

*О.О. Матусевич, канд. техн. наук, Д.В. Міронов*

*(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна)*

## **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РИЗИК – АНАЛІЗУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ**

### **Вступ**

Експлуатація складних технічних систем, у тому числі обладнання тягових підстанцій (ТП) електрифікованих залізниць, пов'язана з довгостроковим плануванням його застосування та прийняттям рішень про можливість експлуатації без проведення ремонтно-відновлювальних робіт протягом заданого терміну служби. Для вирішення цього завдання розробляються і використовуються методики призначення залишкового ресурсу технічних систем, які дозволяють з тією чи іншою точністю прогнозувати момент настання їх граничного стану, тривала експлуатація яких без належного діагностування та якісного технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р), може привести до виходу їх з ладу та значних матеріальних збитків. Також, поступове старіння парку устаткування, зниження запасів міцності в обладнанні гостро поставили питання оцінки його стану і ступеня ризику експлуатації за межами нормованого терміну служби.

Функціонування системи ТО і Р включає в себе моніторинг технічного стану обладнання, аналіз отриманих результатів, своєчасне проведення ремонтів з частковим або повним відновленням ресурсу обладнання при прийнятному рівні матеріальних і фінансових витрат. Однак, на даний час спостерігається суттєве зниження ефективності використовуваної системи планово-попереджувальних ремонтів (ППР) обладнання системи тягового електропостачання (СТЕ). Це викликано недосконалістю планування в сучасних умовах експлуатації та організації ремонтних робіт у частині необґрунтованого зменшення витрат на проведення технічного обслуговування та ремонту, відсутністю якісних запасних частин, тощо. Тому актуальним стає питання розробки і впровадження сучасних методів і способів підвищення ефективності існуючої системи, одним з яких є формування на підприємствах електрифікованих залізниць України системи внутрішнього контролю та управління ризиками експлуатації обладнання тягових мереж. Управління ризиками, в першу чергу, має на увазі їх ідентифікацію, аналіз і прогноз ймовірності їх настання.

### **Мета роботи**

Розробка моделі комплексного дослідження і прогнозування ризиків відмов основного електрообладнання тягових підстанцій та розробка теоретичних принципів вдосконалення системи ТО і Р з застосуванням основних положень ризик-аналізу.

### **Результати дослідження**

В сучасних умовах експлуатації обладнання СТЕ увага з боку керівництва підприємства до управління ризиками обумовлена необхідністю посилення контролю над незапланованими матеріальними і фінансовими витратами при експлуатації обладнання, а також зниженням збитку від виходу його з ладу.

Управління ризиками (ризик-менеджмент) - це логічний і систематичний процес, який можна застосовувати для вибору шляху подальшого вдосконалення експлуатації обладнання, підвищення ефективності функціонування системи ТО і Р та який передбачає ретельний аналіз технічного стану пристрів СТЕ для прийняття рішень.

Ризик-менеджмент включає в себе стратегію і тактику управління [1, 2]. Під стратегією управління розуміються напрям і спосіб використання засобів досягнення поставленої мети. Під тактикою розуміються конкретні методи і прийоми для досягнення стратегічної мети в конкретних умовах. Завданням тактики управління є вибір оптимального рішення і найбільш прийнятних методів і прийомів управління.

Головним принципом побудови системи ризик-менеджменту діяльності дистанції електропостачання електрифікованих залізниць, є комплексний облік ризику при прийнятті рішень з планування діяльності, оцінка результатів діяльності підрозділів дистанції електропостачання та конкретних керівників.

Реалізація системи ризик-менеджменту передбачає:

- організацію ризик-менеджменту (формування спеціальних функцій і процедур в управлінні процесами підприємства та забезпечення їх виконання);

- формування необхідного методологічного забезпечення діяльності з управління ризиками;
- розробку інформаційно-аналітичних систем ризик-менеджменту і їх практичну реалізацію.

Система управління ризиками повинна ґрунтуватися на наступних принципах:

- цілеспрямоване постійне усвідомлення і відстеження ризиків;
- оцінка ймовірності та наслідків виникнення тієї чи іншої несприятливої ситуації;
- формування і постійне оновлення інструментарію управління ризиками;

- встановлення лімітів ризику (максимально точне визначення межі шкоди);
- розробка рекомендацій щодо формування стратегії і ефективного розподілу ресурсів з урахуванням ступеня ризику;
- повнота і своєчасність відображення величин ризиків у системах управлінської інформації (інформаційних системах).

