

УДК 629.423.31

*Канд. техн. наук О.С. Крашенінін,  
В.А. Гогаєв*

*Cand. of techn. sciences O.S. Krashenin, in,  
V.A. Gogayev*

**СУЧАСНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЕД  
METHODS OF PREDICTION OF TECHNICAL TRACTION ELECTRIC  
MOTORS**

*Представив д-р техн. наук, професор А.П. Фалендиш*

**Вступ і актуальність теми.**  
Відповідно до планово-попереджувальних систем утримання обладнання локомотивів на залізничному транспорті доводиться виконувати значний обсяг робіт, пов'язаних з ТО, ПР, а в ряді випадків з розбиранням і

демонтажем обладнання. Періодичність та обсяг проведення цих заходів потребує удосконалення, оскільки система не враховує індивідуальні особливості експлуатації конкретного обладнання та його реальний стан.

У зв'язку з цим проблема удосконалення системи утримання локомотивів є актуальною. Одним із шляхів її вирішення є розробка ефективних методів прогнозування стану обладнання на основі використання багатофакторних моделей процесу старіння.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Розглянемо систему утримання ТЕД. Прогнозування є невід'ємною частиною системи забезпечення їх експлуатаційної надійності, що створює науково обґрунтовані передумови для визначення оптимальних термінів проведення ТО і ремонтів. Таке прогнозування доцільно проводити на основі використання математичних моделей зміни стану найбільш "слабкого" елемента даної електротехнічної системи. У переважній більшості випадків відмови ТЕД відбуваються через пошкодження обмоток статора (85-95 %), причому значну частину (30 %) з них складають зносіві відмови, зумовлені старінням ізоляції під впливом факторів навколишнього середовища та режимів роботи. Тому прогнозування технічного стану ТЕД доцільно здійснювати із застосуванням багатофакторних моделей старіння ізоляції.

Існуючі моделі старіння ізоляції електродвигунів не дозволяють в повній мірі ефективно прогнозувати зміну її технічного стану в реальних умовах експлуатації, так як вони або не повністю враховують комплекс факторів навколишнього середовища та режимів роботи, або технічний стан ізоляції описується інформативними параметрами, використання яких призводить до певних труднощів при адекватному і комплексному описі динаміки зміни стану об'єкта в процесі експлуатації.

**Основна частина.** Багаторічний досвід експлуатації електровозів на різних залізницях нашої країни показує, що тягові двигуни електровозів змінного струму працюють у більш важких умовах, ніж двигуни електровозів постійного струму, і

мають нижчу експлуатаційну надійність [5]. Під надійністю звичайно розуміють властивість тягових двигунів безвідмовно виконувати свої робочі функції протягом встановленого строку (пробігу) в певних умовах експлуатації, що характеризуються як зовнішніми впливами, так і рівнем технологічного обслуговування. Відмовою тягового двигуна вважають повну або часткову втрату ним працездатності, тобто стан, при якому він не може виконувати свої робочі функції.

Суттєвою особливістю факторів, що впливають на зміну технічного стану (ТС,) є їх коливання у часі, яке має випадковий характер. До чинників, які можуть найбільш істотно вплинути на швидкість зміни ТС, відносяться: технологічні навантаження, міцнісні характеристики матеріалу, геометричні розміри обладнання, дотримання умов технологічного процесу, якість технічного обслуговування і ремонту та ін. Випадковий характер розглянутих факторів призводить до випадкового характеру зміни ТС, отже, і термінів відмови.

