

О.О. Матусевич, канд. техн. наук

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

БЕЗПЕРЕРВНЕ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЗАЛІЗНИЦЬ

Анотація. Підвищення ефективності організації процесу експлуатації силового електрообладнання тягових підстанцій може бути досягнуто при підтримці оптимального технічного стану обладнання по відношенню до початкового та забезпеченні надійності на заданому рівні.

Розглянуто підходи вирішення проблеми підвищення якості і ефективності системи технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць в процесі експлуатації. Запропоновано методіку безперервного вдосконалення процесу технічного обслуговування і ремонту електрообладнання протягом всього життєвого циклу. Згідно з даною методикою проведено розрахунок критичності порушення операцій підпроцесу поточного ремонту силового трансформатора, а також критичність підпроцесів технічного обслуговування силового електрообладнання тягової підстанції.

Ключові слова: тягова підстанція, метод FMEA, електрообладнання, технічне обслуговування і ремонт, система, життєвий цикл, технічний стан

Аннотация. Повышение эффективности организации процесса эксплуатации силового электрооборудования тяговых подстанций может быть достигнуто при поддержании оптимального технического состояния оборудования по отношению к исходному и обеспечении надежности на заданном уровне.

Рассмотрены подходы решения проблемы повышения качества и эффективности системы технического обслуживания и ремонта оборудования тяговых подстанций электрифицированных железных дорог в процессе их эксплуатации. Предложена методика непрерывного совершенствования процесса технического обслуживания и ремонта электрооборудования в течение всего жизненного цикла. Согласно данной методике проведен расчет критичности нарушения операций подпроцесса текущего ремонта силового трансформатора, а также критичности подпроцессов технического обслуживания силового электрооборудования тяговой подстанции.

Ключевые слова: тяговая подстанция, метод FMEA, электрооборудование, техническое обслуживание и ремонт, система, жизненный цикл, техническое состояние

Abstract. Improving the efficiency of the organization of operation of power electric equipment of traction substations can be achieved while maintaining the optimal technical condition of the equipment in relation to the initial, and ensuring the reliability of a given level. In this regard, the article considers approaches to solve the problem to improve the quality and efficiency of the maintenance and repair of traction substations of electrified railways in operation. The technique of continuous improvement of the process of maintenance and repair of electrical equipment throughout the whole life cycle is proposed. Calculation of critical violations operations a subprocess routine repairs of the power transformer and the criticality of the of subprocesses maintenance power electric equipment of traction substation is carried out by this method.

Keywords: traction substation, method FMEA, electrical equipment, maintenance and repair, system, life cycle, technical condition

Вступ

Підвищення ефективності організації процесу експлуатації силового електрообладнання тягових підстанцій (ТП) може бути досягнуто при отриманні оптимального технічного стану обладнання відносно до початкового і забезпеченні надійності обладнання на заданому рівні. Нині організація процесу експлуатації електрообладнання ТП дистанцій електропостачання залізниць України виконується згідно з відомчими нормативними документами. Згідно основних положень цих документів підтримка необхідного рівня надійності електрообладнання в процесі експлуатації забезпечується, з одного боку, за рахунок значного коефіцієнта запасу ресурсу обладнання, закладеного при його створенні, а з іншого боку, системою технічного обслуговування і ремонтів (ТО і Р). Ця система базується на проведенні планових профілактичних робіт (ППР) після напрацювання певного часу (система планово-запобіжних ремонтів) [1]. Проте, іноді таке обслуговування призводить до невиправданих витрат, оскільки реальний технічний стан електрообладнання ТП у момент проведення робіт може і не вимагати технічного обслуговування, а замінені деталі ще не досягли критичної міри зносу. Окрім цього, нині практично відсутнє необхідне

фінансово-технічне забезпечення проведення ППР у повному об'ємі, а поступове старіння парку устаткування ТП і зниження запасу міцності гостро ставлять питання щодо оцінки рівня ризику його експлуатації за межами встановленого терміну служби (наприклад, на залізницях України 82,9 % ТП і основного устаткування працюють більше 30 років) [2].