Діагностика ризиків являє собою аналіз бізнес-процесів [3] підприємства з метою виявлення факторів ризику і реалізується в ході ризик-аудиту підприємства, що представляє собою комплексний аналіз параметрів і ділянок діяльності підприємства з метою ідентифікації, опису та класифікації ризиків. Найбільш поширений метод при діагностиці ризиків заснований на статистичних спостереженнях, які є найбільш об'єктивними і точними, але часто важко реалізованими, в першу чергу, внаслідок труднощів формалізації історичних даних і надання їм аналітично прийнятної форми, а часто через відсутність необхідної історичної вибірки. Виявлення ризиків є пріоритетним етапом, фундаментом побудови системи управління ризиками. На ньому ґрунтуються всі інші процедури ризик - менеджменту, так як, зрештою, якісна діагностика визначає успішність управління ризиками та рівень ефективного корпоративного управління в цілому.

Враховуючи розглянутий підхід управління ризиками, розробимо модель і методіку аналізу та оцінки якості експлуатації обладнання ТП з використанням основних принципів теорії ризиків [4, 5, 2].

Модель оцінки технічного стану обладнання тягових підстанцій в загальному вигляді має ймовірнісний характер, а в якості параметрів процесу виступають статистичні характеристики.

Фактичну якість експлуатації обладнання ТП можна формалізувати у вигляді вектора динамічних показників експлуатаційної роботи:

$$Y(t) = [D_j(t), K_{з.відм}(t), K_{відм.i}(t), T_{відм.i}(t), N_{затр.n}(t), T_{затр.n}(t)] \quad (1)$$

де:  $D_j(t)$  - діагностичні оцінки технічного стану  $j$  видів обладнання ТП;  $K_{з.відм}(t)$  - загальна кількість відмов обладнання ТП;  $K_{відм.i}(t), T_{відм.i}(t)$  - кількість і тривалість відмов  $i$  технічних пристроїв обладнання ТП за  $j$  видами;  $N_{затр.n}(t), T_{затр.n}(t)$  - кількість і час затриманих поїздів по  $n$  видам - вантажних, пасажирських, приміських.

Вектор динамічних показників експлуатаційної роботи -  $Y(t)$  залежить від умов експлуатації обладнання ТП на діагностованій ділянці, які характеризуються вектором динамічних показників умов експлуатації:

$$X(t) = [A_{ткм}(t), V_{длі}(t), M_B(t), N_{Пн}(t), W_{епс}(t), U_{рег}(t)] \quad (2)$$

де:  $A_{ткм}(t)$  - перевізна тонно-кілометрова робота в вантажному русі на ділянці, млн. ткм, бруто;  $V_{длі}(t)$  - швидкість на ділянці, км/год;  $M_B(t)$  - середня маса вантажного поїзда, т;  $N_{Пн}(t)$  - кількість об'єднаних на ділянці поїздів по  $n$  видам - вантажних, пасажирських, приміських;  $W_{епс}(t)$  - тягове електроспоживання поїздів;  $U_{рег}(t)$  - вектор регулюючих факторів, що визначають процес експлуатації обладнання ТП.

В результаті проведеного статистичного аналізу процесу експлуатації силового електрообладнання ТП виявлено стохастичний характер відмов обладнання, тому в подальшому процес експлуатації обладнання ТП будемо розглядати, як динамічний керований стохастичний процес.

При цьому при постановці завдання *управління станом обладнання ТП по прогнозованому стану* необхідно оцінювати прогнозовані значення в умовах відомої ретроспективної інформації про фактичний стан обладнання  $Y$ , так і про керовані впливи  $U$ , які спрямовані на підтримку даного стану на протязі часу  $t$  [6-11].

Формалізацію задачі прогнозування стану обладнання ТП можна здійснити при описі її векторним диференціальним рівнянням у формі Ланжевена з адитивним білим шумом, запис якого в безперервному вигляді має вигляд:

$$\dot{y} = f(y, u, t) + \xi(t), \quad (3)$$

де:  $\dot{y}$  - повна похідна вектора показника технічного стану обладнання тягових підстанцій, як оцінки якості стану утримання обладнання ТП за час  $t$ ;  $f$  - векторна функція векторних аргументів показників

технічного стану обладнання ТП ( $y$ ) і показників управління технічним станом обладнання ТП ( $u$ );  $t$  - скалярний аргумент часу;  $\xi(t)$  - випадковий процес білого шуму з нульовим математичним очікуванням.

