\}=\{T_{\text{НВ3}}\}-\{T_{\text{НВ3н}}\}. \quad (62)$$

Отримані значення $\{T_{\text{НВ3}}\}$, $\{T_{\text{НВ3в}}\}$, $\{T_{\text{НВ3н}}\}$, $\{\Delta T_{\text{НВ3в}}\}$ і $\{\Delta T_{\text{НВ3н}}\}$ запам'ятовуються.

Досить мале значення часу напрацювання на МВ $T_{\text{НВ3}}=15$років (рис. 4, крива 4), отримане при проведені третьої повірки, зумовлено тим, що приріст похибки $\Delta\xi_{x32}=\xi_{x3}-\xi_{x2}$ суттєво змінився. Однак, при проведені четвертої повірки виявилося, що значення похибки $\xi_{x3}=0,01\pm0,15$ є «умовним промахом», оскільки на момент часу t_{x4} проведення четвертої повірки отримано значення похибки $\xi_{x4}=-0,24\pm0,15$ сумірне з похибкою $\xi_{x2}=-0,22\pm0,15$. На момент часу t_{x4} значення параметрів ФР склали: $k_{\text{ф4}}=8$ і $T_{\text{НВ4}}=23$роки.

Після визначення значень параметрів $k_{\text{ф4}}$ і $T_{\text{НВ4}}$ будується крива ФР на графічному портреті ІФ-моделі МВ, що проходить через три точки: робочу точку *A*, відповідну похибці $\xi_{x0}(t_{x0})=-0,25\pm0,15$, робочу точку *C*, відповідну похибці $\xi_{x2}(t_{x2})=-0,23\pm0,15$, і точку *E*, відповідну похибці $\xi_{x4}=-0,24\pm0,15$ (рис. 4, крива 5 при $k_{\text{ф4}}=8$ і $T_{\text{НВ4}}=23$роки).

Допустимо, що при проведенні 5-ї повірки в момент часу t_{x5} отримують, наприклад, $\xi_{x5}=-0,17\pm0,15$ (рис. 4, точка *F* кривої 6). Відповідно до описаних операцій визначаються параметри ФР і через три точки (*A*, *E* і *F*) проводять криву ФР, вершина якої буде торкатися прямої, яка відповідає верхньому граничному значенню похибки $\xi_{\text{нд}}$ в точці *P*, що відповідає $T_{\text{НВ5}}=23,8$роки. Відповідно до запропонованого метода точки *B* і *C* не враховуються.

Графічний портрет ІФ-моделі МВ СС для всіх п'яти моментів часу повірок (рис. 4) додається до документів на СС. Він відображає реальну динаміку ФР від повірки до повірки і може бути використаним для подальших досліджень СС на МН.

Процес повірок аналогічним чином повторюється до моменту часу, при якому $P_{\xi} = 0{,}8...0{,}9$, $\xi_{xk}(t_{xk}) = (0{,}8...0{,}9)\xi_{НД}$ або $T_{НВk} = (0{,}8...0{,}9)T_{НВ}$.

Подальший процес визначення дійсного значення $T_{НВ}$ потребує перегляду тривалості інтервалів часу між повірками.

Після проведення всіх повірок отримані поточні значення похибок, часу напрацювання на МВ, значення ширини смуги невизначеності і значення приростів часу напрацювання на МВ до верхньої і нижньої меж документуються та запам'ятовуються в базі знань повірочної лабораторії.

Висновки. Вперше в світі описано запатентований в Україні метод вимірювання (метод динамічного прогнозування) часу напрацювання СС на МВ на основі синтезованої ймовірнісно-фізичної моделі МВ СС, що описується багатопараметровою ФР Кондратова – Вейбулла з керованими (гнучкими) параметрами.

Динамічні регресійні ІФ-моделі МВ являють собою поєднання можливостей регресійних моделей, що використовують гнучкі багатопараметрові ФР, з можливістю використання динамічних (просторово-часових) умов, що охоплюють різні тенденції зміни значень похибок, що нормуються, і смуги їх невизначеності, довірчої ймовірності, часових рамок, допустимих граничних умов тощо.

Динамічні регресійні ІФ-моделі МВ СС дозволяють зрозуміти взаємозв'язок між змінними ФР і допускають можливість дослідження метрологічних задач («сценаріїв») виду «що, якщо …». Стверджується, що генерація повного набору альтернативних сценаріїв може допомогти метрологам визначити ефективну стратегію створення і експлуатації високонадійних СС.

