

УДК 629.083

**А.В. Гриньків, асп.***Кіровоградський національний технічний університет, м. Кіровоград, Україна,**E-mail: grinkivav@mail.ru*

## Використання методів прогнозування в керуванні технічним станом агрегатів та систем транспортних засобів

Проаналізовано існуючі методи прогнозування технічного стану транспортних засобів та дано їх класифікацію у вигляді узагальненої структурної схеми. Наведено стандартні математичні функції для здійснення процесу прогнозування діагностичних параметрів під час експлуатації транспортних засобів. А також запропоновано прогнозні функції надійності, агрегатів та систем транспортних засобів, алгоритм оцінки придатності зазначених моделей та їх аналітичні естиматії.

**прогнозні моделі, естиматія, методи прогнозування, класифікація****А. В. Гриньків, асп.***Кировоградский национальный технический университет, г.Кировоград, Украина***Использование методов прогнозирования в управлении технических состояний агрегатов и систем транспортных средств**

Проанализированы существующие методы прогнозирования технического состояния транспортных средств и дана их классификация в виде обобщенной структурной схемы. Приведены стандартные математические функции для осуществления процесса прогнозирования диагностических параметров во время эксплуатации транспортных средств. А также предложены прогнозные функции надежности, агрегатов и систем транспортных средств, алгоритм оценки пригодности отмеченных моделей и их аналитические естимаций.

**прогнозные модели, естимация, методы прогнозирования, классификация**

**Вступ.** Транспортні засоби в сільськогосподарському виробництві посідають провідне місце у перевезенні продукції, й мають максимальну завантаженість в експлуатації. Для ефективної їх роботи необхідно постійно модернізовувати конструктивно та використовувати нові технологічні методи і підходи вибору стратегії технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) транспортних засобів (ТЗ). Модернізація ТЗ, на теперішній час, полягає у широкомасштабному використанні електронних систем, які контролюють різноманітні процеси, що протікають під час виконання поставлених завдань перед ТЗ, оптимізують та планують їх роботу, а також створюють умови для проведення моніторингу технічного стану. При цьому важливим завданням є оптимізація та обґрунтування комплексу технічних дій для поліпшення ТО або Р й забезпечення високого коефіцієнту технічної готовності ТЗ в експлуатації.

**Постановка проблеми.** Використання ТЗ в нестаціонарних умовах експлуатації спричиняє різний характер процесів зношування деталей та їх спряжень, а також швидкості настання непрацездатного стану, тому необхідно постійно контролювати фактичний стан ТЗ, а в разі настання передграничного стану, проводити тільки необхідні технічні дії з обслуговування, щоб забезпечити належний працездатний стан. Дана інтерпретація можлива лише за рахунок моніторингу технічного стану ТЗ, який ґрунтується на обробці апріорної інформації, діагностиці (безперервної або періодичної) та прогнозуванні технічного стану. В зв'язку з цим основною проблемою,

яка стоїть на даний час перед науковцями, що займаються питаннями експлуатації ТЗ – це узагальнення та удосконалення методів прогнозування технічного стану ТЗ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Експлуатацію сучасних ТЗ доцільно розглядати як складну динамічну систему, функціонування якої відбувається при дії різних випадкових факторів як зі сторони зовнішнього середовища, так і при дії внутрішніх процесів в їх агрегатах та системах. Виявлено, що зовнішнє середовище може вносити невизначеність та випадковість вихідних даних і ситуацій, та випадковим чином змінювати характер взаємодії між складовими частинами агрегатів та систем ТЗ. В таких динамічних системах можуть виникнути випадкові збурення, що являють собою помилки вимірювання діагностичних параметрів та похибки при перетворенні інформації, дії різного роду перешкод, внаслідок появи неврахованих, але об'єктивно діючих причин.