При розгляді процесу експлуатації обладнання тягових підстанцій у вигляді (3) знаходження оцінки технічного стану  $y$  зводиться до вирішення задачі ідентифікації, яка полягає в тому, що на підставі первинних діагностичних і експериментальних даних про стан обладнання ТП і про умови управління та експлуатації необхідно знайти векторну функцію  $f$ , що належить деякому класу функцій які допускають існування рішень у всьому просторі станів щодо  $y$  або в підгалузях простору станів, в яких дана безперервна функція може мати своє вирішення.

У свою чергу, з урахуванням стохастичного характеру технічного стану обладнання ТП, фактичні показники стану ( $y$ ) можуть залежати або визначатися умовами експлуатації обладнання (наприклад, інтенсивністю руху, швидкістю на ділянці, обсягом тонно-км роботи, тощо), носити інтегруючий характер і обчислюватися спираючись на сукупність вихідних даних (наприклад, рівня ризику та наслідків відмов обладнання ТП) і в загальному випадку описуватися операторною формою взаємозв'язку  $A_t$  з показниками експлуатаційної діяльності ( $x$ ) в попередні моменти часу ( $s$ ) за період спостереження,  $s \in T$  і використанням виразу:

$$y(t) = A_t x(s) \quad (4)$$

В окремому випадку, коли показники управління у технічним станом обладнання в попередні моменти часу  $s$  за період спостереження  $T$  змінюються не частіше, ніж  $x(s)$ , їх також можна віднести до показників, що підпорядковуються співвідношенню (4).

Оцінка та прогнозування показників технічного стану обладнання ТП проходить у два етапи. Спочатку на підставі рівняння (4) методами ідентифікації при спостережуваних значеннях  $y(t)$  і  $x(s)$  визначається оцінка  $A_t^*$  істинного оператора  $A_t$ . Потім знайдена оцінка оператора  $A_t^*$  і спостережуваних значень  $x(t)$  дозволяє визначити оцінку  $y^*$  технічного стану обладнання ТП на підставі виразу

$$y^*(t) = A_t^* x(t) \quad (5)$$

Для визначення класу функцій виразу (5) і вибору коректного методу ідентифікації на математичне очікування функції втрат між фактичним і оцінюваним технічним станом обладнання ТП  $\rho[y_t, y_t^*]$  накладається вимога мінімуму:

$$M\{\rho[y_t, y_t^*]\} = \min \quad (6)$$

і в цьому сенсі накладається вимога близькості оцінки оператора  $A_t^*$  до істинного значення оператора  $A_t$ . При ідентифікації об'єктів управління, як і в більшості практичних випадків, пошук оптимального оператора здійснюється за критерієм мінімуму середнього квадрата помилки, тобто

$$\rho[y_t, y_t^*] = (y_t - y_t^*)^2 \quad (7)$$

Відомо, що при критерії (7) рівняння для визначення оптимальної з точки зору мінімуму середнього квадрата помилки оцінки оператора  $A_t$  являє собою вираз виду

$$y(t) = A_t^* x(s) = M\{Y(t) | x_s, s \in T\}, \quad (8)$$

тобто є оператором умовного математичного очікування або регресією вихідної змінної  $Y(t)$  щодо вхідної  $x(s)$ . Таким чином, з точки зору критерію (7) оптимальним оператором, що описує стан обладнання ТП, в першому наближенні можна вважати клас лінійних операторів.

З урахуванням визначеного вище класу операторів моделі і характеру технічного стану обладнання ТП як багатовимірною і стохастичною, який залежить від умов експлуатації  $X(t)$  і включає процеси

управління  $U_{PEF}(t)$  станом обладнання ТП  $Y(t)$ , як об'єкта моделювання, він може бути описаний через операційну форму зв'язку  $A_t$ , тобто  $Y(t) = A_t(X(t), U_{PEF}(t), \xi(t))$ , де  $\xi$  — стохастична складова через невраховані фактори. Побудова моделі технічного стану обладнання ТП —  $Y^*(t) = A_t^*(X(t), U_{PEF}(t), \xi(t))$  зводиться до пошуку оцінки оператора моделі обладнання ТП ( $A_t^*$ ), розв'язуваної методами параметричної ідентифікації [12,13].