Виходячи з існуючих умов експлуатації ТП, основною метою вдосконалення системи ТО і Р силового електрообладнання ТП на сьогодні є: забезпечення необхідного рівня надійності, безпека й ефективність функціонування електрообладнання при мінімальних витратах на експлуатацію. Вдосконалення системи технічного обслуговування і ремонту стосується в основному методів контролю параметрів у процесі обстеження технічного стану і методів розрахунку ресурсу обладнання та наявності моделей, які визначають напрацювання на відмову електрообладнання ТП з урахуванням його індивідуальних особливостей.

Аналіз сучасних методів підвищення ефективності функціонування підприємств виявив [3-4], що вирішення проблеми вдосконалення системи технічного обслуговування і ремонту технологічного обладнання може здійснюватися також на основі досягнень науки сучасного менеджменту.

Мета роботи

Розробка моделі безперервного вдосконалення процесу технічного обслуговування і ремонту електрообладнання тягових підстанцій та теоретичних принципів розрахунку ризиків операцій і підпроцесів обслуговування обладнання.

Результати дослідження

Підвищення вимог до надійності і безпеки залізничних перевезень зумовило застосування нових методів системного аналізу технічного стану об'єктів системи тягового електропостачання. Як один із таких методів можна запропонувати аналіз видів і наслідків потенційних невідповідностей процесу - (Failure Mode and Effects Analysis), далі метод FMEA а також його різновид FMESA (аналіз причин, наслідків і критичності порушення процесу), що розширює можливості методу за рахунок ранжирування тяжкості наслідків порушення процесу (відмов) і відповідно встановити пріоритетність застережливих дій. У світі накопичений майже 25-річний досвід розробки і успішного застосування FMEA - методики. Так, в США було здійснено перше формалізоване нововведення FMEA (програма Apollo). Головним завданням FMEA/FMESA для системи ТО і Р ТП, є менеджмент якості процесів системи й безперервне вдосконалення при забезпеченні виявлення потенційних невідповідностей (дефектів) та запобігання їх появі на всіх стадіях життєвого циклу електрообладнання ТП. Нині не менше 80 % розробок технічних виробів і технологій здійснюється із застосуванням аналізу видів і наслідків потенційних невідповідностей (FMEA - методики) [5-8].

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 обладнання або його комплектуючих а також в процесі експлуатації.

Метою цього аналізу є виявлення і оцінка потенційних дефектів (відмов) обладнання або процесу, визначення дій, які можуть усунути або зменшити вірогідність виникнення потенційних відмов та документування усіх цих заходів для досягнення надійної, ефективної експлуатації обладнання.

На етапі доопрацювання, наприклад, технологічного процесу системи ТО і Р ТП або при його поліпшенні запропонованим методом необхідно вирішити такі завдання:

- виявлення критичних місць технологічних процесів системи ТО і Р ТП і застосування заходів щодо їх усунення при плануванні виробничих процесів дистанції електропостачання;
- ухвалення рішень про придатність запропонованих і альтернативних процесів ТО і Р при розробці технологічних процесів системи обслуговування;
- створення ранжируваного списку видів і причин невідповідностей системи ТО і Р для планування запобіжних та коригуючи дій;
- визначення дій для коригування системи ТО і Р, які спроможні були б знизити вірогідність виникнення критичних процесів (невідповідностей);
- доопрацювання технологічного процесу до найбільш прийнятної з різних точок зору, а саме: надійності, безпеки для персоналу, виявлення потенційно дефектних технологічних операцій і т. д.;
- документування даних за результатами аналізу для накопичення в базі знань.

Для визначення області оперативного втручання в процес ТО і Р силового електрообладнання ТП прийємо методику аналізу процесу обслуговування на рівні основних підпроцесів [1], а це: планування робіт по технічному обслуговуванню, профілактична перевірка (огляд), поточний ремонт, міжремонтні випробування, капітальний ремонт устаткування, фінансування робіт по технічному обслуговуванню.