Ефективність функціонування ТЗ, як технічної системи залежить від його технічного стану. Якщо в процесі експлуатації вчасно не виконувати спеціальні технічні дії, то технічний стан може критично погіршитись. В зв'язку з цим впливає проблема керування технічним станом ТЗ в експлуатації та при прогнозуванні. Розв'язанню цієї проблеми присвячені роботи Барзиловича Є.Ю. [1], Міхліна В.М. [2], Полянського А.С. [3], Бажинова А.В. [4], Волкова В.П. [5], Кравченка О.П. [6], Сухарева Є.А. [7], Ауліна В.В. [8,9] і т.ін.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є аналіз методів прогнозування, які можна використати підчас процесу прогнозування технічного стану систем та агрегатів ТЗ, визначити перелік стандартних функцій, які необхідно використовувати при прогнозуванні значень діагностичних параметрів, для зменшення трудомісткості прогнозного процесу. При більш повному вирішенні проблеми прогнозування необхідно також встановити функції, що забезпечуватимуть придатність та точність прогнозних моделей надійності агрегатів та систем ТЗ.

**Виклад основного матеріалу.** Виявлено, що інтегральним елементом процесу діагностування стану ТЗ є його прогнозування. Тому визначаючи поточний стан ТЗ, необхідно передбачати визначення таких змін параметрів й спрогнозувати їх в подальшій експлуатації. Якість прогнозування стану ТЗ визначається передусім методами прогнозування.

Аналіз методів прогнозування технічного стану агрегатів і систем ТЗ свідчить, що вони передбачають дві основні цілі:

- забезпечення процесу вивчення і аналізу методів;
- організації процесу вибору методу при розробці прогнозів об'єкта досліджень;

При проведенні класифікації методів прогнозування та побудови їх структурної схеми враховували, що існують два основних типів класифікації: послідовна та паралельна. Послідовна класифікація передбачає виокремлення частиних методів із більш загальних. Цей процес тотожний поділу родового поняття на видові. При цьому необхідно додержуватися наступних правил:

- причина для поділу повинна залишатися однією і тією, що і при утворенні будь-якого видового поняття;
- об'єм видових понять виключати один одного (відсутній перетин класів);
- об'єм видових понять повинні вичерпувати об'єм родового поняття (повне охоплення усіх об'єктів класифікації).

Паралельна класифікація передбачає складну інформаційну основу, що складається не з одного, а цілого ряду ознак. Основним принципом такої класифікації є

незалежність вибраних ознак, кожна з яких істотна і усі вони разом одночасно властиві предмету і тільки така їх сукупність дає вичерпне уявлення про кожний клас.

Представлена на рис. 1 класифікація методів прогнозування є класифікацією послідовного типу, що має на меті уявлення у вигляді ієрархічного дерева сукупності методів як деякої системи. Кожний рівень класифікації характеризується своєю ознакою. Елементи кожного рівня являють собою найменування підмножин елементів найближчого нижнього рівня, причому підмножини методів не перетинаються. Для елементів нижнього рівня характерним є найменування вузьких груп конкретних методів прогнозування, які є модифікаціями або різновидами будь-якого одного, найбільш загального з них.

Наведена класифікація методів прогнозування (рис. 1) є відкритою і містить можливість збільшення кількості елементів на рівнях і нарощування кількості рівнів за рахунок подальшого подрібнення й уточнення елементів останнього рівня. На першому рівні всі методи поділяються на класи за ознакою "інформаційна база методу": методи експертних оцінок; статистичні методи; методи моделювання (математичні, фізичні, фізико-математичні).



Рисунок 1 – Класифікація методів прогнозування діагностичних параметрів технічного стану та показників надійності агрегатів і систем ТЗ

Експертні методи, в свою чергу, поділяються на два підкласи: прямі і зі зворотнім зв'язком. Прямі експертні оцінки базуються по принципу отримання та обробки незалежної узагальненої думки колективу експертів при відсутності впливу на думку кожного з них думок іншого, а також вплив їх колективу. До опитування відносяться методи індивідуальних та сумарних оцінок, а до аналізу – методи: формування сценарію розвитку, еволюційно-логістичного аналізу, узгодженої оцінки, морфологічного аналізу, визначення моделі стану. Експертні оцінки зі зворотнім

зв'язком в різному вигляді втілюють принцип зворотнього зв'язку шляхом впливу на оцінку експертної групи (одного експерта) отриманої раніше від цієї групи або від одного із її експертів. Ці методи поділяються на методи ігрових моделей, генерації ідей та методи опитування. Методи ігрових моделей містять методи динамічного концептуального та економічного аналізів. Методи генерації ідей складають методи колективної генерації ідей, деструктивної відносної оцінки. Методи опитування включають метод Делфі та евристичний метод.