Параметри оператора моделі  $A_t^*$  знаходилися на базі його представлення у вигляді багатовимірної рівняння регресії виду:

$$Y_t^* = a_{0,t} + a_{1,t}X_{1,t} + a_{2,t}X_{2,t} + \dots + a_{m,t}X_{m,t} + \xi_t \quad (9)$$

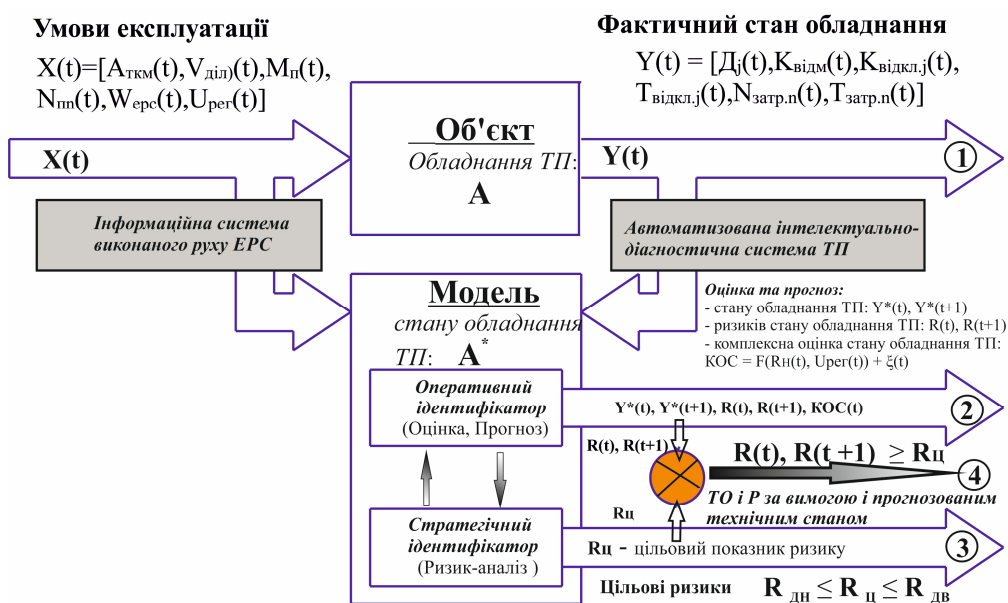
де:  $Y_t^*$  - оцінка дискретних значень вихідного показника в дискретні моменти часу  $t$ ;  $X_{1,t} \div X_{m,t}$  - дискретні значення експлуатаційних і керованих факторів (показників), що використовуються при побудові моделі;  $m$  - кількість використовуваних факторів у моделі;  $a_{0,t} \div a_{m,t}$  - параметри моделі.

Для вирішення поставленого завдання - управління якістю утримання обладнання ТП за прогнозним станом, необхідно знати не тільки фактичні, спостережувані значення вектора показників стану обладнання  $Y^* = [y_1^*, y_2^*, \dots, y_r^*]$  в моменти часу  $t = 1, 2, \dots, r$  або обчислювані їх оцінки  $Y^* = [y_1^*, y_2^*, \dots, y_r^*]$ , але і їх прогнозовані значення. При прогнозуванні момент часу  $t$  на один період вперед позначається, як момент часу  $(t+1)$ , а прогнозовані значення показника як  $Y(t+1)$ . Моменти часу, що передують прогнозованому, - як  $(t-2)$ ,  $(t-1)$ ,  $(t-2)$ , ...,  $(t-r)$ , де  $r$  - останній момент часу в аналізованому ряді. Відповідно, показники в дані моменти часу позначаються як  $Y(t)$ ,  $Y(t-1)$ ,  $Y(t-2)$ , ...,  $Y(t-r)$ . В якості методу прогнозування значень показників стану обладнання ТП і значень ризиків використаємо метод, заснований на побудові авторегресійної моделі однокрокової процедури прогнозування:

$$Y_{t+1} = \sum_{j=0}^r a_j Y_{t-j} + \xi_t \quad (10)$$

де:  $j$  - поточний номер коефіцієнтів  $a_j$  рівняння авторегресії,  $j = 0, 1, 2, \dots, r$ ;  $\xi_t$  - значення шуму апроксимації  $Y_{t+1}$  авторегресії кінцевої довжини.

