

О. О. МАТУСЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент ДНУЗТ, Дніпропетровськ

МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ НА ОСНОВІ БЕЗПЕРЕРВНОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ FMEA

Вступ. Якість ефективності організації процесу експлуатації силового електроустаткування тягових підстанцій (ТП) дистанцій електропостачання залізниць може бути досягнута при отриманні оптимального технічного стану устаткування по відношенню до початкового і надалі забезпечення експлуатаційної надійності устаткування на заданому рівні. Згідно основних положень нормативно технічних документів підтримка необхідного рівня надійності електроустаткування ТП в процесі експлуатації забезпечується, з одного боку за рахунок значного коефіцієнта запасу ресурсу устаткування, закладеного при його створенні, а з іншого боку, системою технічного обслуговування і ремонтів (ТО і Р). Дана система базується на проведенні планових профілактичних робіт (ППР) після напрацювання певного години (система планово попереджувальних ремонтів) [1]. Проте, іноді таке обслуговування призводить до невиправданих витрат, оскільки реальний технічний стан електроустаткування ТП у момент проведення робіт може і не вимагати технічного обслуговування, а замінювані деталі ще не досягли критичної міри зносу. Також, нині, практично відсутнє необхідне фінансово - технічне забезпечення проведення ППР в повному обсязі, а поступове старіння парку устаткування ТП і зниження запасів міцності гостро ставлять питання оцінки рівня ризику його експлуатації за межами встановленого терміну служби (наприклад, на залізницях України 82,9% ТП і її основне устаткування працюють з терміном служби більше 30 років) [2,3]. Це змушує шукати нові підходи і методи вдосконалення системи ТО і Р силового устаткування ТП дистанцій електропостачання залізниць.

Постановка завдання. Вдосконалення системи ТО і Р ТП, згідно нормативно технічної документації, торкається в основному методів контролю параметрів устаткування в процесі експлуатації і методів розрахунку призначеного ресурсу [1]. Проте відсутність необхідного фінансово-технічного забезпечення проведення ППР вимагає нових підходів до системи технічного обслуговування і ремонту. Нині ефективність експлуатації устаткування ТП електрифікованих залізниць усе більшою мірою стає залежною від діяльності ремонтних служб, покликаних забезпечувати процес підтримки технологічного устаткування в працездатному стані з мінімальними ремонтними витратами [4]. Проте, незважаючи на важливу роль ремонтних служб в забезпеченні якісного ТО і Р устаткування, рівень технічної оснащеності підрозділів дистанцій електропостачання, їх організації і управління поки що не відповідає вимогам нормативних актів. Глибинну основу проблеми складає не стільки само устаткування, скільки система роботи з ним на всіх стадіях його життєвого циклу: від проектування, установки і введення його в дію до експлуатації, технічного обслуговування і утилізації. Аналіз сучасних методів підвищення ефективності функціонування підприємств показує [4,5], що вирішення проблеми вдосконалення системи технічного обслуговування і ремонту технологічного устаткування може здійснюватися також на основі досягнень сучасного менеджменту.

Матеріали дослідження. Підвищення вимог до надійності і безпеки залізничних перевезень зумовили застосування нових методів системного аналізу технічного стану об'єктів системи тягового електропостачання. Як один з таких методів можна запропонувати метод аналізу видів і наслідків потенційних невідповідностей процесу - (Failure Mode and Effects Analysis), далі іменованій - метод FMEA, також його різновид, звана FMECA (аналіз причин, наслідків і критичності порушення процесу) що розширює можливості цього методу за рахунок ранжирування тяжкості наслідків порушення процесу (відмов), що дозволяє встановити пріоритетність застережливих дій. У світі накопичений майже 25-річний досвід розробки і успішного застосування FMEA - аналіза. Так в США було здійснено перше формалізоване нововведення FMEA (програма Apollo). Головним завданням FMEA/FMECA, для системи ТО і Р ТП, являється менеджмент якості процесів системи і безперервне її вдосконалення при забезпеченні виявлення потенційних невідповідностей (дефектів) і запобігання їх появи на всіх стадіях життєвого циклу електротехнічного устаткування ТП. Нині не менше 80% розробок технічних виробів і технологій проводиться із застосуванням аналізу видів і наслідків потенційних невідповідностей (FMEA -методології) [6,7,8].