Для визначення характеристик надійності тягових двигунів необхідно мати відомості про відмови їх в експлуатації, основними видами яких зазвичай вважають: перекидання дуги або круговий вогонь по колектору; перевищення норм радіального биття або вироблення робочої поверхні колектора, розпушений колектора або деформація профілю його робочої поверхні; підвищений знос або покол щіток; падіння опору ізоляції обмотки якоря нижче норми, пробій або міжвіткове замикання обмотки якоря; пробій ізоляції компенсаційної обмотки головних або додаткових полюсів; пробій ізоляції кронштейна щіткотримача або міжкотушечних сполук, перемичок, вивідних кабелів; виплавлення припою півників колекторів; руйнування бандажа обмотки якоря; руйнування, заклинювання, стукіт роликотримальника, викидання мастила з підшипника; перевищення норм

знос у вала якоря, підшипникових щитів, остова; значне вироблення або злам обійми щіткотримача; викришування або підвищене вироблення моторноосьових підшипників. Точна реєстрація відмов тягових двигунів у локомотивних депо в залежності від їх пробігу з моменту будови або заводського ремонту, аналіз і обробка цих статистичних даних методами математичної статистики дозволяють визначити основні показники надійності тягових машин.

Так, зв'язок збільшення випадків втрати опору мікастрічкової ізоляції якоря і

її пробою з підвищенням вологості і зниженням температури навколишнього середовища ілюструється кривими (рис. 1), побудованими за даними експлуатації електровозів ВЛ80<sup>к</sup> з тяговими двигунами НБ-418К. Аналіз досвіду експлуатації тягових двигунів в осінньо-зимовий період показує, що підвищення вологості їх електричної ізоляції відбувається не стільки при дощах і снігопадах, скільки при різких змінах мінусової температури з перепадом в 20°C і більше.

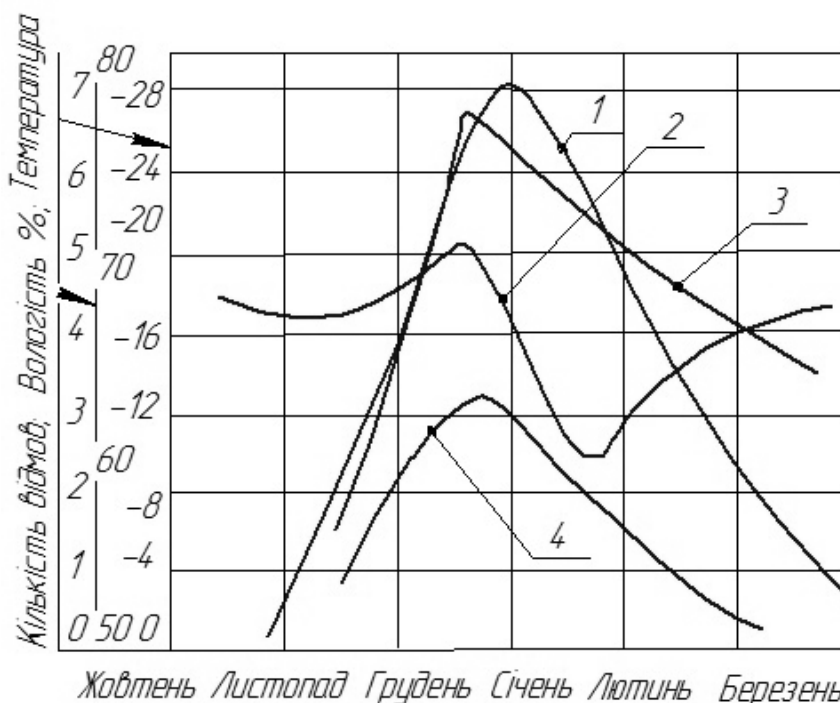


Рис. 1. Розподіл відмов тягових двигунів залежно від кліматичних умов:  
 1 – середньомісячна температура; 2 – відносна вологість;  
 3 – відмови двигунів НБ-418К; 4 – зниження опору ізоляції та пробою якорів

Таким чином, вирішення проблеми забезпечення надійної роботи ТЕД повинно передбачати здійснювання комплексу заходів, одним з яких є прогнозування технічного стану їх ізоляції на базі математичного моделювання [14].