Електропостачання та електроустаткування

Згідно із запропонованою методикою, для кожного елемента операції вибраного рівня ризику необхідно скласти перелік потенційних порушень, після чого вивчити вплив кожного порушення на функціонування підпроцесу і процесу ТО і Р в цілому, а також технічного стану електрообладнання ТП.

Для встановлення критичних операцій процесу ТО і Р проведено аналіз можливих небезпек, причин порушення та потенційних наслідків порушень при організації технічного обслуговування силового електроустаткування ТП ЭЧ- 2. Результати аналізу (*фрагмент*) [2, 9, 10] підпроцесу поточного ремонту трансформатора ТДТН- 25000/150-70 У1 ТП постійного струму наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Підпроцес поточного ремонту трансформатора ТДТН- 25000/150-70 У1

№ п/п	Назва операції підпроцесу	Критичне порушення	Потенційна причина	Потенційні наслідки
1	Підготовчі роботи і допуск до роботи	Порушення термінів подачі інформації	Людський чинник	Зрив термінів ПР
		Погана підготовка інструменту	Людський чинник	Збільшення часу ПР, низька якість робіт
		Низька якість ремонтних матеріалів (чи відсутність)	Відсутність аналізу і контролю поточних запасів	Скорочення терміну служби устаткування (Зрив термінів ремонту)
		Неякісний облік робіт	Людський чинник	Неякісне планування термінів ПР
2	Зовнішній огляд трансформатора	Не підтягнуті болтові кріплення заземлення	Не виконання технологічної карти	Погіршення контактного з'єднання
3	Перевірка опору обмоток ізоляції	Низька якість перевірки	Відсутність сучасної апаратури виміру	Зменшення терміну експлуатації
4	Аналіз масла з бака трансформатора	Незадовільна якість аналізу	Відсутність сучасної апаратури діагностування	Зменшення терміну експлуатації, відмова трансформатора
5	Перевірка газового захисту	Незадовільна якість перевірки	Погано навчений виконавець робіт	Відсутність сигналізації (вірогідність не відключення трансформатора)
N	Тощо

Сутність методики полягає в ідентифікації усіх потенційно можливих помилок або відмов системи (процесу або устаткування)[8, 11, 12].

Для будь-якого потенційного порушення процесу ТО і Р, дефекту або відмови роботи устаткування згідно з методикою FMEA визначаються три показники за трьома критеріями (шкала від 1 до 10):

- *коефіцієнт тяжкості порушення* K_S , враховує значення наслідків цього порушення *i* -ої операції ТО і Р (тяжкість наслідків прояву причин порушення (відмов)). Ймовірність P_S того, що вийде з ладу обладнання ТП (малоймовірно, дорівнює 1; майже напевно, дорівнює 10);

- *коефіцієнт частоти порушення операції* K_O , оцінка частоти (вірогідність P_O відмови) порушення *i* -ої операції ТО і Р. Небезпека порушення (вплив незначний, дорівнює 1; надзвичайний вплив, дорівнює 10);

- *коефіцієнт* K_D , *враховує вірогідність*, оцінка вірогідності не виявлення порушення *i* -ої операції ТЕ і Р до прояву його наслідків (на ранніх стадіях). Можливість виявлення порушення (виявлення ймовірне, дорівнює 1; виявлення малоймовірно, дорівнює 10).

Для перших двох критеріїв ця шкала зростає, тобто чим вище значущість або частота появи порушення, тим вище відповідні оцінки. Для третього критерію шкала убуває - 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), яке обчислюється як множення розглянутих вище коефіцієнтів:

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

Критичність *i* - ої операції підраховується на основі критичності *i* -го порушення операції з урахуванням її значущості (ваги) :

$$RPN_j = \sum_{i=1}^m RPN_i \cdot K_i, \quad (2)$$

де RPN_j - критичність i - ої операції, K_i - ваговий коефіцієнт значущості порушень i - ої операції. Ваговий коефіцієнт визначається експертним шляхом, причому $\sum K_i = 1$.

