

Туровська Г.І.

Національний університет водного господарства та природокористування

Богданенко О.В.

Національний університет водного господарства та природокористування

АНАЛІЗ БЕЗПЕКИ ТА НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Вивчення елементів технічної системи з позицій надійності дозволяє провести аналіз їхньої роботи та сформулювати висновки щодо ефективності системи. Запропоновано технічні й організаційні пропозиції щодо підвищення надійності елементів технічної системи на стадії їх проектування, створення і використання. Це важливо для організації технологічних процесів за швидкої зміни режимів експлуатації, вимог виробництва до надійності виробничих об'єктів. А саме зменшення надійності елементів системи неодмінно призводить до збільшення ймовірності виникнення аварійних ситуацій. Величину ризику аварій оцінено з використанням теорії надійності технічних систем та виявлення послідовності небезпечних ситуацій.

Ключові слова: ризик, небезпечна ситуація, аварія, надійність, електроінструмент, технічна система.

Постановка проблеми. Актуальним є питання визначення причин, які призводять до переходу потенційних відмовних чинників порушення надійності в можливі аварійні стани. Це досить важливо в контексті кінцевої мети розрахунку надійності технічних систем і техногенного ризику – оптимізації їх конструктивних рішень, параметрів і режимів експлуатації.

Характерною особливістю сучасних промислових виробів є швидка зміна їхньої міцності, розвиток і поширення втомних режимів, зносів. Тому в розрахунках надійності необхідно враховувати закономірності та фізичні межі таких виробів, розвиток і прояв різних видів відмов через вплив багатьох чинників і характеристик самих виробів і обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі надійності технічних систем присвячено багато публікацій як вітчизняних (Б. Гнеденко, Ю. Беляєв, Є. Сугак, А. Соловійов, Н. Бруєвич, І. Ушаков, В. Шишмарьов, П. Вавулін, А. Корчагін), так і закордонних (Р. Барлоу, Ф. Прошан, Д. Кокс, В. Сміт) вчених. Незважаючи на достатньо розкритий зміст основних задач теорії надійності технічних систем, багато аспектів даного питання все ж потребують подальшого дослідження та практичного застосування.

Постановка завдання. Сьогодні приділяється недостатньо уваги дослідженням небезпечних чинників з погляду техногенного ризику щодо праців-

ників під час технологічних процесів із використанням ручного електроінструмента (електродрилі, фрезери, пили, гайковерти, будівельні міксери тощо). На жаль, з року в рік маємо відповідну кількість нещасних випадків, зокрема, зі смертельними наслідками, під час роботи з електроінструментом.

Мета нашого дослідження полягає у вивченні елементів технічної системи з позицій надійності в процесі експлуатації, проведенні аналізу їх роботи та розробленні рекомендацій щодо підвищення надійності елементів на стадії їх проектування, створення і використання.

Для досягнення мети першочергове значення має чітке визначення й реалізація таких завдань: виконати розрахунок показників надійності – середнього напрацювання на відмову елементів електрифікованого інструмента за інтенсивностями відмов, ймовірності безвідмовної роботи, ймовірності відмови елементів у період нормальної експлуатації; отримати сценарії виникнення аварій («дерева відмов») для небезпечної ситуації (ураження струмом під час роботи працівника з електроінструментом).

Завдання зумовили вибір таких методів дослідження: метод системного аналізу безпеки – «дерева відмов», метод структурних схем надійності. Ймовірність безвідмовної роботи електроінструмента визначалася методом перебору.

Виклад основного матеріалу дослідження. Актуальність в управлінні й оптимальність в органі-

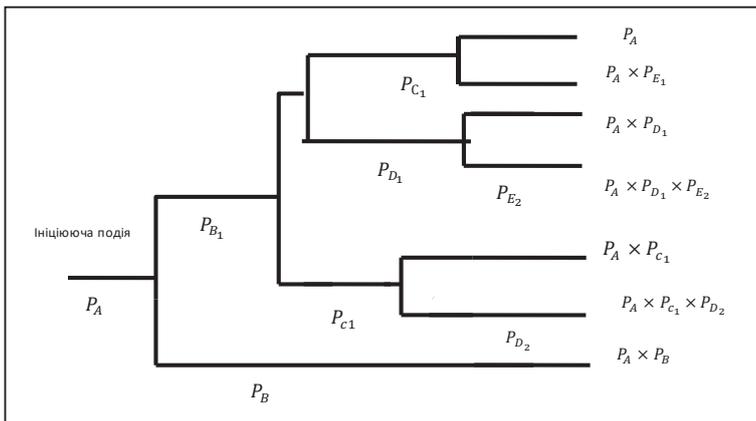


Рис. 1. «Дерево подій» ураження електричним струмом при використанні ручного електроінструмента

зації технологічних процесів, недопущення ризику аварій під час експлуатації обладнання в умовах виробничих підприємств неможливі без прогнозування вірогідного стану, наприклад, безвідмовної роботи виробничого устаткування, промислових виробів, механізмів, інструментів і статистичної оцінки надійності технічних систем. Необхідність таких розрахунків зумовлена швидкою зміною режимів експлуатації, вимогами виробництва до надійності виробничих об'єктів.

