

УДК 389.01.621

В.В. Хижняк<sup>1</sup>, А.О. Литовченко<sup>1</sup>, А.Г. Дмитрієв<sup>2</sup><sup>1</sup> Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Київ<sup>2</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИ ФОРМУВАННІ ПРОГРАМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДЕРЖАВНИХ ЕТАЛОНІВ

*Проаналізовано існуючі методи прогнозування стану складних технічних систем та обґрунтовано можливість їх застосування для визначення показників ефективності програм експлуатації державних еталонів.*

**Ключові слова:** державні еталони, засоби виміральної техніки, складні технічні системи.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Державні еталони передавання одиниць фізичних величин (далі – ДЕ), у тому числі мобільні, є вищою ланкою повірочної схеми по відношенню до робочих еталонів та робочих засобів виміральної техніки [1]. Ці еталони представляють собою складні технічні системи, що вимагають організації та проведення значної кількості заходів з метрологічного та технічного обслуговування.

Сучасні тенденції розвитку експлуатації складних технічних систем обумовлені створенням умов, що забезпечують безперервне стеження та оцінювання фактичного технічного стану їх основних складових частин, оперативне діагностування вузлів та агрегатів, а також прогнозування залишкового ресурсу. На цій основі організовується технічне обслуговування за фактичним технічним станом, реалізуються "гнучкі" стратегії управління технічним станом, що дають змогу суттєво знизити витрати на експлуатацію цих складних технічних систем при значному збільшенні ефективності їх застосування за призначенням.

Актуальність проблеми формування ефективних програм експлуатації та ремонту складних технічних систем, до яких належать і ДЕ, викликана тим, що по мірі ускладнення їх конструкцій суттєво збільшуються витрати на метрологічне, технічне обслуговування та ремонт. Удосконалення тієї або іншої програми експлуатації визначається ступенем взаємодії між об'єктивно існуючим процесом зміни технічного стану ДЕ та процесом їх експлуатації, що призначені для підтримки справності і працездатності.

Програми обслуговування та ремонту, які включають виконання заданих обсягів профілактично-відновлювальних робіт через раніше заплановані інтервали часу або напрацювання незалежно від фактичного стану ДЕ, не забезпечують повну взаємодію між зазначеними процесами для підтримки

необхідного рівня надійності та ефективності використання ДЕ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженнями [2–4] встановлено, що більш тісний зв'язок між цими процесами забезпечують програми, які засновані на стратегіях обслуговування та ремонту за технічним станом. У цьому випадку зміст процесу експлуатації (періодичність, обсяг робіт) призначається у відповідності з фактичним технічним станом ДЕ.

Прогнозування технічного стану еталонів дає змогу за наявними статистичними даними експериментальним шляхом визначати оцінки показників системи експлуатації ДЕ з метою розробки ефективних програм їх експлуатації.

При цьому підставами для застосування прогнозу при оцінці технічного стану є [2]:

- високий відсоток метрологічних відмов у загальному числі відмов засобів виміральної техніки (ЗВТ), що повірялися (атестувалися) на відповідному ДЕ. За статистикою експлуатації ЗВТ частка поступових метрологічних відмов становить 60–80 %, а для прецизійних зразків, до яких належать ДЕ і більше;

- прихований характер метрологічної відмови (може бути виявлений тільки при зверненні чи метрологічній атестації) припускає експериментальне визначення значення нормованих метрологічних характеристик у дискретні моменти часу (неможливість проведення безперервних вимірювань) із залученням еталонів більш високого класу точності.

Застосування прогнозу для оцінки технічного стану еталонів дає змогу більш обґрунтовано вибрати моменти для здійснення різних дій у системі їх експлуатації. Зокрема, у багатьох джерелах описується визначення міжповірочних інтервалів, засноване на аналізі динаміки похибок ЗВТ.

**Метою даної статті** є аналіз існуючих методів прогнозування стану складних технічних систем та обґрунтування можливості їх застосування для ви-

значення показників ефективності програм експлуатації ДЕ.

## Основний матеріал

Розглянемо більш докладно відомі методи прогнозування технічного стану складних технічних систем. Буде розглядатися така модель: для еталона є статистичні дані, одержані при його повірці (звіренні, метрологічній атестації) про зміну характеристики (характеристик) по якій судять про справність (у тому числі і метрологічній) еталона. Ці статистичні дані містять собою дискретний часовий ряд.