Критичність q -го підпроцесу розраховується на основі критичності операції з обліком з урахуванням її значущості:

$$RPN_q = \sum_{j=1}^n RPN_j \cdot K_j, \quad (3)$$

де K_j - ваговий коефіцієнт значущості порушень j - ої операції, причому $\sum K_j = 1$.

Величина RPN може мати значення від 1 до 1000 та бути оцінкою рівня ризику цієї відмови. Одне з основних завдань проведення FMEA - виявлення відмов з максимальними RPN та їх послідовне зниження. Заздалегідь встановлене максимально прийнятне значення RPN відносно цієї потенційної відмови (як правило, не вище 100-125) є критичним значенням RPN .

Розглянемо приклад практичного застосування запропонованої методики для аналізу ризиків операцій процесу ТО і Р тягових підстанцій, з метою запобігання критичним ситуаціям і підвищення надійності тягового електропостачання.

На першому етапі, використовуючи результати аналізу підпроцесу поточного ремонту трансформатора ТДТН- 25000/150-70 У1 ТП постійного струму (табл. 1) визначається коефіцієнт, що враховує тяжкість відмов - S .

На другому етапі проведення аналізу визначаються потенційні причини для кожної з можливих невідповідностей (табл. 1). Для зручності і повноти виявлення причин доцільне застосування діаграми Ісикави, дерева відмов, структурних, функціональних моделей і т. д.

Для кожної потенційної причини визначимо коефіцієнт, що враховує вірогідність виникнення дефекту - O . При цьому проводиться експертна оцінка частоти появи цієї причини - коефіцієнт частоти порушення операції K_o . Коефіцієнт змінюється від 1 (дуже рідкісні дефекти) до 10 (постійно виникаючі дефекти).

На третьому етапі для кожного дефекту і кожної окремої причини його появи визначимо коефіцієнт, для кожної операції підпроцесу поточного ремонту трансформатора, що враховує ймовірність виявлення відмови до появи його наслідків або ймовірність пропуску відмови - D . Кількісна оцінка коефіцієнта D визнається за шкалою оцінки вірогідності виявлення.

На четвертому етапі, використовуючи результати аналізу підпроцесу поточного ремонту трансформатора ТДТН- 25000/150-70 У1 ТП, розрахуємо критичності порушення операцій ТО і Р. Розрахунок проведемо за формулою (1). Отримані результати розрахунку критичності порушення операцій ТО і Р підпроцесу поточного ремонту трансформатора за даними (табл. 1), запишемо в табл. 2.

Таблиця 2

**Результати розрахунку критичності порушення операцій ТО і Р,
для підпроцесу поточного ремонту трансформатора ТДТН- 25000/150-70 У1**

Номер операції	Коефіцієнт K_s	Коефіцієнт K_o	Коефіцієнт K_D	Критичність порушення операції $K_R(RPN)$
1	6	6	3	108
2	7	3	3	63
3	8	7	8	448
4	7	8	5	280
5	9	7	3	189

На наступному етапі було проведено ранжирування критичних порушень і відмов, для яких критичність операції $K_R(RPN)$ перевищує межу (100-125) і для яких розроблені дії для коригування та зниження коефіцієнтів ризику. З цією метою були розроблені організаційні і технічні рішення, які спрямовані на запобігання можливим відмовам, мінімізації ймовірності появи виявлених потенційних відмов, шляхом вдосконалення систем технічного обслуговування і ремонту, правил експлуатації, методів діагностики і контролю якості та введенню спеціальних заходів попередження, виявлення та усунення дефектів та ін.

Результати розрахунку критичності порушення операцій ТО і Р підпроцесу поточного ремонту трансформатора ТДТН- 25000/150-70 У1 після прийнятих заходів вдосконалення системи ТО і Р та повторного аналізу можливих причин порушення і потенційних наслідків порушень, наведені в табл. 3.