Аналіз видів і наслідків потенційних невідповідностей широко застосовується багатьма світовими компаніями як для розробки нових конструкцій і технологій, так і для аналізу і планування якості виробничих процесів і продукції. Методологія FMEA дозволяє оцінити ризики і можливий збиток, викликаний потенційними невідповідностями конструкції і технологічних процесів на самій ранній стадії проектування і створення готового виробу або його комплектуючих. Сфера застосування методу охоплює усі етапи життєвого циклу продукції і будь-які технологічні процеси. Найбільший ефект дає застосування FMEA на етапах розробки конструкції і процесів, проте і в діючому виробництві метод може ефективно застосовуватися для аналізу невідповідностей і їх причин, не виявлених при розробці устаткування або обумовлених чинниками мінливості процесів експлуатації [9,10,11].

Метою цього аналізу є виявлення і оцінка потенційних дефектів (відмов) устаткування або процесу, визначення дій, які можуть усунути або зменшити вірогідність виникнення потенційних відмов, і

Основа запропонованої методики FMEA полягає в ідентифікації усіх потенційно можливих помилок або відмов системи (процесу або устаткування). Цей процес заснований на складанні списку усіх можливих відмов (порушень) з наступним його аналізом і наступною числовою оцінкою. Бальну оцінку коефіцієнтів проводить експертна група [4-6], яка може формуватися з представників технічної служби дистанції електропостачання і фахівців ТП.

Для будь-якого потенційного порушення процесу ТО і Р, дефекту або відмови устаткування, згідно методики FMEA, визначаються три показники по трьох критеріях (шкала від 1 до 10) [5-12]:

- коефіцієнт тяжкості порушення (K_S), враховує значення наслідків цього порушення і -ої операції ТО і Р (тяжкість наслідків прояву причин порушення (відмов)). Ймовірність P_S того, що вийде з ладу устаткування ТП (маловірогідно =1; майже напевно =10);
- коефіцієнт частоти порушення операції (K_O), оцінка частоти (ймовірність P_O відмови) порушення і -ої операції ТО і Р. Небезпека порушення (вплив незначний =1; надзвичайний вплив = 10);
- коефіцієнт (K_D), враховує ймовірність P_D , оцінка ймовірності не виявлення порушення і -ої операції ТО і Р до прояву його наслідків (на ранніх стадіях). Можливість виявлення порушення (виявлення ймовірне = 1; виявлення малоймовірне = 10).

Для перших двох критеріїв ця шкала зростає, тобто чим вище значущість або частота появи порушення, тим вище відповідні оцінки. Для третього критерію шкала убиває - чим вище можливість виявлення цього порушення, тим нижче відповідна оцінка.

Для розрахунку критичності порушення операції ТО і Р можна використовувати інтегральну оцінку критичності цього порушення (K_R), так зване (Risk Priority Number - RPN) - пріоритетне число ризику (ПЧР), яку обчислюється як множення розглянутих вище коефіцієнтів:

$$K_R = K_S \cdot K_O \cdot K_D \quad (1)$$

По потенційних відмовах, що мають значення RPN вище критичного, розробляються необхідні заходи щодо мінімізації ризику їх появи. Для проведення FMEA на дистанції електропостачання створюється спеціальна міжфункціональна команда, склад якої визначається видом FMEA. FMEA -команда за допомогою інтелектуального методу (мозкового штурму) визначає потенційні дефекти системи або процесу, складає їх перелік, оцінює по трьох вищезгаданих критеріях, розраховує значення RPN і порівнює їх з критичним значеннями, пропонує рішення по мінімізації впливу аналізованих дефектів (відмов).