Враховавши нормативні пункти правил безпеки роботи з електроінструментом [1; 5; 6] та основні причини, які призводять до переходу потенційних чинників травмування (небезпечна ситуація) у травмуючі реальні, і, як наслідок, – до нещасних випадків, проведемо оцінку ризику виникнення небезпечних ситуацій, пов'язаних із використанням ручного електроінструмента.

Відповідно до [9], визначення ризику виконується поетапно:

I етап – визначення системи і попередній аналіз небезпек.

Крок 1. Визначення потенційних джерел небезпеки – системи, частини системи або елементів, які можуть становити небезпеку.

Крок 2. Виявлення небезпек.

Крок 3. Введення обмеження на аналіз: зі списку небезпек усуваються ті, прояв яких неможливий.

II етап – досліджується вплив відхилень технологічних параметрів обладнання від інструкцій при роботі з електроінструментом з погляду можливості небезпеки.

III етап – виявлення послідовності небезпечних ситуацій, дерева подій, дерева відмов.

Враховуючи рекомендації, принципову схему виникнення і розвитку аварії відповідно до Методики визначення ризиків [4], побудуємо «дерево подій»

(рис. 1), хоча й відомо, хоча й відомо, що ініціююча подія «дерева подій» є верхньою (верхньою подією) «дерева відмов». Але ми розглядаємо небезпечну ситуацію, тому формалізуємо підхід до оцінки безпеки при роботі з електроінструментом для вирішення поставленої задачі (аварія розглядається як нещасний випадок (ураження електричним струмом)).

Подія А – відмова системи захисного заземлення (відсутність зв'язку захисного нульового провідника із заземлювальним пристроєм).

Подія В – порушення ізоляції електропроводки (шнура електроінструмента).

Подія С – живлення електроінструмента (відсутність або підвищення сили струму (замикання провідників) – у вимикачі; коли є контакт (відмова або успіх) – замикання «неможливість відпустити», немає контакту (відмова кнопки) – струм не проходить і людина не підпадає під його небезпечну дію. Підсумком є визначення ймовірності безвідмовної роботи електроінструмента за таблицею істинності (повного перебору) комбінацій «відмова – успіх». Для визначення події С розглядалися моделі структурних схем надійності конструкційних виробів із послідовним і паралельним з'єднанням елементів технічної системи: модель відмови типу «короткого замикання» та відмови типу «обрив» [8].

Подія D – поява струму витоку – поява небезпечного потенціалу на корпусі електроінструмента (металевих частинах) у разі неможливості розриву з'єднання.

Подія E – ураження електричним струмом (підвищення сили струму до небезпечного для людини в разі включення людини в електричний ланцюг).

Визначаємо ймовірність події А в «дереві подій» (рис. 1).

За об'єкт вибрано функціонування електроустановки в електричній мережі із заземленою нейтраллю та зануленням.

Визначимо потенційні небезпеки:

- струмопровідні частини електроінструмента повинні мати захист із заземленням. Є випадки нехтування цим, також заземлення може не відповідати нормам, вимогам ПУЕ [5];

- технічний стан контролюється не щодня;

- невикористання установок заземлення під час їхнього включення в електромережу або накладання під час використання електроінструмента, що суворо заборонено;

- струмопровідні частини інструмента ненадійно ізольовані;

- випадковий дотик до деталей;

– опір ізоляції провідників інструмента менше 1 МОм;

– невикористання захисних засобів захисту в працівника за їх наявності на підприємстві.

Для складання структурної схеми надійності об'єкта з послідовно-паралельним з'єднанням елементів на рис. 2 представлено еквівалентну електричну схему (ланцюг) заміщення електричної мережі.