Функціональну схему розробленої математичної моделі ризик-аналізу та прогнозування технічного стану обладнання ТП представимо на рис. 1.



**Вхідні дані** *Моделі* про умови функціонування обладнання  $X(t)$  надходять у вигляді вектора динамічних показників умов експлуатації з інформаційних систем аналізу та обліку виконання графіку руху ЕРС. Діагностична оцінка параметрів технічного стану  $j$  видів обладнання ТП  $D_j(t)$  надходить в *Моделі* у вигляді результатів діагностичних обстежень обладнання автоматизованою інтелектуально-діагностичною системою ТП. При цьому, загальний підхід до встановлення *визначальних* діагностичних параметрів технічного стану (ДПТС) обладнання ТП полягає у визначенні таких параметрів технічного стану, які при виході за допустимі межі (ознаки) призводять до відмови обладнання. Діагностичні параметри технічного стану повинні задовольняють двом основним вимогам:

- параметр служить індикатором працездатності обладнання;
- параметр відновлюється до вихідного (близького до вихідного) значення в результаті проведення ТО і Р.

Для встановлення ДПТС необхідне проведення комплексу робіт з аналізу проектної документації і даних з експлуатації об'єкту, аналізу результатів контролю його технічного стану, тощо. Методика встановлення ДПТС представлена на рис. 2. У блоках 1, 2, 12 (рис. 2) показані початкові та кінцевий етапи встановлення ДПТС обладнання ТП. В дужках літерами від а до е вказані дані, на основі яких приймається відповідне рішення визначення ДПТС обладнання.