Результати розрахунку критичності порушення операцій ТО і Р для підпроцесу поточного ремонту трансформатора ТДТН- 25000/150-70 У1 (після усунення (зменшення) потенційних причин порушення)

Номер операції	Коефіцієнт K_s	Коефіцієнт K_o	Коефіцієнт K_D	Критичність порушення операції $K_R(RPN)$
1	4	4	3	48
2	5	2	3	30
3	8	5	7	280
4	7	6	5	210
5	7	5	3	105

За розрахованими даними критичності порушення операції RPN для підпроцесу поточного ремонту трансформатора до усунення потенційних причин порушення (табл. 2) і після усунення (табл. 3), побудуємо графік критичності операцій підпроцесу поточного ремонту трансформатора (рис. 1), де: $RPN1$ - критичність порушення операцій (1, 2, 3, 4, 5) підпроцесу поточного ремонту трансформатора за результатами первинного аналізу; $RPN2$ – те саме, тільки після усунення потенційних причин порушення операцій за рахунок вдосконалення системи технічного обслуговування.

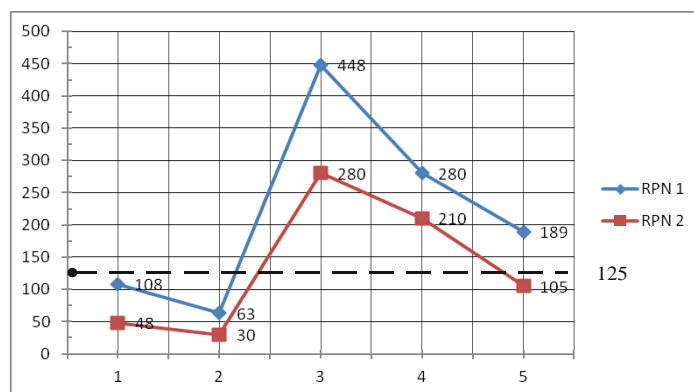


Рис. 1. Графік критичності операцій підпроцесу поточного ремонту трансформатора ТДТН- 25000/150-70 У1

Як бачимо, найбільш критичними операціями в підпроцесі поточного ремонту трансформатора є: операції 3 ($RPN= 448 > 125$), 4 ($RPN= 280 > 125$) і 5 ($RPN= 189 > 125$) до вдосконалення системи і операції 3 ($RPN= 280 > 125$), 4 ($RPN= 210 > 125$) після вдосконалення системи технічного обслуговування.

Використовуючи результати аналізу можливих небезпек [4, 9], причин порушення і потенційних наслідків порушень при організації технічного обслуговування силового електрообладнання ТП ЕЧ- 2, а також вирази (1), (2), (3) проведемо розрахунок критичності підпроцесів: 1 - планування робіт по технічному обслуговуванню, 2 - профілактична перевірка (огляд), 3 - поточний ремонт, 4 - міжремонтні випробування, 5 - капітальний ремонт електрообладнання, 6 - фінансування робіт по технічному обслуговуванню. За розрахунковими даними критичності підпроцесів 1, 2, 3, 4, 5, 6 систем ТО і Р силового електрообладнання ТП побудуємо порівняльний графік критичності відносно встановленого експертами критичного значення $RPN=125$ (рис. 2).

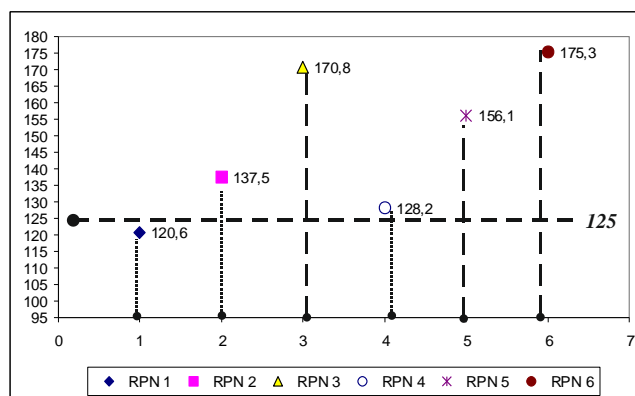


Рис. 2. Графік критичності підпроцесів ТО і Р силового електрообладнання ТП

Як видно з графіка (рис. 2), найбільш критичними підпроцесами є: 6 - фінансування робіт по технічному обслуговуванню ($RPN_6 = 175,3 > 125$); 3 - поточний ремонт ($RPN_3 = 170,8 > 125$); 5 - капітальний ремонт електрообладнання ($RPN_5 = 156,1 > 125$). Для вирішення цієї проблеми необхідно продовжувати роботу з розробки заходів з метою поліпшення якості і безперервного вдосконалення системи ТО і Р силового електрообладнання ТП. Дані про проведені заходи мають бути зафіксовані в плані реалізації з прив'язкою за часом з урахуванням тривалості їх реалізації й очікуваної вартості.