Процес вироблення оцінки ризику в основному складається з наступних етапів:

- визначення інтенсивності відмов - λ ;
- оцінка ймовірності $\overline{P_S}$ виникнення порушення (відмови) за допомогою інтенсивності відмов - λ ;
- оцінка тяжкості наслідків K_S виникнення порушення (колонка 4);
- оцінка ймовірності P_D виявлення дефекту;
- розрахунок пріоритетного числа ризику RPN (колонка 9).

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ системи при виникненні порушення (відмови) в період $[t, t + \Delta t]$ після проведення ТО і Р за умови, що система була включена в момент $t = 0$ і в період $[0, t]$ працювала безвідмовно можна розрахувати по формулі:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = - \frac{dP_S(t)}{P_S(t) dt} \quad (2)$$

Де $P_S(t)$ - функція розподілу вірогідності безвідмовної роботи системи, яка може визначатися через інтенсивність відмов $\lambda(t)$:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (3)$$

При $t = 0$, $P(t = 0) = 1$.

$F(t)$ - функція розподілу в часі вірогідності відмови $\overline{P_S}$ і $f(t)$ відповідно щільність цього розподілу для випадкової величини (відмова якого-небудь компонента системи), які пов'язані між собою виразами:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (4)$$

за умови, що

$$\int_0^t f(t) dt = 1 \text{ і } t \geq 0 \quad (5)$$

Для стаціонарних процесів з постійною інтенсивністю відмов λ часто використовуваними функціями розподілу є експоненціальний розподіл

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (6)$$

і розподіл Вейбулла - Гнеденко

$$F(t) = 1 - e^{-(\lambda t)^\beta} \quad (7)$$

де $\beta = 0 \dots \infty$ означає коефіцієнт, що дозволяє точніше визначити реальну зміну функції розподілу.

Ризик R суб'єктивна міра оцінки тяжкості наслідків і вірогідності виникнення відмови за заданий період часу (використовуваний для аналізу). Ризик R визначається як множення щільності вірогідності P настання небезпечної події, яка призводить до виникнення збитку, і міри завданого збитку S (міра тяжкості збитку):

$$R = P \cdot S \quad (8)$$

де, щільність вірогідності P обчислюється за допомогою множення вірогідностей, а саме з вірогідності P_1 що описує вірогідність настання збитку, і умовній вірогідності P_2 настання збитку, який проте не буде виявлений:

$$R = P_1 \cdot P_2 \cdot S \quad (9)$$

У FMEA теж аналізується міра ризику настання збитку. Проте в FMEA визначається не вірогідність настання збитку, а виробляється оцінка міри небезпеки цього дефекту з допомогою пріоритетного числа ризику RPN (ПЧР). Рівняння (9) видозмінюється шляхом заміщення складових його чинників P_1 , P_2 і S чинниками K_O (частота настання), K_D (частота виявлення) і K_S (тяжкість наслідків відмови).

$$RPN = K_O \cdot K_D \cdot K_S \quad (10)$$

Величина RPN може набувати значень від 1 до 1000 і служить оцінкою рівня ризику цієї відмови. Одне з основних завдань проведення FMEA - виявлення відмов з максимальними RPN і їх послідовне зниження. На практиці зазвичай орієнтуються на граничне значення RPN як правило, не вище 100...125 (критичне значення RPN). Це значення проте не є універсальним, оскільки в різних областях як сама верхня межа, так і відповідність критеріїв оцінки на шкалі для K_S , K_O і K_D носять різний характер. Необхідно далі враховувати, що індивідуальні оцінки для K_S , K_O і K_D не повинні перевищувати 8 балів без того, щоб провести повторну ґрунтовну перевірку:

- $K_S > 8$ - неприпустимий стан системи / порушення нормативних вимог, ризик для безпеки;
- $K_O > 8$ - дефект з особливо частим виникненням;
- $K_D > 8$ - дефект, що абсолютно не виявляється.