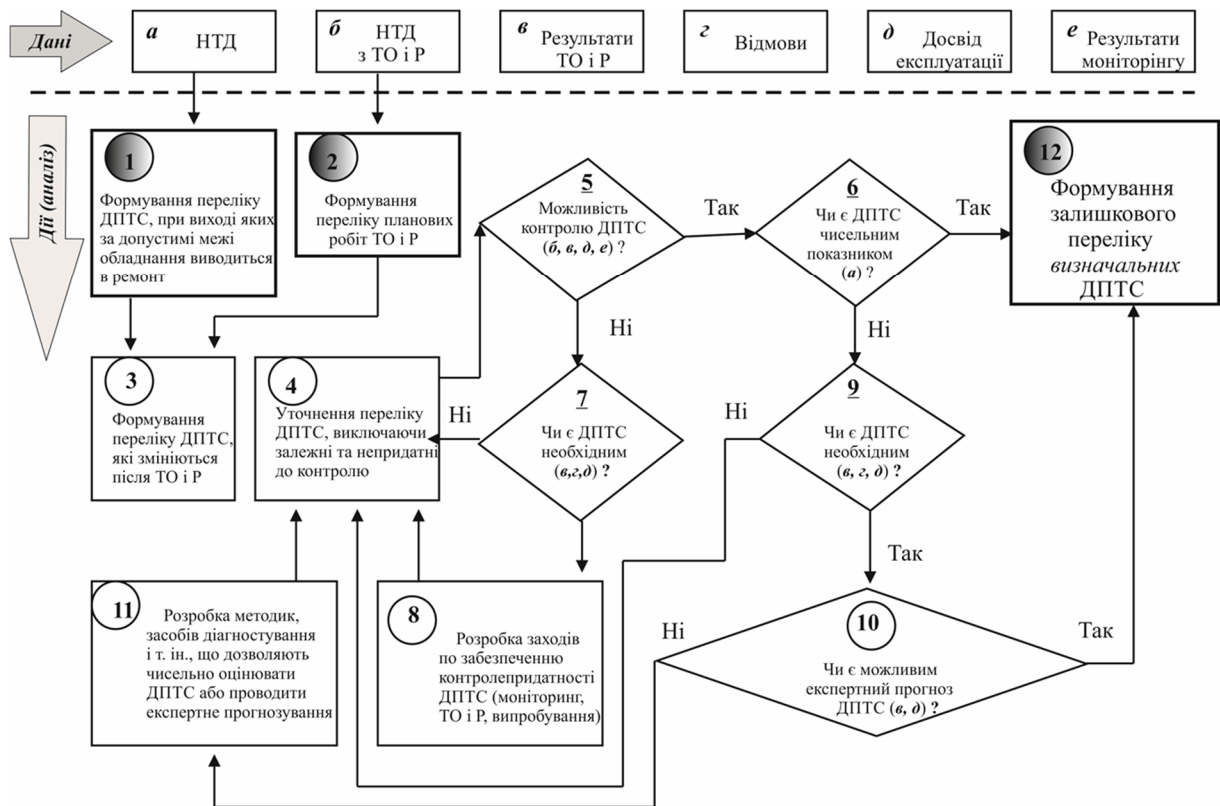


Рис. 2. Процедура встановлення визначальних діагностичних показників технічного стану обладнання тягових підстанцій

Процедура визначення ДПТС обладнання полягає у наступному: якщо показник технічного стану не є чисельним, після перевірки необхідності його обліку проводиться аналіз на можливість експертного прогнозування даного параметра технічного стану обладнання. Якщо така можливість відсутня, ставиться завдання по розробці відповідних методик, засобів діагностики і т. ін., що дозволяють чисельно оцінити параметр технічного стану або забезпечують можливість експертного прогнозування даного параметра. Далі перелік ДПТС уточнюється, і процедура визначення ДПТС повторюється.

**Перший вихід** схеми об'єкта ризик-моделювання (рис. 1) характеризує фактичний стан якості експлуатації обладнання ТП  $Y(t)$ . Склад вектора  $Y(t)$  визначено виразом (1). У модель дані про фактичний технічний стан устаткування  $Y(t)$  надходять з інформаційних систем.

**Другий вихід** моделі характеризується вектором оцінок показників:

$$Y^*(t) = [D_j(t), K_{з.відм}(t), K_{відм.i}(t), T_{відм.i}(t), A_{з.ткм}(t)] \quad (11)$$

В якості інтегрального показника збитку по господарству електрифікації прийнятий  $A_{з.ткм}$  - збиток в поїзній роботі від затримки поїздів (по видам - вантажних, пасажирських, приміських), який формується з показників входу і виходу як:

$$A_{з.ткм}(t) = (T_{затр}(t) \cdot V_{дiл}(t) \cdot N_{затр}(t) \cdot m_{п}(t)) \quad (12)$$

де  $T_{затр}(t)$  - час затримки поїздів на момент часу  $t$ ;  $V_{дiл}(t)$  - значення швидкості поїздів на даній ділянці на момент часу  $t$ ;  $N_{затр}(t)$  - кількість затриманих поїздів;  $m_{п}(t)$  — середня вага поїзда на момент часу  $t$ .

Оцінки  $Y^*(t)$  відмінні від  $Y(t)$  статистичною формою подання показників технічного стану обладнання ТП на базі наступних обчислень: математичного очікування показників ( $M$ ), модального значення ( $mod$ ), стандартного відхилення ( $\sigma$ ), ранжируваних значень показників (АВС-аналіз) і ступеня взаємодії показників. Показник  $Y^*(t+1)$  - вектор прогнозних значень  $Y^*(t)$  на один період спостережень вперед, який визначається методом лінійного прогнозу.

Також на даному виході моделі формуються оцінки обчислюваних ризиків стану обладнання ТП  $R(t)$  та прогноз ризиків  $R(t+1)$ . Оцінка найбільш ймовірних ризиків  $R_H$  подій, порушень і збитку визначається як добуток значення модальної ймовірності та модального значення відповідного показника, наприклад  $R_{Аз.н} = P_{Аз} \cdot mod A_{з.ткм}$ .

Так само, на другому виході моделі формується показник *комплексна оцінка стану* обладнання ТП:  $KOC(t) = F(R_H(t), U_{PEГ}(t)) + \xi_H$ , де:  $F$  - функціонал від найбільш вірогідних значень факторів;  $\xi_H$  - найбільш ймовірна помилка  $\xi(t)$ .

На *третьому виході* моделі формуються обчислювані нормативно допустимі верхні  $R_{дв}$  і нижні  $R_{дн}$  межі діапазонів ризиків в рамках обраної довірчої ймовірності.