Підпроцеси: 1 - планування робіт по технічному обслуговуванню ($RPN_1 = 120,6$), 2 - профілактична перевірка ($RPN_2 = 137,5$) і 4 - міжремонтні випробування ($RPN_4 = 128,2$) знаходяться на межі критичності. Ці підпроцеси вимагають своєчасного втручання, що носить коригуючий характер організації і проведення технічного обслуговування устаткування.

Висновок

До основних завдань безперервного вдосконалення процесу технічного обслуговування і ремонту електрообладнання тягових підстанцій відносяться виявлення і попередження функціонально слабких і критичних відносно надійності і безвідмовності електрообладнання місць та створення нормативної технічної документації стосовно забезпечення ефективності обслуговування. Поліпшення ефективності ТО і Р вважається досягнутим, якщо нове пріоритетне число ризику RPN після удосконалення системи має менше значення ніж раніше.

Розроблена модель 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 електрообладнання при експлуатації впродовж життєвого циклу. За цією методикою проведений розрахунок критичності порушення операцій підпроцесу поточного ремонту силового трансформатора, а також критичності підпроцесів технічного обслуговування силового електрообладнання тягових підстанцій.

Список літератури

1. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць. Державна адміністрація залізничного транспорту України Укрзалізниця, 2013. 27с.
2. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2013 році. Київ: Видавництво ТОВ «Девалта». 2014. 251 с.
3. ISO/ IEC 31010:2009, Risk Management - Risk Assessment Techniques. Available at: <https://www.google.com.ua/search>.
4. Матусевич, О.О. Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій. Дніпропетровськ: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2015. 295 с.
5. North American Aviation, Space and Information System Division, SID-62-203-R-1, Apollo reliability Program Plan, 15 May 1963. Available at: <https://www.google.com.ua/search?q=+North+American+Aviation>.
6. McDermott, Robin E.; Mikulak, Raymond J.; Beauregard Michael R. The Basics of FMEA. – Productivity Press, 1996. — 80 p. — ISBN 9780527763206.
7. National Aeronautics and Space Administration, NASA/SP-2000-6110, Failure Modes and Effects Analysis (FMEA). A Bibliography, July 2000. Available at: <https://www.google.com.ua/search+Aeronautics+and+Space+Administration>.
8. Розно, М.И. Как научиться смотреть вперед? Внедрение FMEA-методологии. Методы менеджмента качества, 2000, № 6, с.25-28. Available at: <https://www.google.com.ua/search%BE%2C+%D0%9C.%D0%98>.
9. Матусевич, О.О. & Міронов, Д.В. Дослідження експлуатації силового обладнання системи тягового електропостачання залізниць. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2015. № 1(55). С. 62-77.
10. Долин, А. П. & Першина, Н. Ф. & Смекалов, В. В. Опыт проведения комплексных обследований силовых трансформаторов. Электрические станции. 2000. № 6. С. 46-52.
11. Годлевский, В. Е. & Дмитриев, А. Я. & Юнак, Г. Л. Применение метода анализа видов, причин и последствий потенциальных несоответствий (FMEA) на различных этапах жизненного цикла автомобильной продукции. Самара: Перспектива. 2002. 160 с.
12. Качалов, В.А. Метод FMEA : Анализ видов потенциальных дефектов и их влияния. TQM-XXI. Проблемы, опыт, перспективы. Вып.2. Москва: ИздАТ. 1997. с.226 – 286. Received 23.11.2015; accepted in revised form 25.03.2015.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Сиченко В.Г.