Виявлені "вузькі місця", - системи ТО і Р силового електрообладнання ТП, для яких RPN буде більше 100...125, - піддаються змінам, тобто розробляються коригувальні заходи [9,12]. У наслідку цього, наступним етапом підвищення ефективності системи ТО і Р ТП являється проведення оцінки результатів аналізу (поліпшення якості) системи.

Для пріоритетних чисел ризику $RPN > 100 \dots 125$ і / або окремих оцінок для K_S , K_O чи $K_D > 8$ необхідно виробити заходи по поліпшенню системи ТО і Р ТП. Тут виникають різні принципові підходи, які різняться в їх ефективності і мірі дії на оцінки величин K_S , K_O чи K_D :

- Недопущення виникнення причин відмови - $K_O = 1$
- Створення перешкод на шляху виникнення причин відмови - K_O зменшується
- Зменшення впливу наслідків відмов - K_S зменшується
- Підвищення вірогідності виявлення відмов - K_D зменшується.

Заходам, спрямованим на попередження відмов, виходячи з економічних міркувань, необхідно віддавати перевагу перед заходами щодо виявлення відмов. Хоча заходи щодо виявлення відмов і підвищують вірогідність виявлення, однак сморід не ведуть безпосередньо до поліпшення якості процесу ТО і Р. Також далеко від ідеального рішення зниження тяжкості наслідків відмов, оскільки воно вимагає великих витрат. Як правило, тяжкість наслідків в основному знижують конструктивними заходами, наприклад резервуванням. Тому зниження кількості можливих відмов (дефектів) устаткування ТП, за рахунок вдосконалення системи ТО і Р, має бути першочерговим завданням заходів по поліпшенню якості системи обслуговування. При цьому важливо чітко прояснити розподіл відповідальності і контролю сторін, що беруть участь в системі ТО і Р. Розроблені заходи по поліпшенню якості мають бути зафіксовані в плані реалізації з прив'язкою за часом з урахуванням тривалості їх реалізації і очікуваної вартості.

У оцінці результатів мають бути документовані наслідки заходів по поліпшенню якості системи ТЕ і Р. Для цього повторно проводиться оцінка міри ризику. Поліпшення якості вважається досягнутим, якщо нове пріоритетне число ризику RPN після удосконалення системи має менше значення чим раніше. Після реалізації запланованих заходів параметри оцінок нового поліпшеного стану системи ТЕ і Р тягових підстанцій електрифікованих залізниць переносяться в актуальний опис і вносяться до формуляру FMEA.

Практичне застосування цієї методики FMEA з метою вдосконалення системи ТО і Р тягових підстанцій дистанцій електропостачання буде опубліковано в наступних статтях.

Висновки. На сьогодні методика FMEA/FMECA застосовується у всьому світі в різних галузях промисловості і стає невід'ємною частиною систем забезпечення якості. Особливо необхідно проводити FMEA/FMECA при створенні нових виробничих процесів для перевірки забезпечення ними необхідної якості продукції. До основних завдань вдосконалення системи ТО і Р тягових підстанцій по забезпеченню якості відносяться - виявлення і попередження функціональне слабких і критичних відносно надійності і безвідмовності устаткування місць і створення документації по забезпеченню якості. Поліпшення якості вважається досягнутим, якщо нове пріоритетне число ризику RPN після удосконалення системи має менше значення чим раніше.

Запропонована методика безперервного вдосконалення системи ТО і Р тягових підстанцій дозволяє здійснювати аналіз критичності операцій і підпроцесів системи, а також визначати область оперативного втручання в процес технічного обслуговування і ремонту устаткування при експлуатації, упродовж життєвого циклу. Згідно цієї методики мають бути розроблені напрями дії на вдосконалення процесу обслуговування устаткування, реалізація яких приведе до підвищення надійності і ефективності тягового електропостачання залізниць.