Відомо декілька загальних підходів до прогнозування технічного стану об'єктів контролю, якими, зокрема, можуть бути ДЕ. Найширша загальна класифікація виділяє такі підходи [3]:

– аналітичне прогнозування – припускає обчислення значень характеристики, яка досліджується в припущенні невинного характеру її зміни. Реально цей підхід може бути застосований для малих інтервалів екстраполяції і для процесів, що повільно змінюються;

– ймовірнісне прогнозування – припускає обчислення ймовірності знаходження контрольованої характеристики в заданих межах на визначеному часовому інтервалі. У цьому випадку виділяють дві задачі: пряма (фіксований інтервал екстраполяції) і обернена (фіксоване граничне значення контрольованої характеристики);

– статистичне прогнозування (статистична класифікація).

Доцільно більш детально розглянути ймовірнісне прогнозування, що представлено значною кількістю конкретних методичних підходів. Кожний з них враховує особливості задачі, що вирішується і спирається на конкретну модель, вибір якої визначають такі фактори [5]:

– обсяг статистичної інформації (великий або малий);

– структура статистичних даних (зміна за часом або додатково за декількома зразками ЗВТ);

– ціль дослідження (прогнозування стану конкретного зразка або прогнозування стану сукупності зразків);

– необхідність визначення ймовірносних меж.

При прогнозуванні технічного стану за сукупністю однотипних ЗВТ може бути знайдена частка ЗВТ, які на визначений момент будуть знаходитися у стані відмови. Для цього випадку пропонується застосовувати прогнозування з використанням методу моментів.

В основі цього методу лежить сполучення ймовірносного та аналітичного підходів. Вважається, що моментні функції за рахунок усереднення змінюються не настільки швидко, як конкретна реалі-

зація контрольованої характеристики (якщо таких характеристик декілька, то розглядається зміна кожної з них окремо). Алгоритм методу передбачає [6–7]:

– у наявних часових зрізах (точках відповідних одному періоду повірки) визначаються показники, що характеризують чотири перших моменти (математичне очікування, дисперсію, асиметрію та ексцес);

– для кожного моменту з використанням методу найменших квадратів (МНК) будується апроксимуючий поліном. Враховуючи малу кількість часових зрізів доцільно вибрати його не вище другого степеня. Вибір степеня поліному – нульовий (немає зміни за часом), перший (лінійна зміна) або другий (прогресуюча зміна) здійснюється за критерієм мінімуму помилки відтворення і з використанням критеріїв для перевірки гіпотез про незначущості коефіцієнтів регресійної моделі (критерій Стюдента) і адекватності моделі (критерій Фішера);

– за отриманими формулами розраховуються екстрапольовані значення моментів на період часу, що цікавить;

– за розрахованими значеннями моментів проводиться відновлення функції розподілу контрольованої характеристики сукупності еталонів [3], для цього вибираються параметри рішення системи інтегральних рівнянь (використовується ітераційний метод Ньютон-Гаусса [4]), що зв'язують розраховані значення моментів та їх математичні вирази.

Цей метод підходить для прогнозування стану робочих еталонів (коли є декілька однотипних еталонів). Для прогнозування стану еталонів, що існують у єдиному екземплярі, необхідно застосовувати індивідуальний аналіз.

При індивідуальному аналізі рішення задачі оцінки і прогнозування процесів зміни за часом показників технічного стану ДЕ (контрольованої характеристики) ґрунтується на математичному апараті теорії фільтрації, ідентифікації систем і прогнозування випадкових процесів.

Загальний підхід заснований на розкладанні процесу, що описує зміну контрольованої характеристики на дві адитивні складові [2]:

– регулярну складову, яка, в основному, описує довгострокові не обернені зміни параметрів пов'язаних зі зношенням та старінням. Це нестационарні процеси і їх вигляд визначається структурою прийнятої моделі (зазвичай підбір регулярної складової полягає у раціональному виборі параметрів моделі);

– короточасні обернені зміни, пов'язані із випадковими зовнішніми факторами, що апроксимуються стаціонарними випадковими функціями часу. Вони містять собою різницю між експериментальними даними та регулярною складовою, так звані “залишки”. Чим більше процес, що описує поведінку “залишків” відповідає білому шуму (відсутня взаємна кореляція

між відліками), тим більше інформації про основний процес враховується у регулярній (моделній) складовій. Ця складова характеризується дисперсією або спектральною щільністю потужності флуктуацій.