Існуючі математичні моделі, що дозволяють прогнозувати надійність і технічний стан ізоляції ТЕД, можна розділити на класи за такими ознаками [1-7]:

- за метою моделювання: технічного стану та надійності;

- за характером досліджуваних процесів: детерміновані та стохастичні;

- за динамікою досліджуваних процесів: статичні і динамічні;

- за кількістю факторів, що впливають, які враховуються в моделі: однофакторні і багатфакторні;

- за кількістю контрольованих параметрів, що описують технічний стан об'єкта дослідження: одновимірні і багатовимірні;

- за джерелом інформації, на основі якого отримують відомості про досліджувані процеси: моделі, синтезовані на основі результатів прискорених лабораторних випробувань, і моделі, отримані в результаті обробки даних підконтрольної експлуатації та діагностики об'єктів у реальних умовах експлуатації.

Сучасні методи прогнозування надійності та технічного стану ТЕД можна класифікувати [1-7]:

- за типом об'єкта прогнозування: індивідуальний і груповий;

- за підходом до вирішення самої задачі прогнозування: екстраполяція і статистична класифікація;

- за застосуванням математичним апаратом: методи екстраполяції і інтерполяції; методи, які використовують апарат регресійного і кореляційного аналізу; методи, що використовують факторний аналіз.

Дані класифікації моделей і методів прогнозування є класифікаціями паралельно-послідовного типу [3, 8], які наочно подають сукупності моделей і методів сучасного прогнозування технічного стану та надійності ізоляції ТЕД як деякої системи у вигляді ієрархічного дерева.

Розроблені моделі надійності та технічного стану, маючи багато переваг, описують лише певні сторони процесу старіння ізоляції ТЕД.

Аналітичні моделі, як правило, пов'язують процес старіння ізоляції не більше ніж з двома-трьома експлуата-

ційними чинниками. Спроби врахувати більшу кількість вихідних параметрів приводять до громіздкості моделі, що знижує її практичну цінність.

Основним недоліком імовірнісних моделей є складність отримання статистичних даних, які враховують всю різноманітність умов експлуатації. Такі моделі використовуються переважно для розрахунку надійності ТЕД на стадії проектування та виготовлення.

На етапі експлуатації найбільш ефективними є емпіричні (формальні) моделі, які описують у явному вигляді залежність зміни параметрів технічного стану ізоляції від впливу факторів навколишнього середовища та режимів роботи. Регресійні моделі дозволяють враховувати залежність вихідного параметра моделі від будь-якої кількості вхідних параметрів і всіляких їх сукупностей, але при цьому не враховують попередній стан спостережуваного параметра, тобто будуються за єдиним тимчасовим розтином. Модель авторегресії змінного середнього описує процес динамічно, тобто розгорнутим у часі, але абсолютно ігноруються вхідні параметри, зводячи суму експлуатаційних впливів до "білого шуму".

Аналіз сучасного спектру формальних моделей старіння ізоляції ТЕД показує [1]:

- моделі на основі простих стандартних функцій широко використовуються в практиці інженерних розрахунків, які вимагають простих моделей прогнозування технічного стану ізоляції ТЕД для наближеної оцінки її залишкового терміну служби. Вони описують трендову складову процесу старіння ізоляції. Метод прогнозування на основі даних моделей відноситься до наближених, але його відрізняє простота, наочність подання процесу і порівняльна нескладність обчислювальних операцій при практичному використанні;

- регресійні моделі використовуються для опису статистичних залежностей, які

мають детермінований характер. Дані моделі набули широкого розповсюдження при обробці експериментальних лабораторних випробувань на надійність обладнання локомотивів, де чітко визначені впливові фактори;

- найбільш точними з точки зору прогнозування і ефективними є багатофакторні динамічні стохастичні моделі. Вони враховують у явному вигляді цілий комплекс зовнішніх і внутрішніх впливових факторів, стан об'єкта в попередні періоди часу, а також включають випадок впливу, невраховані явно в наборі вхідних параметрів моделі, і використовуються при обробці експериментальних даних підконтрольної експлуатації та діагностики ізоляції ТЕД. Дані моделі найбільш підходять для прогнозування випадкових динамічних процесів, до яких відносять старіння ізоляції ТЕД в реальних умовах експлуатації.