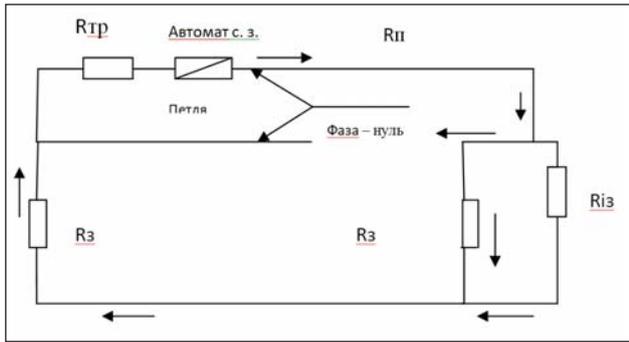


Рис. 2. Еквівалентна електрична схема (ланцюг) заміщення електричної мережі: $R_{тр}$ – опір трансформатора (0,5 Ом); $R_{лп}$ – опір проводів (0); $R_{із}$ – опір ізоляції електропроводів (відповідно ПУЕ не менше 1 МОм); $R_{з}$ – опір заземлювального пристрою (4 Ом); автомат с. з. – автомати струмового захисту

За даними елементами технічної системи складена структурна схема надійності (рис. 3).

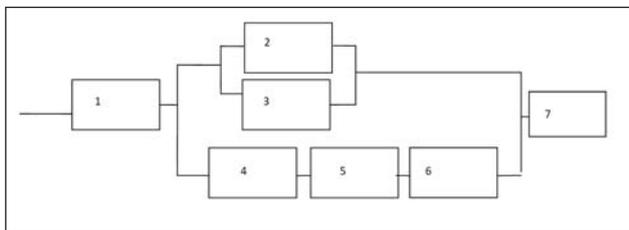


Рис. 3 Структурна схема надійності системи з послідовно-паралельним з'єднанням елементів

Спочатку обрані значення інтенсивностей відмов кожного елемента відповідно [2]. Далі за середнім наробітком на відмову і допущенням про період нормальної експлуатації ймовірність безвідмовної роботи визначаємо за формулою [8]:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

де λ – інтенсивність відмов; t – період напруження на відмову електроінструмента (приймаємо за рік $t = 8\,640$ год).

Елемент 1 – відмова заземлення трансформатора за інтенсивності відмов:

$$\lambda_1 = 0,0000015 = 15 \cdot 10^{-7} \text{ 1/год};$$

$$Q_1(8640) = P_1(8640) = 1 - e^{-15 \cdot 10^{-7} \cdot 8640} = 0,0128$$

аналогічно розраховуємо й для інших елементів технічної системи.

Елемент 2 – відмова заземлення електроінструмента:

$$\lambda_2 = 0,0001 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ 1/год};$$

$$Q_2(8640) = 0,57$$

Елемент 3 – пробій ізоляції електропроводників електроінструмента:

$$\lambda_3 = 0,0002 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ 1/год};$$

$$Q_3 = 0,82$$

Елемент 4 – відмова трансформатора (за статистикою планів спостережень за відмовами, проектною документації) – облік виникнення короткозамкнених витків у разі замикання обмоток:

$$\lambda_4 = 0,000001 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год};$$

$$Q_4 = 0,0086$$

Елемент 5 – відмова автомата струмового захисту:

$$\lambda_5 = 0,000003 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год};$$

$$Q_5 = 0,025$$

Елемент 6 – пробій кабельної лінії:

$$\lambda_6 = 0,0000002 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ 1/год};$$

$$Q_6 = 0,0017$$

Елемент 7 – відмова зануленого провідника (обрив):

$$\lambda_7 = 0,000001 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год};$$

$$Q_7 = 0,0086$$

Найслабшими елементами об'єкта, що досліджується, щодо надійності є такі: 2 – заземлення електроінструмента, 3 – ізоляція електропроводки електроустановки.

Формули для розрахунку показника надійності об'єкта:

$$Q_{06} = Q_1 \cdot Q_{2-6} \cdot Q_7. \quad (2)$$

Ймовірність відмови ділянок:

$$Q_{2-3} = 1 - (1 - Q_2)(1 - Q_3) = 1 - (1 - 0,57)(1 - 0,82) = 0,92;$$

$$Q_{4-6} = Q_4 \cdot Q_5 \cdot Q_6 = 0,0086 \cdot 0,025 \cdot 0,0017 = 3,65 \cdot 10^{-7}$$

$$Q_{2-6} = 1 - (1 - Q_{2-3})(1 - Q_{4-6}) = 1 - (1 - 0,92)(1 - 3,65 \cdot 10^{-7}) = 0,82;$$

$$Q = 0,0128 \cdot 0,82 \cdot 0,0086 = 9 \cdot 10^{-5}$$

Отже, надійність даної технічної системи становить 0,999991.