Статистичні методи об'єднує, сукупність методів обробки кількісної інформації про об'єкт прогнозування по принципу виявлення математичних закономірностей розвитку та математичних взаємозв'язків з метою отримання прогнозних моделей. Статистичні методи можна поділити на підкласи: методи екстраполяції та інтерполяції, методи регресійно (трендово) - кореляційного аналізу, методи факторного аналізу.

Методи екстраполяції та інтерполяції складають методи попередньої обробки числового ряду з метою перетворення його до вигляду зручного для прогнозування, а також аналіз логіки та фізики прогнозного процесу, що здійснюють істотний вплив, як на вибір вигляду екстраполяційної функції, так і на визначення границь зміни її параметрів. До них відносяться: методи представлення параметрів діагностування поліномами; методи підбору стандартних функцій; методи дисконтування бази даних, а також методи згладжування функцій з гнучкою структурою та огинаючих кривих.

Методи регресійно (трендово) - кореляційного аналізу практично вирішують поставлену задачу здійснення ряду послідовних етапів: відбір основних факторів (незалежних змінних) системи або її складових елементів; формування необхідної емпіричної (статистичної) бази даних; перевірка емпіричних даних на однорідність статистичної вибірки; обробка бази даних для вибору аналітичної форми зв'язків між факторами; розробка методів та алгоритму прийняття рішень, опис алгоритму у вигляді програми з метою отримання конкретних числових результатів; проведення статистичної оцінки і техніко-економічної інтерпретації побудови математичної моделі. Методи регресійно (трендово) - кореляційного аналізу включають в себе: методи авторегресійних (автотрендових) моделей; методи парних та ступінчастих кореляцій, регресій (трендів); методи множинних регресій (трендів) і кореляцій.

Методи факторного аналізу призначені для прогнозування складних технічних об'єктів. З їх використанням можливо враховувати сукупність різних змінних, що характеризують технічний об'єкт та взаємозв'язки між ними. В процесі дослідження необхідно вибрати або побудувати цільову функцію взаємозв'язку між різними змінними для опису технічного об'єкту та врахувати складність, зменшити трудомісткість аналізу процесу прогнозування. Методи факторного аналізу базуються на методах: компонентного аналізу технічного об'єкту прогнозування, багатфакторних моделей управління об'єктом; екстраполяційних прогнозів факторних структур; усунення мультиколінеарності, гетероскедастичності, автокореляції.

Наступним сучасним методом прогнозування є методи моделювання, які включають достатньо розроблені методи математичного моделювання та фізичні, фізико-математичні методи, що на даний час розроблені не в повній мірі. Широкого поширення в практиці прогнозування набули математичні методи побудови детерміністських та стохастичних моделей. Детерміністські моделі це передусім лінійні та нелінійні одно- та багатфакторні моделі, а також моделі гармонійних та логістичних функцій. Що стосується стохастичних моделей, то на сьогодні широкого поширення в прогнозуванні технічного стану транспортних засобів, їх агрегатів і систем, набули ймовірнісні марківські та немарківські моделі та моделі теорії масового обслуговування.

В математичних методах прогнозування стану машин всі суб'єктивні параметри, що стосуються змін їх станів, формуються з допомогою математичних моделей. При цьому, під прогнозуванням будемо розуміти визначення майбутніх, у відношенні до поточного часу  $t$  або пробігу ТЗ, значень прогнозованих діагностичних параметрів  $S_p(t_p)$ ,  $t_p > t$ , на основі діагностичної моделі в момент  $t_D$  або пробігу  $L$  та спостережень  $S_0(t_r)$ , виконаних до моменту  $t_r$ ,  $t_r \leq t$ . При цьому різниця часу  $t_p - t$  є випередженням прогнозу, а найбільше випередження прогнозу - це горизонт прогнозу.