Розглянемо детальніше побудову математичної моделі старіння ізоляції ТЕД.

Ізоляція ТЕД являє собою багатокомпонентну електроізоляційну систему. У процесі експлуатації на неї діє широкий комплекс дестабілізуючих чинників, що призводять до зміни її стану.

При дослідженні процесу старіння ізоляції ТЕД правомірно використовувати системний підхід, розглядаючи ТЕД як єдину цілісну багатокомпонентну систему, а сам процес старіння - як зміну станів системи [9].

Процес старіння відносять до класу динамічних процесів, в яких можна виділити детерміновану і випадкову складові. Реалізація самого процесу старіння об'єкта в умовах експлуатації має випадковий характер.

Загальний опис математичної моделі старіння ізоляції ТЕД і етапи її побудови подано на рис. 2.

Електроізоляційну систему ТЕД можна розглядати як граничну систему. При впливі на таку систему зовнішніх і

внутрішніх чинників, які не перевищують деяких гранично допустимих значень, процес її старіння стабільний на певному рівні і постійний на певному інтервалі часу, а при їх перевищенні цей процес прискорюється і стає нестационарним.

Тому стан даної системи можна описати інтегральними характеристиками, які обчислюються на основі обліку процесу зміни відповідних параметрів впливу, їх гранично допустимих значень, що показують деяку сумарну дозу впливу фактора за певний проміжок часу експлуатації [1, 12, 13].

Виділення з усієї сукупності чинників лише істотних призводить до структурного спрощення моделі та зручного її застосування в подальшому на практиці [1].

$$H = \begin{cases} 0, & \text{при } h \leq h_{\text{доп}} \\ \sum_{i=1}^T \int_0^t (h(t) - h_{\text{доп}}) dt & \end{cases} \quad (1)$$

де  $H$  - інтегральна експлуатаційна характеристика;

$h$  - параметр експлуатації ( $h = f(T, F, \varphi, \Delta t)$ );

$h_{\text{доп}}$  - гранично припустиме значення параметра експлуатації за технічними умовами (ТУ) для конкретного типу ТЕД;

$t$  - час впливу фактора;

$T$  - час експлуатації ТЕД.

У результаті аналізу умов експлуатації ТЕД на виробництві та їх впливу на процеси старіння ізоляції прийнято виділяти дві групи істотних факторів, що впливають на технічний стан ізоляції. Першу групу чинників складають умови навколишнього середовища, а другу групу - режими роботи. Виходячи з перерахованих вище властивостей електроізоляційної системи ТЕД і вимог до опису динамічних процесів, умови навколишнього середовища описуються параметрами мікроклімату: температурою навколишнього середовища  $T_{\text{пов}}$ , °С; відносною вологістю навколишнього

повітря  $\varphi_{\text{пов}}, \%$ ; концентрацією агресивних домішок  $N_{\text{агр.пр.}}, \text{мг/м}^3$ , і пилу  $N_{\text{пилу}}, \text{мг/м}^3$ . Дані параметри навколишнього середовища не є безперервно сезонними і добово

змінними величинами. У математичній моделі старіння ізоляції ТЕД вони подані у вигляді часових рядів середньомісячних значень.