Розглянемо ймовірність ділянки 2–3 в разі підвищення надійності елемента, наприклад на 50%:

$$Q_{2-3} = 1 - (1 - P_2)(1 - P_3) = 1 - (1 - 0,285)(1 - 0,44) = 0,6;$$

$$Q = 0,0128 \cdot 0,6 \cdot 0,0086 = 6,6 \cdot 10^{-5}. P = 0,999934.$$

На основі структурної схеми складемо «дерево відмов» (рис. 4), за правилом Моргана, коли послідовне з'єднання елементів у логічній структурі «дерева» з'єднується логічним знаком «або», паралельні з'єднання – знаком «і» [7].

Щоб зменшити ризик технічної системи, а значить, підвищити надійність її роботи, розрахуємо ймовірність відмови всієї системи за формулами для послідовного і паралельного з'єднання

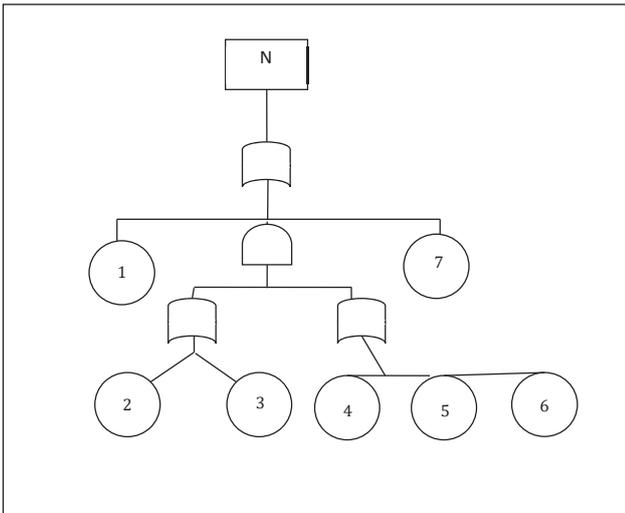


Рис. 4. «Дерево відмов» (елемент А): 1 – відмова заземлення трансформатора; 2 – відмова заземлення інструмента; 3 – пробій ізоляції електропроводки; 4 – відмова трансформатора; 5 – відмова автоматів струмового захисту; 6 – пробій кабельної лінії; 7 – відмова зануленого провідника (обрив)

елементів, попередньо виміряємо опір ізоляції проводу (за перевищення допустимого за нормами ПУЕ не менше 2 МОм).

Розрахунок ймовірності відмови системи виконуємо за новим значенням найслабшого елемента 3 (підвищення надійності шляхом зменшення ймовірність відмови в 5 разів, з 0,82 до 0,164) за формулами (3) і (4) і відповідно [7]:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_{X_i}) \text{ для «АБО»}, \quad (3)$$

$$R = \prod_{i=1}^n R_{X_i} \text{ для «І»}. \quad (4)$$

Ймовірність відмови системи, без підвищення надійності заземлення:

$$R_N = 1 - (1 - Q_1)(1 - Q_7)(1 - (1 - Q_2) Q_3 (1 - (1 - Q_4)(1 - Q_5)(1 - Q_6))) \quad (5)$$

$$R_N = 1 - (1 - 0,0128)(1 - 0,0086)(1 - (1 - 0,57 \cdot 0,82(1 - (1 - 0,0086) \times (1 - 0,025)(1 - 0,0017))) = 3,6 \cdot 10^{-4}$$

Ймовірність відмови системи з підвищенням надійності найслабшого елемента дорівнює $R_N = 3,0 \cdot 10^{-4}$. Для розглянутого прикладу зменшення надійності елементів 2 і 3 окремо або в сукупності може призвести до зниження надійності всього об'єкта. Проте велика порівняно зі слабкими елементами надійність елементів 1, 4, 5, 6 і 7 не унеможливує вихід їх із ладу.

Так, відомо, що обмотки трансформатора захищені емалевою ізоляцією, а також є головна ізоляція, яка всю обмотку загалом відокремлює від

інших частин електроустановки і захищає споживача. Але виткова ізоляція може бути легко пошкоджена, наприклад, механічно, під час намотування обмотки, під впливом нагрівання в процесі роботи. Утворюється металевий контакт двох сусідніх витків, утворюється короткозамкнений виток, в якому змінне магнітне поле електричної машини створить дуже великий струм, що призводить до плавлення ізоляції і появи на корпусі машини напруги, небезпечної для людини [3].