Основна увага при рішенні подібних задач приділяється саме виділенню регулярної складової, для цього використовуються такі підходи [2; 7–8]:

– метод лінійної вінеровської екстраполяції (або в більш загальному випадку екстраполяція із застосуванням фільтра Калмана) для стаціонарних і нестаціонарних випадкових процесів;

– методи, що засновані на марковських моделях;

– методи засновані на застосуванні мартингалних моделей;

– безпосереднє застосування МНК (представлення контрольованої характеристики як функції часу). Степінь моделі тут нульовий, перший або другий. Проте суттєвим є припущення про нормальний закон розподілу “залишків”, з урахуванням якого будується довірчий інтервал [8]. Іноді ця умова може не виконуватися. У цьому випадку “залишки” можуть аналізуватися різними методами, зокрема, можна використовувати методичний апарат ідентифікації закону розподілення випадкової величини по “малій” вибірці [5]. Основною перевагою цього методу є можливість його застосування для невеликих періодів ретроспекції (7–10 відліків) [8];

– застосування моделей, що згладжують тимчасовий ряд по сусідніх точках (дискретним відлікам), причому конкретна реалізація такої моделі полягає у виборі “вікна” (вагової функції, яка визначає з якими коефіцієнтами входять для усереднення відліки, що віддалені від точки згладжування на визначену величину). Це може бути ковзне середнє (“вага” відліку не залежить від віддалення від точки згладжування), експоненціальне згладжування (відліки більш близькі до точки згладжування мають більшу “вагу”), а також інші “вікна”. Недолік цього методу – не відпрацьованість процедур з визначення інтервалів невизначеності при екстраполяції моделі функції;

– авторегресійні моделі (АР), в яких вважається, що регулярна складова є функцією часу з невідомими параметрами. Ці параметри оцінюються (наприклад, МНК) та визначається вид функції. Зазвичай припускають, що ця функція лінійна. Основний недолік методу – часовий ряд (на ретроспективному періоді) повинен бути заповнений повністю (не припускаються пропуски при вимірюванні контрольованої характеристики). Моменти часу, в які вимірюється контрольована характеристика періодичні. Якщо в деякі моменти характеристика не вимірювалася, то застосовуються процедури штучного заповнення пропусків, а це зменшує адекватність моделі. Також необхідно мати порівняно

великий масив вимірювань (тривалий період ретроспекції);

– комбінація двох попередніх підходів, до них належать авторегресійна модель ковзного середнього (АРКС) та її удосконалена модифікація – авторегресійна модель проінтегрованого ковзного середнього (АРПКС), в якій вилучаються кореляційні зв'язки. Недолік – суттєві вимоги до обсягів статистичної інформації, ніж у попередніх моделях (у тому числі і АР). Позитивна якість – краща стійкість рішень, можливість оцінювати інтервал невизначеності прогнозу, найбільш повна модель змінювання регулярної складової.

Загальний вид моделі АРПКС порядку (p, d, q) має вигляд [9]:

$$x_t = a_1 x_{t-1} + \dots + a_p x_{t-p} + y_t + b_0 + b_1 y_{t-1} + \dots + b_q y_{t-q}, \quad (1)$$

де  $x_{t-k}$  – значення процесу, що аналізується у момент часу (t-k) або ті значення контрольованої характеристики, що безпосередньо виміряні чи представляють собою їх d різницю;  $a_i$  – параметри моделі, що відповідають АР частині моделі ( $i = 1, \dots, p$ );  $b_j$  – параметри моделі, що відповідають моделі ковзного згладжування ( $j=0, \dots, q$ );  $y_{t_j}$  – випадкові значення “білого шуму”, у момент (t-j) “залишки”.

Для випадку d=0, модель містить собою АРКС, коли q=0 є моделлю ковзного середнього, якщо p=0, то модель вироджується у АР-модель.

Для задач прогнозування технічного стану ДЕ, доцільно вибрати модель з безпосереднім використанням МНК або модель АРКС невеликих порядків із малою кількістю параметрів, що оцінюються (лінійна модель АР та невелика кількість точок згладжування: 2–3).

Вибір моделі визначається обсягом вибірки (інтервалом ретроспекції) і структурою наявної інформації про контрольовану характеристику, якщо неможливе оцінювання параметрів моделі АРКС (за рахунок малої кількості вимірювальної інформації або при значній кількості “пропущених” відліків), то застосовується МНК.

При рішенні задачі прогнозування за допомогою цієї моделі будується екстраполяція характеристики до моменту часу, що цікавить та оцінюється довірчий інтервал. Цей інтервал залежить від ймовірності, що задається, при якій чисельні значення характеристики виявляться усередині нього.

Моделі АРПКС, АРКС, АР, МНК у вигляді процедур представлені в різних математичних пакетах (MATLAB, Statistica, SPSS тощо) для персональних ЕОМ. Тому обчислювальна складність цих процедур не ускладнює їх застосування, а основною проблемою є правильний вибір моделі.

Методом підбору можна вирішувати і обернену задачу. Знаючи граничні значення характеристики (допустимий інтервал) та маючи модель, можна визначити для заданого моменту часу ймовірність перебування значення характеристики усередині цього інтервалу.

Особливо слід зазначити ситуацію, коли вирішується обернена задача (розрахунку ймовірності справної роботи) і справність (працездатність) еталона визначається декількома характеристиками. У цьому випадку необхідно розглядати кожну з них наведеним вище способом.