При проведенні прогнозування варто звертати увагу на дві його принципові особливості: довгострокове прогнозування пов'язане з впливом часу та процесами еволюції стану машин, а короткострокове - появою підчас діагностування нових факторів, ідентифікація яких має істотне значення підчас вибору прогностичних методів, обумовлюючи використання їх різних конструкцій та конфігурацій.

Реалізація прогнозування підчас діагностування обумовлена процесом ідентифікації тенденції зміни величин контрольованих діагностичних параметрів. Прогностичні формалізації, які можуть бути придатні для діагностичних систем групуються наступним чином [3,4,8]:

- класична екстраполяція величин часового ряду;
- адаптаційні моделі тенденції;
- автономна екстраполяція стохастичних процесів;
- моделі зміни контрольованого динамічного стану, описаного стохастичним диференціальним рівнянням;
- статистичні моделі симптоматичних змін.

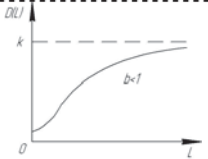
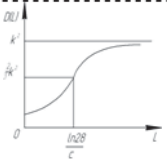
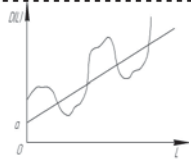
При прогнозуванні та моніторингу технічного стану з використанням діагностичної інформації використовуються різні типи діагностичних функцій, що визначають технічний стан агрегатів та систем ТЗ (табл. 1).

Таблиця 1 – Типи аналітичних діагностичних функцій технічного стану та їх та графічні відображення

Аналітична форма діагностичної функції технічного стану	Лінійна $D(L) = a + bL$	Квадратична $D(L) = a + bL + cL^2$	Кубічна $D(L) = a + bL + cL^2 + dL^3$
Графічне відображення діагностичної функції			
Аналітична форма діагностичної функції технічного стану	Степенева $D(L) = aL^b$	Експоненціальна $D(L) = a \exp(bL)$	Модифікована експоненціальна $D(L) = k - a \exp(bL)$
Графічне відображення діагностичної функції			
Аналітична форма діагностичної функції технічного стану	Логістична (S-подібна) $D(L) = k / (1 + \exp(-cL))$	Гіперболічна $D(L) = a + b / (c + L)$	Комбінована експоненціально-степеневу $D(L) = \exp(aL)L^b$
Графічне відображення діагностичної функції			



Продовження табл.1

Аналітична форма діагностичної функції технічного стану	Гомпертця $D(L) = ka^{bL}$	Квадратично-логістична $D(L) = k^2 / (1 + b \exp(-cL))^2$	Лінійна гармонійна $D(L) = a + bL + \sum_{i=1}^n C_i \sin(\omega_i L + \varphi_i)$
Графічне відображення діагностичної функції			

При практичному використанні методів прогнозування є необхідність в їх оцінці, що проводиться в залежності від збереження тенденції спостережуваного діагностичного параметру [4, 9]. При цьому розрізняють дві ситуації:

- тенденція зміни діагностичного параметру відома або зручна для визначення моделі прогнозування технічного стану агрегату, системи ТЗ;
- тенденція зміни діагностичного параметру невідома або майже невідома для визначення моделі прогнозування технічного стану агрегату, системи ТЗ.

Перша ситуація може бути розв'язана з використанням моделей простих математичних функцій діагностичних параметрів, що змінюються монотонно. До переваг такого підходу необхідно віднести: простоту побудови графічного відображення; відносно низької вартості розрахунків моделі; можливість прогнозування спостереженого діагностичного параметру за 2-3-ма відомими значеннями вимірювального діагностичного параметру. А при цьому обмеженням є необхідність утримання тенденції його росту в прогнозований період та обмежене число функцій, що підлягають аналізу.