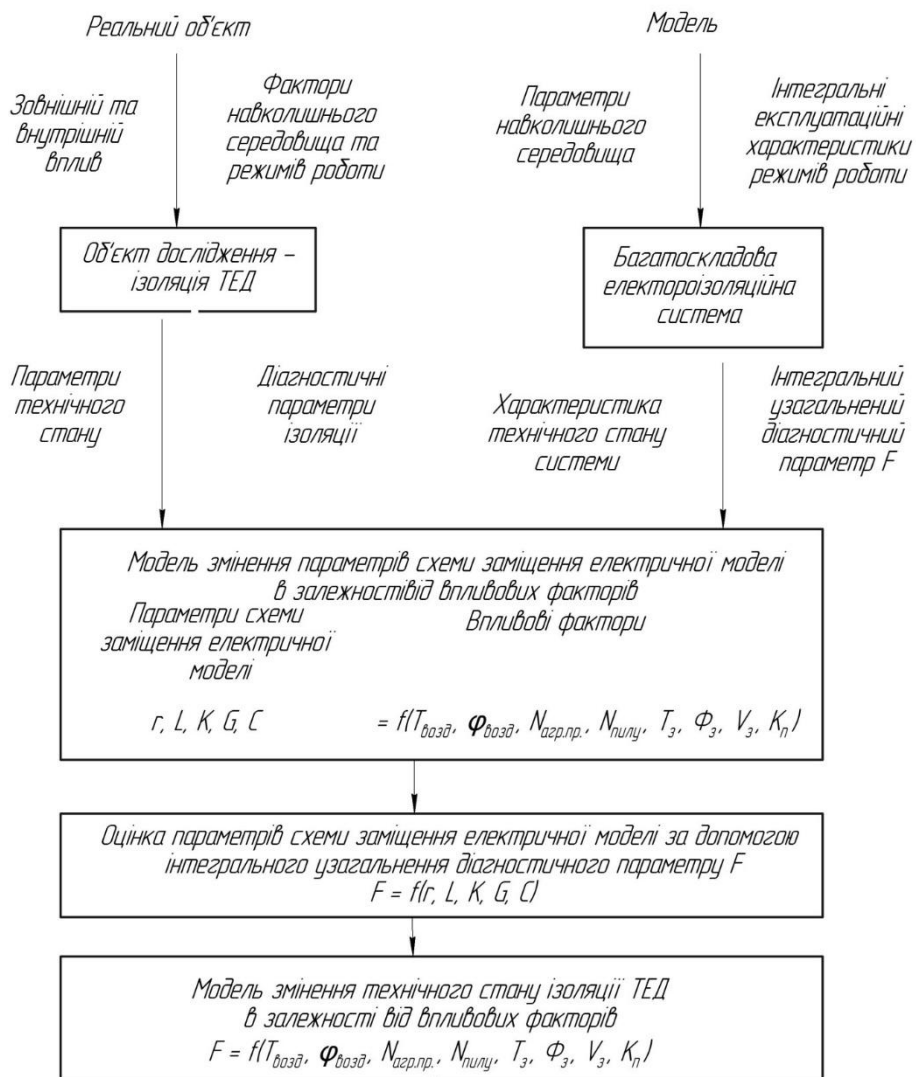


Рис. 2. Загальний опис математичної моделі старіння ізоляції ТЕД та етапи її побудови

### Висновки

1. У результаті теоретичного дослідження встановлено, що основний вплив на старіння ізоляції ТЕД в умовах експлуатації чинять: зволоження, дія хімічно агресивних речовин, теплові впливи в режимі перевантаження, механічні та термомеханічні навантаження, вібрація, комутаційні навантаження. При

цьому старіння ізоляції в основному обумовлено впливом вологи, теплових навантажень і вібрації, а впливи комутацій і хімічно агресивного середовища тільки стимулюють цей процес. На підставі цього визначено комплекс істотних впливових факторів для умов роботи ТЕД на залізничному транспорті.

Існуючі сучасні методи, алгоритми та методика прогнозування технічного стану ізоляції ТЕД дозволяють з високою точністю передбачати зміну технічного стану ізоляції в залежності від умов експлуатації, за умови достатньо повних даних за параметрами навколишнього середовища та режимів роботи ТЕД [1-7, 9-11].