Однак, так як їх прогноз має ймовірносний характер, то сумарна оцінка (на момент, що прогнозується) є ймовірною і обчислюється через добуток невиходу кожної з характеристик за встановлені межі. Ця обставина зменшує прогнозне значення ймовірності справного стану, тому щоб якось компенсувати це зменшення, необхідно враховувати кореляційні зв'язки між характеристиками. Разом з тим, ці зв'язки заздалегідь невідомі і їх кількісні показники необхідно оцінювати за експериментальними даними.

Наразі проведення ремонту або калібрування еталона змінює статистичні властивості ряду і це погіршує прогностичні властивості моделей. Гарні результати можуть бути отримані, якщо використовувати апріорну інформацію про зміну характеристик (за рахунок старіння, врахування зносу тощо) про кореляційні зв'язки між ними і вплив умов експлуатації на характеристики (у цьому випадку необхідно знати і самі умови експлуатації) [9].

Можна відзначити ще один підхід, пов'язаний із прогнозуванням стану еталонів, коли розглядається екстремальне поведіння характеристики, що контролюється, яке апроксимується поліномом Карліна [8]. Проте цей підхід визначає "найгіршу" оцінку та значно скорочує періоди між послідовними вимірюваннями характеристики, що контролюється, тому він може бути рекомендований тільки для особливо відповідальних гарантованих вимірювань.

## Висновки

Проведено аналіз існуючих методів прогнозування стану складних технічних систем та обґрунту-

вання можливості їх застосування для визначення показників ефективності програм експлуатації ДЕ.

Таким чином, використовуючи розглянуті моделі АРКС малого порядку або МНК можна з використанням ЕОМ розраховувати прогнозні значення характеристик ДЕ, що контролюються, при цьому основна увага має бути приділена вибору представницької моделі.

## Список літератури

1. Про метрологію і метрологічну діяльність [Текст]: закон України від 5 червня 2014 року № 1314-VII // Відомості Верховної Ради України. – 2014. – № 33. – С. 1008.
2. Барзилович Е.Ю. Эксплуатация авиационных систем по состоянию / Е.Ю. Барзилович, В.Ф. Воскобоев. – М.: Транспорт, 1981.
3. Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования / В.Г. Воробьев, В.В. Глухов, Ю.В. Козлов и др.; под ред. И.М. Синдеева. – М.: Транспорт, 1984.
4. Смирнов Н.Н. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию / Н.Н. Смирнов, А.А. Ицкович. – М.: Транспорт, 1987.
5. Хижняк В.В. Теоретичні основи алгоритмізації обробки експериментальних досліджень характеристик військових еталонів при наявності "малої" вибірки статистичної інформації [Текст] / В.В. Хижняк // «Електроенергетика-2000», Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України, – К: – 2003. – С. 186-196.
6. Хижняк В.В. Оптимальні програми експлуатації військових мобільних еталонів передавання одиниць фізичних величин за їх технічним станом / В.В. Хижняк // Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту Збройних Сил України. – 2005. – № 10. – С. 201-214.
7. Хижняк В.В. Інтегральна оцінка ефективності функціонування системи метрологічного забезпечення авіаційної техніки [Текст] / В.В. Хижняк // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: наук.-техн. ж. – № 3(16). – Х.: ХУПС, 2014. – С. 18-20.
8. Капитанов В.А. Оптимальные задачи технического обслуживания / В.А. Капитанов. – М.: Знание, 1981.
9. Хижняк В.В. Модель метрологічного забезпечення процесу полігонних випробувань складних рухомих технічних об'єктів [Текст] / В.В. Хижняк // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: наук.-техн. ж. – № 4(13). – Х.: ХУПС, 2013. – С. 108-112.

Надійшла до редколегії 21.09.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.Б. Леонтьєв, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПРОГРАММ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ЭТАЛОНОВ

В.В. Хижняк, А.А. Литовченко, А.Г. Дмитриев

*Проанализированы существующие методы прогнозирования состояния сложных технических систем и обоснованы возможности их применения для определения показателей эффективности программ эксплуатации государственных эталонов.*

**Ключевые слова:** государственные эталоны, средства измерительной техники, сложные технические системы.

## ANALYSIS OF THE TECHNICAL METHODS OF FORECASTING THE STATE OF COMPLEX SYSTEMS AND ESPECIALLY THEIR USE IN THE FORMATION OF THE OPERATION OF THE NATIONAL STANDARDS PROGRAMS

V.V. Khizhnyak, A.O. Litovchenko, A.G. Dmitriiev

*Analyzed existing methods of forecasting the state technical systems and proved the possibility of their use for determining the effectiveness of the maintenance programs of the national standards.*

**Keywords:** state standards, measuring instruments, complex technical systems.