Друга ситуація розв'язується за допомогою використання ряду моделей:

- адаптаційних, побудованих різними методами, наприклад методом планування нерівностей Броуна, Хольта, Винтерса, Таїль-Ваге, Бахелета-Морлата;
- автономної екстраполяції стохастичних процесів (типу: середньої змінної, авторегресії, авторегресійної середньої змінної, інтегрованої середньої змінної);
- віброакустичних для шумо-коливальних параметрів;
- спостереження за технічним станом (фільтрація Кальмана-Вису);
- статистичних симптоматичних, з урахуванням виду функцій щільності розподілу вимірювальних параметрів (розподіли Вейбулла-Гнеденка, Фрекетта, Паретто).

Кінцевою умовою використання більшості методів прогнозування є рівномірна зміна діагностичних параметрів машин та рівномірний їх розподіл за часом вимірювання як у ретроспективному  $t_r$ , так і у прогнозованому  $t_{pr}$  часі.

Дослідженнями вибірових методів прогнозування стану агрегатів та систем ТЗ визначено оцінку щодо придатності їх в практичному використанні:

- для лінійної моделі:

$$P_s[(n+1), t_D] = P_s(n, t_D) + \lambda_L \cdot t_D, \quad (1)$$

де  $P_s[(n+1), t_D]$  – прогнозна ймовірність технічного стану агрегату, системи ТЗ S на один період вперед;

$\lambda_L$  – інтенсивність відмов;

$t_D$  – проміжок часу між діагностуваннями;

$n$  – номер спостережень;

- для квадратичної моделі:

$$P_S[(n+1), t_D] = P_S(n, t_D) + \lambda_k \cdot t_D + \beta_k (2 \cdot n + 1) t_D^2, \quad (2)$$

де  $\lambda_k, \beta_k$  – параметри моделі зміни;

- для експоненціальної моделі:

$$P[(n+1), t_D] = P_S(n, t_D) \exp(\lambda_k \cdot t_D); \quad (3)$$

- для квадратично-експоненціальної моделі:

$$P_S[(n+1), t_D] = P_S(n, t_D) \exp(\lambda_k \cdot (2 \cdot n + 1) t_D^2). \quad (4)$$

Визначено, що експоненціальна модель дає оптимальні прогностичні властивості як у відношенні до величини діагностичних параметрів, так і часу аварії ТЗ, а простота реалізації дає можливість ефективно використовувати її на практиці.

Оцінка придатності приведених моделей проводиться в наступній послідовності:

- оцінюється похибка прогнозування при використанні кожного з методів за формулою:

$$\varepsilon_{pr} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{P_{pr} - P_r}{P_r} \right)^2}, \quad (5)$$

де  $P_{pr} = P_S(n+1, \Delta t_D)$ ;  $P_r = P_S[n, \Delta t_D]$ ;

- проводиться детальний аналіз вибраного методу, а отже і відповідної моделі, що враховує фактичний прогноз технічного стану або залишкового ресурсу;

- за величиною похибки прогнозу різними моделями вибирається з них мінімальна  $\varepsilon_{pr} \Rightarrow \min$ .

Щодо оцінки прогнозу (естимачії) технічного стану агрегатів та систем ТЗ, то можна зазначити наступне. Кожна з моделей відображає вирівнюючі властивості, що намагаються реалізувати найменшу похибку прогнозу. При цьому естимачії прогностичних моделей можна визначити за наступними виразами:

- для лінійної моделі:

$$P_S[(n+1), t_D] = \lambda_e \cdot (n+1), t_D + \gamma_e, \quad (7)$$

- для квадратної моделі:

$$P[(n+1), t_D] = \beta_e [(2 \cdot n + 1) t_D]^2 + \lambda_e (n+1) t_D + \gamma_e \quad (8)$$

- для експонентної моделі:

$$P[(n+1) t_D] = \gamma_e \exp[\lambda_e \cdot (1+n) \cdot t_D] \quad (9)$$

- для квадратично-експоненціальної функції:

$$P[(n+1), t_D] = \gamma_e \exp[\lambda_e \cdot (1+n) \cdot t_D]^2 \quad (10)$$

де  $\lambda_e, \gamma_e, \beta_e$  - невідомі коефіцієнти, які визначаються методом найменших квадратів (МНК);

### Висновки:

1. Проаналізовано існуючі методи прогнозування технічного стану транспортних засобів та дано їх класифікацію у вигляді структурної схеми. Наведено принципи побудови структурної схеми та зміст її рівнів.