З огляду на дуже велику надійність пристроїв захисного відключення, ураження електричним струмом можливе тільки тоді, коли людина буде стояти на діелектрику і однією рукою візьметься за силовий кабель, а іншою – за «нейтраль». У такому разі пристрій не зможе відрізнити людину від «правильного» навантаження.

Висновки. За наведеними методиками розрахунку, відповідно до вступних даних інтенсивностей елементів технічної системи й апріорних значень імовірностей на рівні прикладу, отримані ймовірності відмов елементів, необхідних для побудови сценарію виникнення аварійної ситуації – ураження електричним струмом під час роботи з електроінструментом.

Проведені дослідження дозволяють запропонувати такі технічні й організаційні заходи щодо підвищення надійності слабких елементів технічної системи на стадії їх проектування, створення і використання:

- на стадії проектування необхідно використовувати стандартизовані й уніфіковані вузли та деталі;
- у процесі експлуатації враховувати зовнішні умови: передбачити вплив екстремальних температур – можливого нагрівання провідників, вібрації, ударного навантаження, вологості повітря;
- на пристрої заземлення необхідно мати паспорт із датами перевірок опору й обліком відхилень від норм;
- необхідно використовувати більш зносостійкі матеріали (наприклад, для провідників заземлення (опором не більше 0,1 Ом);
- використовувати пробивну машину з підвищеною напругою для випробувань електропроводки електроустановки та складанням плану обліку відмов;
- складати графіки вимірювання опору ізоляції електропроводки під час навантаження мережі і без нього, з перевіркою відповідності нормам (ПУЕ).

Автори будуть вивчати розглянуту проблему шляхом побудови реляційної моделі таблиць рішень у програмному середовищі системи управління базами даних Microsoft Office Access 2007 із використанням мови програмування SQL, запитів до баз даних для потреб автоматизації аналізу різноманітних технічних систем, що дозволить визначити виходи технічних систем і отримувати звіти варіантів комбінацій «входів – виходів» за аварійними або нормальними режимами.

Список літератури:

1. ДСТУ Б А.3.2–13:2011. Будівництво. Електробезпе́чність. Загальні вимоги. Київ, 2012. ГОСТ 12.1.013–78, MOD.
2. Белов П. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере. Москва: Издательство Академии гражданской защиты МЧС РФ, 2003. 109 с.
3. Манойлов В. Основы электробезопасности. Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. 480 с.
4. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної безпеки. Затверджено наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 4 грудня 2002 р. № 637.
5. Правила улаштування електроустановок / Міністерство Міненерговугілля України. Видання офіційне. Харків: Видавництво «Форт», 2017. 760 с.
6. Примірна інструкція з охорони праці під час виконання робіт ручним електроінструментом. ПП 2.1.00–107–2000.
7. Стариков В. Оценка безопасности систем «человек – машина – среда» логико-вероятностным методом. Тюмень: ТюмГНГУ, 2002. Ч. 1. 29 с.
8. Сугак Е. Надежность технических систем и техногенный риск. Надежность технических систем / А. Кучкин, Е. Бельская, 2013. Ч. 2. 413 с.
9. Хенли Э.Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. Москва: Машиностроение, 1984. 528 с.

АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Изучение элементов технической системы с позиций надежности позволяет провести анализ их работы и сформировать выводы об эффективности системы. Предложено технические и организационные меры по повышению надежности элементов технической системы на стадии их проектирования, создания и использования. Это ценно для организации технологических процессов при быстрой смене режимов эксплуатации, требований производства к надежности производственных объектов. Ведь уменьшение надежности элементов системы непременно ведет к увеличению вероятности возникновения аварийных ситуаций. Величина риска аварий оценена с использованием теории надежности технических систем и выявления последовательности опасных ситуаций.

Ключевые слова: *риск, опасная ситуация, авария, надежность, электроинструмент, техническая система.*

SAFETY AND RELIABILITY ANALYSIS OF THE ELEMENTS OF A TECHNICAL SYSTEM

The study of the technical system elements from the stand point of reliability allows to analyze their work and form conclusions about the system efficiency. The proposed technical and organization al proposals for improving the reliability of the technical system elements at the stage of their design, creation and use. This is valuable for the organization of technological processes with the rapid change operating modes, production requirements to the production facilities reliability. Because reducing the reliability of system elements necessarily leads to an increase in the likelihood of emergencies. The magnitude of the accident risk is estimated using the reliability theory of technical systems and the detection of a hazardous situation sequence.

Key words: *risk, dangerous situation, accident, reliability, power tool, technical system.*