Метод динамічної регресії – це сукупність прийомів зворотно-поступального наближення значень параметра зсуву динамічної ІФ-моделі МВ до прогнозного значення параметра зсуву статичної ІФ-моделі МВ СС, а також прийомів оцінки достовірності і точності прогнозування та визначення часу напрацювання на МВ за відповідними рівняннями вимірювання і рівняннями похибок. Надані ще шість видів визначення методу динамічної регресії з наголосом на різні його аспекти.

Показано, що в основу метода динамічної регресії покладено виконання сукупності з чотирнадцяти операцій або етапів.

Вперше у світі описана суть нового методу визначення часу напрацювання СС на МВ з використанням ІФ-моделі МВ на основі ФР Кондратова – Вейбулла.

Стверджується, що вирішення завдань динамічного прогнозування і визначення часу напрацювання на МВ може бути надано деякій експертній системі (ЕС), на яку можуть бути покладені функції накопичення, аналізу і обробки різноманітних статистичних даних повірок, вибору і побудови ІФ-моделі МВ СС, створення графічних моделей тощо.

Для вирішення задач МН кожна СС має мати документ, що представляє собою індивідуальний графічний портрет ІФ-моделі МВ СС.

Вперше в світі розроблено і представлено графічний портрет імовірнісно-фізичної моделі МВ відмов СС в об'єднаній системі шкал (координат) – із шкалами «ймовірність МВ P_{ξ} і «похибка, що нормується, ξ_x» та роздільних або суміщених шкал «інтервальної шкали часу t_x» і «шкали календарного часу».

Вперше описана послідовність проведення операцій вимірювання нормованої за значенням (зразкової) ФВ x_0 засобом вимірювання, що повіряється, порівняння практично і теоретично отриманих даних, їх обробки і використання для визначення параметрів прогнозної ФР за відповідними рівняннями вимірювання та її побудова з метою відображення динаміки «метрологічного старіння» засобу вимірювання від повірки до повірки.

Показано важливість підбору зразкової ФВ x_0 в області максимальної чутливості ФП СС, що забезпечує отримання максимального значення похибки результату вимірювання і достовірні значення смуги невизначеності.

Зазначається необхідність визначення часу проведення першої повірки і переважно неперіодичних повірок з метою економії витрат на їх проведення.

Звертається особлива увага повірників на необхідність обліку того факту, що ймовірнісна міра МВ є метрологічним числом і має свою смугу невизначеності, що залежить від смуги невизначеності похибки вимірювання зразкової ФВ x_0 в моменти часу проведення кожної повірки. В зв'язку з цим похибка визначення часу напрацювання на МВ може складати від сотень годин до декількох років.

Показана можливість появи «умовних промахів» при визначенні похибки і часу напрацювання на МВ при проведенні тієї чи іншої повірки. Їх існування встановлюється лише після проведення наступної повірки, аналізу отриманих даних і накреслення кривої ФР на графічному портреті.

Рекомендується час між повірками вибирати кратним одному року, а повірки здійснювати в один і той же день і місяць року. Тим самим буде враховано дію глобальних, посезонних дестабілізуючих факторів на фізичні, фізико-хімічні і хімічні процеси старіння і деградації матеріалів і речовин функціональних блоків і елементів СС.

Метод динамічної регресії є ефективним і універсальним методом завдяки забезпеченню високої точності прогнозування і визначення часу напрацювання на МВ та може бути реалізованим також при ІФ-моделях МВ на основі ФР Кондратова – Коши, Кондратова – Лапласа та інших.