2. Запропоновано використання різних аналітичних форм діагностичної функції технічного стану від пробігу транспортного засобу при проведенні операцій прогнозування та наведено їх графічну інтерпретацію.

3. Отримано вирази для оцінки придатності лінійної, квадратичної, експоненціальної, квадратично-експоненціальної моделей, для прогнозування надійності стану агрегатів та систем транспортних засобів з урахуванням інтенсивності відмов та проміжку часу між діагностуванням.

4. Розроблено алгоритм оцінки придатності лінійної, квадратичної, експоненціальної, квадратично-експоненціальної моделей для прогнозування надійності стану агрегатів та систем транспортних засобів.

5. Для реалізації найменшої похибки прогнозу запропоновано визначення естимаций прогностичних моделей.

## Список літератури

1. Барзилович Е.Ю. Эксплуатация авиационных систем по состоянию: монография / Е.Ю. Барзилович, В.Ф. Воскобоев. – М.: Транспорт, 1981. – 197с.
2. Михлин В.М. Управление надежностью сельскохозяйственной техники / В.М.Михлин. – М.: Колос, 1984. – 335с.
3. Полянський А.С. Підвищення точності прогнозування надійності агрегатів і систем техніки на стадії проектування / А.С. Полянський // Вісник ХТУ (ХП): сб науч. тр. – 2002. – №10, Т.1. – С. 130 – 134.
4. Бажинов А.В. Прогнозирование остаточного ресурса автомотора: монография / А.В. Бажинов. – Х.: ХГАДТУ, 2001. – 96с.
5. Волков В.П. Интеграция технической эксплуатации автомобилей в структуре и прогрессе интеллектуальной транспортной системы: монография / В.П.Волков, В.П.Матейчик, П.Б.Никонов [и др.]; Под. ред. В.П.Волкова – Донецк: Изд-во "Ноудмедж" (Донецкое отделение), 2013 – 398 с.
6. Кравченко О.П. Прогнозування фактичного терміну експлуатації та призначення нормального ресурсу шин вантажних автомобілів / О.П. Кравченко, О.П. Сакно, О.В.Лучіков // Вісник ДААТ. – 2011. – №4. – С.89-95.
7. Сухарев Э.А. Теория эксплуатационной надежности машин: монография / Э.А Сухарев. – Ровно: издательство УГАВХ, 1997. – 162с.
8. Аулін В.В. Забезпечення та підвищення експлуатаційної надійності транспортних засобів на основі використання методів теорії чутливості / В.В. Аулін, А.В. Гриньків, Т.М. Замота // Вісник Інженерної академії України. – 2015. – №.3. – С. 66-73
9. Аулін В.В.Проблеми підвищення експлуатаційної надійності та можливості удосконалення стратегії технічного обслуговування мобільної сільськогосподарської техніки / В.В. Аулін, А.В. Гриньків // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету: Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування. – 2015. – № 28. – С. 126-132.

### Andriy Grinkiv, post-graduate

*Kirovohrad national technical university, Kirovograd, Ukraine*

#### Using forecasting techniques to manage the technical condition of units and vehicles

Road transport plays a leading role in the market, providing services to different types of traffic in Ukraine's economy, and has a maximum load operation. An important task is the optimization and justification of complex technical actions to improve maintenance or repair and maintenance of high technical readiness coefficient vehicles in operation by forecasting them.

Existing methods of the forecasting technical condition vehicles and the classification given them in the form of block diagram. An principles of structural scheme and content levels. The use of various forms of analytical diagnostic features technical condition of the vehicle mileage in the operations and are forecasting graphic or interpreting them.

The expressions to assess the suitability of linear, quadratic, exponential, quadratic, exponential models to predict the reliability of state units and vehicles based failure rate and time between diagnoses. The algorithm assesses the suitability of linear, quadratic, exponential, quadratic, exponential models to predict the reliability of state units and vehicles. To realize the smallest prediction error estimation proposed definition of prognostic models.

#### predictive models estimation methods of forecasting, classification

Одержано 14.12.15