Список літератури:

1. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць / Державна адміністрація залізничного транспорту України Укрзалізниця, К., 2013. – 27с.
2. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2013 році / – К.: Видавництво ТОВ «Девалта», 2014. - 251 с. **3.** Матусевич, О.О. Дослідження експлуатації силового обладнання системи тягового електропостачання залізниць / О.О. Матусевич, Д.В. Міронов // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2015. - № 1(55). - С. 62-77. **4.** Матусевич, О.О. Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій / О.О. Матусевич. - Дніпропетровськ: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - 2015. - 295 с. **5.** ISO/ IEC 31010:2009, Risk Management - Risk Assessment Techniques, 2015. **6.** North American Aviation, Space and Information System Division, SID-62-203-R-1, Apollo reliability Program Plan, 15 May 1963. **7.** McDermott, Robin E.; Mikulak, Raymond J.; Beauregard Michael R. The Basics of FMEA [Електронний ресурс]. - Productivity Press, 1996. - 80 p. Режим доступу: http://www.academia.edu/5343417/Reliability_Study_on_Spark_Plugs_Using_Process_FailureMode_and_Effect_Analysis. **8.** National Aeronautics and Space Administration, NASA/SP-2000-6110, Failure Modes and Effects Analysis (FMEA). A Bibliography, July 2000. **9.** Розно М.И. Как научиться смотреть вперед? Внедрение FMEA-методологии. Методы менеджмента качества, 2000, № 6, с.25-28. **10.** Долин, А. П. Опыт проведения комплексных обследований силовых трансформаторов / А.П. Долин, Н.Ф. Першина, В.В. Сmealov // Электрические станции. 2000. - № 6.- С. 46-52. **11.** Годлевский, В.Е. Применение метода анализа видов, причин и последствий потенциальных несоответствий (FMEA) на различных этапах жизненного цикла автомобильной продукции / В.Е. Годлевский, А.Я. Дмитриев, Г.Л. Юнак. - Самара: Перспектива. 2002. - 160 с. **12.** Качалов, В.А. Метод FMEA : Анализ видов потенциальных дефектов и их влияния / В.А. Качалов // TQM-XXI. Проблемы, опыт, перспективы. Вып.2. Москва: ИздАТ.- 1997. - с.226 - 286.

Bibliography (transliterated):

1. *Instruktsiya z tekhnichnogo obslugovuvannya i remontu obladnannya tyagovikh pidstantsiy, punktiv zhivlennya i sektionuvannya elektrifikovanih zaliznits.* Kyiv, 2013, 27 p. **2.** *Analiz roboti gospodarstva elektrifikatsii ta elektropostachannya v 2013 rotsi.* Kyiv: LLC "Devalta", 2014, 251 p. **3.** Matusevich, O. O., Mironov, D. V. *Doslidzhennya ekspluatatsii silovogo obladnannya sistemi tyagovogo elektropostachannya zaliznits'.* Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana. No. 1 (55), 2015, pp. 62-77. **4.** Matusevich, O. O. *Udoskonalennya metodologii sistemi tekhnichnogo obslugovuvannya i remontu tyagovikh pidstantsiy.* Dnipropetrovsk: Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana, 2015, 295 p. **5.** ISO/ IEC 31010:2009, Risk Management - Risk Assessment Techniques, 2015. **6.** North American Aviation, Space and Information System Division, SID-62-203-R-1, Apollo reliability Program Plan, 15 May 1963. **7.** McDermott, Robin E.; Mikulak, Raymond J.; Beauregard Michael R. *The Basics of FMEA.* Productivity Press, 1996. - 80 p. **8.** National Aeronautics and Space Administration, NASA/SP-2000-6110, Failure Modes and Effects Analysis (FMEA). A Bibliography, July 2000. **9.** Rozno, M.I. *Kak nauchit'sya smotret' vpered? Vnedrenie FMEA-metodologii. Metody menedzhmenta kachestva.* 2000, No. 6, pp. 25-28. **10.** Dolin, A. P., Pershina, N. F., Smekalov, V. V. *Opyt provedeniya kompleksnykh obsledovaniy silovykh transformatorov.* Elektricheskie stantsii, 2000, No. 6. pp. 46-52. **11.** Godlevskiy, V.E., Dmitriev, A. Ya., Yunak, G.L. *Primenenie metoda analiza vidov, prichin i posledstviy potentsial'nykh nesootvetstviy (FMEA) na razlichnykh etapakh zhiznennogo tsikla avtomobil'noy produktsii.* Samara: Perspective, 2002. 160 p. **12.** Kachalov, V.A. *Metod FMEA : Analiz vidov potentsial'nykh defektov i ikh vliyaniya.* TQM-XXI. Problemy, opyt, perspektivy. Moscow: IzdAT, 1997. Iss. 2. pp. 226-286.