2. Аналіз існуючих математичних моделей і результати виконаних досліджень показали, що для цілей прогнозування технічного стану ізоляції ТЕД найбільш ефективними є динамічні стохастичні

моделі (для наближених інженерних розрахунків) та детерміновані моделі на основі простих стандартних функцій (для точних розрахунків) [1-7, 3, 8].

3. Для цілей прогнозування технічного стану ТЕД процес старіння його ізоляції можна подати у вигляді математичної моделі зміни стану системи в часі, входами якої є впливові фактори навколишнього середовища та режимів роботи, а виходами - параметри, за допомогою яких можна оцінити технічний стан ізоляції.

### *Список літератури*

1. Гутов, И.А. Прогнозирование состояния электродвигателей на основе использования многофакторных моделей старения изоляции [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / И.А. Гутов. – Барнаул, 1997. – 265 с.
2. Гаскаров, Д.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / Д.В. Гаскаров, Т.А. Голинкевич, А.В. Мозгалевский; под ред. Т.А. Голинкевича. – М.: Сов. радио, 1974. – 224 с.
3. Теория прогнозирования и принятия решений [Текст] / С.А. Саркисян, В.И. Каспин, В.А. Лисичкин [и др.]; под ред. С.А. Саркисяна. – М.: Высш. школа, 1977. – 351 с.
4. Справочник по электрическим машинам [Текст]: в 2 т. / под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1. – 456 с.
5. Надежность и эффективность в технике [Текст]: справочник. В 10 т. Т.9. Техническая диагностика / Под общ. ред. В.В. Клюева, П.П. Пархоменко. – М.: Машиностроение, 1987. – 352 с.
6. Горский, Л.К. Статистические алгоритмы исследования надежности [Текст] / Л.К. Горский. – М.: Наука, 1970. – 219 с.
7. Барлоу, Р. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность [Текст] / Р. Барлоу, Ф. Крошан. – М.: Наука, 1984. – 234 с.
8. Старик, Д.Э. Прогнозирование и эффективность научно-технического прогресса [Текст] / Д.Э. Старик, В.И. Каспин. – М.: МАИ, 1975. – 60 с.
9. Перегудов, Ф.И. Введение в системный анализ [Текст]: учеб. пособие для вузов / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – М.: Высш. шк., 1989. – 367 с.
10. Современные методы идентификации систем [Текст] / П. Эйкхофф, А. Ванечек, Е. Савараги [и др.]: пер. с англ. / под ред. П. Эйкхоффа. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
11. Кашьяп, Р.Л. Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным [Текст] / Р.Л. Кашьяп, А.Р. Рао. – М.: Наука, 1983. – 384 с.
12. Хомутов, О.И. Система технических средств и мероприятий по повышению надежности электрооборудования [Текст]: учеб. пособие / Алт. политехн. ин-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 1989. – 95 с.
13. Хомутов, О.И. Система технических средств и мероприятий повышения эксплуатационной надежности изоляции электродвигателей, используемых в сельскохозяйственном производстве [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук. – Челябинск, 1992. – 450 с.

14. Курочка, А.Л. Увеличение срока службы тяговых электродвигателей [Текст] / А.Л. Курочка, Л.Л. Зусмановская. – М.: Транспорт, 1970. – 136 с.

**Ключові слова:** експлуатація; прогнозування; потужність; електровоз; електродвигун; випробування; ізоляція; ремонт; модернізація; технічний стан.

*Анотації*

Наводяться результати досліджень з прогнозування технічного стану тягового електродвигуна, математичні моделі прогнозування старіння ізоляції. Метод побудови математичної моделі старіння ізоляції.

Приводятся результаты исследований по прогнозированию технического состояния тягового электродвигателя, математические модели прогнозирования старения изоляции. Метод построения математической модели старения изоляции.

The results of research on the prediction of the technical condition of the electrical motor traction, mathematical models predict the aging of insulation. The method of constructing a mathematical model of aging insulation.