На *четвертому виході* моделі аналізується виконання цільових показників ризику  $R_{ц}$  в зіставленні з поточним фактичним станом ризику  $R(t)$ . При знаходженні значень ризиків в допустимому діапазоні, тобто  $R(t) \leq R_{ц}$  виконуються штатні заходи ТО і Р з технічного утримання і ремонту устаткування ТП. При  $R(t) \geq R_{ц}$  здійснюються заходи з метою виявлення причин відхилень, а також проводиться обслуговування та ремонт обладнання ТП за вимогою і прогнозованому технічному стану.

## Висновок

В результаті проведених досліджень розроблено модель ризик-аналізу та прогнозування технічного стану обладнання тягових підстанцій. Описано основні положення теорії ризиків та шляхи її застосування стосовно системи технічного обслуговування і ремонту електроустаткування. Розглянуто математичний апарат запропонованої моделі. Розроблена модель ризик-аналізу технічного стану обладнання тягових підстанцій дозволяє оцінювати рівень якості його обслуговування, а також приймати оптимальні рішення про стратегії ТО і Р при порівнянні поточних і цільових показників ризиків та їх наслідків. Розглянута функціональна стратегія управління ризиками спрямована на подальше вдосконалення експлуатації обладнання ТП, регламентує підвищення якості і ефективності системи ТО і Р на базі виявлення потенційних областей ризику та їх оцінки, попередження виникнення ризиків на основі їх систематичного прогнозування та оцінки технічного стану пристроїв ТП для прийняття рішень.

## Список літератури

1. Авдийский, В. И., Курмашов Ш. Р. Прогнозирование и анализ рисков в деятельности хозяйствующих субъектов : монография [Текст] / В. И. Авдийский, Ш. Р. Курмашов, под общ. ред. М. А. Эскиндарова // М.: ФА, 2003. – 392 с.
2. Тарасов, Е. М. Основные подходы к оценке рисков вложения инвестиций в систему организации железнодорожного транспорта [Текст] / Е. М. Тарасов // Самара: СНЦ РАН, 2010. — 124 с.
3. ГОСТ Р ИСО 9001-2001. Системы менеджмента качества. Основные положения.
4. Галкин, А. Г. Теоретические принципы построения модели риск-анализа процессов содержания объектов инфраструктуры ОАО «РЖД» [Текст] / А. Г. Галкин, С. А. Митрофанов // Известия Академии

управления: теория, стратегия, инновации: теоретический и научно-методический журнал. — 2011. — № 3 (4). — С. 29–39.

5. Галкин, А. Г. Статистический анализ адекватности оценки состояния контактной сети на филиалах ОАО «РЖД» [Текст] / А. Г. Галкин, С. А. Митрофанов // Инновационный транспорт: научно-публицистическое издание — 2011. — № 1(1). — С. 48–54.

6. Веников, В. А. Кибернетические модели электрических систем : учеб. пособие для вузов [Текст] / В.А. Веников, О.А. Суханов // М.: Энергоиздат, 1982. — 328 с.

7. Зарубин, В. С. Математическое моделирование в технике [Текст] / В. С. Зарубин, А. П. Крищенко // М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. — 496 с.

8. Клейн, Д. Ж. Статистические методы в имитационном моделировании [Текст] / Д.Ж. Клейн // М.: Статистика, 1978. — 251 с.

9. Райбман Н. С. Построение моделей процессов производства [Текст] / Н.С. Райбман, В.М. Чадеев // М.: Энергия, 1975. — 375 с.

10. Чхартишвили, Г. С. Идентификация динамических объектов. Автоматическое управление [Текст] / Г.С. Чхартишвили, В.И. Доценко // М.: МЭИ, 1980. — 40 с.

11. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния [Текст] / П. Эйкхофф // М.: «Мир», 1975. — 680 с.

12. Сошникова, Л. А. Многомерный статистический анализ в экономике : учеб. пособие для вузов [Текст] / Л. А. Сошникова, В. Н. Тамашевич, Г. Узбе, М. Шеффер // М.: ЮНИТИ-ДАНА, 1999. — 598 с.

13. Семенычев, В. К. Информационные системы в экономике. Эконометрическое моделирование инноваций. Ч. 1 : учеб. пособие [Текст] / В. К. Семенычев, Е. В. Семенычев // Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. — 217 с.

*Рекомендовано до друку: д.т.н., Сиченко В.Г. (ДНУЗТ)*