Надійшла (received)

Анотація

Запропоновані теоретичні підходи і методичне забезпечення вирішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення якості і ефективності системи технічного обслуговування і ремонту устаткування тягових підстанцій електрифікованих залізниць в процесі експлуатації.

З метою підвищення надійності електропостачання залізниць і зниження аварійності силового електроустаткування проведено дослідження методу аналізу видів і наслідків потенційних невідповідностей процесу FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). Проведений аналіз основних методів розрахунку критичності порушення операції технічного обслуговування і ремонту пристроїв тягових підстанцій електрифікованих залізниць.

Запропонована методика FMEA процесу технічного обслуговування і ремонту електроустаткування тягових підстанцій електрифікованих залізниць спрямована на підвищення надійності роботи устаткування і досягнення оптимальної експлуатації його протягом усього життєвого циклу а також зниження витрат на експлуатацію силового устаткування за рахунок безперервного вдосконалення системи обслуговування.

Ключові слова: електропостачання, електрифіковані залізниці, метод FMEA, тягова підстанція, електрообладнання, технічне обслуговування і ремонт, надійність, система, життєвий цикл, технічний стан.

Аннотация

Предложены теоретические подходы и методическое обеспечение решения актуальной научно-технической проблемы повышения качества и эффективности системы технического обслуживания и ремонта оборудования тяговых подстанций электрифицированных железных дорог в процессе эксплуатации.

С целью повышения надежности электроснабжения железных дорог и снижения аварийности силового электрооборудования проведено исследование метода анализа видов и последствий потенциальных несоответствий процесса FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). Проведен анализ основных методов расчета критичности нарушения операции технического обслуживания и ремонта устройств тяговых подстанций электрифицированных железных дорог.

Предложенная методика FMEA процесса технического обслуживания и ремонта электрооборудования тяговых подстанций электрифицированных железных дорог направлена на повышение надежности работы оборудования и достижения оптимальной эксплуатации его в течение всего жизненного цикла а также снижения расходов на эксплуатацию силового оборудования за счет непрерывного совершенствования системы обслуживания.

Ключевые слова: электроснабжение, электрифицированные железные дороги, метод FMEA, тяговая подстанция, электрооборудование, техническое обслуживание и ремонт, надежность, система, жизненный цикл, техническое состояние.

Annotation

The theoretical and methodological approaches are proposed to provide the solution actual scientific and technical issues to improve the quality and efficiency of the maintenance and repair of traction substations of electrified railways in operation.

In order to increase reliability of power supply of railways and reduce accidents of electric power was studied the method of analysis of species and the effects of potential inconsistencies of FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). The analysis of the main methods for calculating critical violations operations of maintenance and repair devices of traction substations of electrified railways was made.

The proposed method of the FMEA process of maintenance and repair of electric traction substations of electrified railways is aimed to the improving the reliability of the equipment and its optimum operation throughout the entire life cycle as well as reducing the cost of operation of power equipment through continuous improvement of the service system.

Keywords: power supply, electrified railways, FMEA method, traction substation, electric equipment, maintenance and repair, reliability, system, life cycle, technical condition.