Список літератури

1. Кондратов В.Т. Метрологическое обеспечение безпроводных сенсорных систем. *Кібернетика та комп'ютерні технології.* 2020. № 1. С. 83–92. https://doi.org/10.34229/2707-451X.20.1.9
2. Вариационные принципы механики. *«Физическая Энциклопедия»* /Phys.Web.Ru/ http://www.astronet.ru/db/msg/1172894 (звернення: 20.02.2022)
3. Кондратов В.Т. Теория метрологической надежности: графический портрет вероятностно-физической модели метрологических отказов средств измерений. Сообщение 1. *Метрология и измерительная техника*. 2010. № 4 . С. 147–153.
4. Кондратов В.Т. Теория метрологической надежности: функция распределения Кондратова – Вейбулла. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* 2008. № 3. С. 101–113.
5. Кондратов В.Т. Теория метрологической надежности: функция распределения Кондратова – Вейбулла и ее основные разновидности. Научные труды XI-й Международной научно-технической конференции *«Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики»*. Книга *«Приборостроение»*. М.: МГУ ПИ, 2008. С. 124–131.
6. Кондратов В.Т. Свойства функции распределения Кондратова-Вейбулла. Научные труды XI-й Международной научно-технической конференции *«Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики»*. Книга *«Приборостроение»*. М.: МГУ ПИ, 2008. С. 131–137.
7. Кондратов В.Т. Расширение функциональных возможностей функции распределения Кондратова – Вейбулла. Научные труды XI-й Международной научно-технической конференции *«Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики»*. Книга *«Приборостроение»*. М.: МГУ ПИ, 2008. С. 138–145.
8. Кондратов В.Т. Функции распределения погрешностей в течение времени наработки на метрологический отказ и их свойства. Сборник докладов V-й международной научно-технической конференции. Под ред. А.А. Данилова. Пенза, 2008. С. 10–22.
9. Кондратов В.Т. Новая стратегия развития теории метрологической надежности. Официальный каталог. V-я Международная специализированная выставка-конкурс средств измерений, испытательного и лабораторного оборудования *«МЕТРОЛОГИЯ-2009»*. Первый Всероссийский симпозиум метрологов. РФ, Москва. 19–21 мая 2009. М.: ВВЦ. С. 48–49.

Одержано 19.06.2022

Кондратов Владислав Тимофійович,
доктор технічних наук, професор
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ.
vladikon@kievnet.com.ua

UDC 006.90.01.39:681.2

Vladislav Kondratov

Predicting and Determining the Time Between Metrological Failures of Smart Systems for Precision Farming

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv
Correspondence: vladikon@kievnet.com.ua

Introduction. Solving the problem of forecasting and determining the operating time for metrological failure and conducting the first calibration of smart systems of precision land use is possible by solving the problem of self-calibration of smart sensors that are part of these smart systems (SS). This problem is solved and described in [1].

The purpose of the paper is the methodology for dynamic prediction and determination of the time between metrological failures (MF) and the first verification of SS designed for precision farming.

Results. The article describes a method patented in Ukraine for measuring the SS operating time for a MF (dynamic prediction method) based on a synthesized probabilistic-physical model (PP-model) of SS MF described by a multi-parameter Kondratov – Weibull distribution function (DF) with controlled (flexible) parameters. The proposed model describes the relationship between the normalized error and the parameters of the metrological reliability (MR) of the SS.

It is shown that the dynamic regression PP-models of MF are a combination of the capabilities of regression models using flexible multi-parameter DF, with the possibility of using dynamic (spatio-temporal) processes covering different trends in the change in the values of normalized errors and their uncertainty bands, confidence level, time frame, acceptable boundary conditions, etc.

Dynamic regression models of MF SS make it possible to understand the relationship between DF variables and allow the possibility of studying metrological problems ("scenarios") of the "what if …" type.

The dynamic regression method is a set of techniques for reciprocating approximation of the values of the shift parameter of the dynamic PP-model of MF to the predicted value of the shift parameter of the static PP-model of MF SS, as well as methods for assessing the reliability and accuracy of forecasting and determination.

The article describes the essence of a new method for determining the operating time of the SS in the MF using the PP-model of the MF based on the Kondratov – Weibull DF. For the first time, a graphical portrait of the PP-model of SS metrological failures in the combined system of scales (coordinates) has been developed and presented - with the scales "probability of metrological failure P_{ξ}" and "normalized error ξ_x" and separate or combined scales of "interval time scale t_x " and "calendar time scale".

The procedure for determining the time of the first verification is described, the advantage of non-periodic verifications is noted in order to save costs for their implementation.

The possibility of occurrence of "conditional misses" in determining the error and time of operation on the MF during one or another verification is shown. Their existence is established only after the subsequent verification, analysis of the obtained data, and drawing the curve of the DF on a graphical portrait.

It is recommended to choose the time between verifications as a multiple of one year, and to carry out verifications on the same day and month of the year.

Conclusions. The dynamic regression method is an effective and versatile method due to the high accuracy of forecasting and determining the operating time in the MF. It can also be implemented using MF PP-models based on the DF of Kondratov - Cauchy, Kondratov - Laplace and others.

Keywords: smart sensor, self-calibration, wireless sensor systems, methods of redundant measurements, problems of metrological support.