

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

МІРОНОВ ДМИТРО ВІКТОРОВИЧ

УДК 621.331:621.311

## ДИСЕРТАЦІЯ

### **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Спеціальність: 05.22.09 – електротранспорт  
галузь знань: 27 – транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Науковий керівник Сиченко Віктор Григорович, доктор технічних наук,  
професор

Дніпро – 2018

## АНОТАЦІЯ

Міронов Д.В. Підвищення ефективності експлуатації обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць постійного струму. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт (27 – транспорт). – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2018.

Дисертація присвячена проблемі підвищення ефективності експлуатації обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць постійного струму. У роботі проаналізовано технічний стан пристроїв електропостачання електрифікованих залізниць. Виявлені основні причини відмов електроустаткування. Проведено аналіз сучасного стану системи технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) обладнання тягових підстанцій (ТП). Аналіз показує, що існуюча система стала неадекватною економічним умовам функціонування системи тягового електропостачання та експлуатації силового обладнання ТП електрифікованих залізниць і увійшла до протиріччя з ринковими механізмами виробничо-господарської діяльності об'єктів господарства електропостачання Укрзалізниці. На сучасному етапі розвитку залізниць України удосконалення системи ТО і Р електроустаткування ТП стає однією з основних задач підвищення надійності тягового електропостачання та вирішення проблеми скорочення витрат на експлуатацію.

У роботі виконано структурно-функціональний аналіз процесу експлуатації електрообладнання і розроблена структурно-функціональна модель процесу. Встановлено, що найбільшу увагу необхідно приділити підпроцесу непланових аварійних ремонтів електрообладнання ТП, так як він вимагає додаткових фінансових і матеріальних затрат.

Для уніфікації інформації, отриманої в результаті виконання ремонтно-профілактичних робіт розроблено узагальнений показник технічного стану електроустаткування. В результаті проведеного дослідження визначено, що модель зміни узагальненого показника технічного стану має вигляд нелінійного поліному другого порядку. Доведено, що використання математичних методів теорії планування експерименту дозволяє побудувати математичну модель зміни узагальненого показника технічного стану з досить високою точністю отримання вихідного результату (значення середньоквадратичного відхилення для різних типів силового обладнання тягових підстанцій коливається в межах від 0,002254 до 0,002978).

Запропоновано підхід до пріоритетного планування ремонтно-профілактичних робіт на основі оцінки фактичного залишкового ресурсу електрообладнання з використанням узагальнених показників технічного стану, що дозволяє обґрунтовано встановити черговість проведення ремонтно-профілактичних робіт для парку однотипного обладнання.

На основі методики оцінки фактичного залишкового ресурсу електрообладнання розроблена автоматизована система для безперервного моніторингу та розрахунку фактичного залишкового ресурсу, що дозволяє

оперативно реагувати на зміну технічного стану контрольованого обладнання і виділяти найбільш критичні одиниці технічного устаткування.

Розроблено програмний комплекс моніторингу технічного стану електричного обладнання тягових підстанцій, який дає змогу оперативно оцінювати результати діагностичних вимірів та гнучко планувати графік ремонтних робіт, зменшуючи при цьому час на аналіз результатів діагностування та постановку діагнозу до 700 год на рік в межах однієї дистанції електропостачання та підвищуючи точність постановки діагнозу за рахунок усунення людського фактору та автоматизації процесу.

Встановлено, що використання автоматизованої системи моніторингу технічного стану електрообладнання в процесі технічного обслуговування електрообладнання дистанції електропостачання дозволяє зменшити фінансові витрати на 47878 грн/рік в межах однієї дистанції електропостачання. Визначено, що строк окупності автоматизованого комплексу при його впровадженні лише для одного типу обладнання для дистанції електропостачання в цілому складає 6,3 роки при відсутності персональних комп'ютерів та 4,35 роки при їх наявності. При впровадженні комплексу для всіх типів електрообладнання ТП витрати на проведення ремонтно-профілактичних робіт та строк окупності можна значно скоротити.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що запропонована методика розрахунку часткових і узагальнених показників технічного стану дозволяє підвищити швидкодію та зручність обробки діагностичної інформації та скоротити час на проведення ремонтно-профілактичних робіт на 700 год на рік в межах однієї дистанції електропостачання. Розроблена автоматизована система оцінки технічного стану електрообладнання ТП на основі узагальнених показників технічного стану сприяє зменшенню фінансових витрат на 47878 грн/рік в межах однієї дистанції електропостачання. Створений програмний засіб дозволяє проводити оцінку і моніторинг та прогнозування технічного стану обладнання ТП. При цьому даний програмний дозволяє створити базу даних діагностичних параметрів для подальшого аналізу пошкоджуваності електрообладнання.

Основні результати дослідження були використані в фундаментальній науково-дослідній роботі «Розробка енергоефективної технології сумісної роботи системи централізованого тягового електропостачання та системи розподілених альтернативних джерел електроенергії» (№ держреєстрації 0117U004481) та держбюджетній науково-дослідній роботі «Розробка системи технічного обслуговування та діагностики пристроїв тягових підстанцій постійного струму» (№ держреєстрації 0113U000686).

Розроблені методики та практичні підходи для підвищення ефективності експлуатації обладнання тягових підстанцій прийнято до використання службою електропостачання регіональної філії «Львівська залізниця». Результати роботи у вигляді методики розрахунку часткових і узагальнених показників технічного стану електрообладнання впроваджені в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та використовуються при підготовці

бакалаврів і магістрів зі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**Ключові слова:** електропостачання, тягові підстанції, технічне обслуговування, ремонт електрообладнання, нечіткі множини, процесний підхід, автоматизована система діагностування.

## ABSTRACT

*Mironov D.V.* Increasing the efficiency of maintenance and repair of traction substations equipment of electrified DC railways. The qualification scientific work on the manuscript.

The dissertation in support for a Candidate of Technical Science degree, specialty 05.22.09 electric transport (27 transport). Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnipro, 2018

The dissertation is devoted to the problem of increasing the efficiency of technical maintenance and repair of equipment of traction substations of electrified DC railways. The work analyzes the technical state of electrical power devices of electrified railways. The basic reasons of electric equipment failures are revealed. The analysis of the current state of the system of maintenance and repair of traction substation equipment is carried out. The analysis shows that the existing system became inadequate to the economic conditions of the functioning of the traction power supply system and the operation of the power equipment of the TR of the electrified railways and contradicted the market mechanisms of the production and economic activity of the objects of the power supply Ukrzaliznytsia. At the present stage of the development of the railways of Ukraine, the improvement of the system of maintenance and repair of electric equipment TR becomes one of the main tasks of increasing the reliability of traction power supply and solving the problem of reducing the costs of maintenance and repair.

In the work the structural and functional analysis of the process of maintenance and repair of electrical equipment was performed and the structural-functional model of the process was developed. It was established that the most attention should be paid to the subprocess of unplanned emergency repairs of electrical equipment TP, as it requires additional financial and material costs.

For the unification of the information received as a result of repair and preventive works, a generalized index of the technical condition of the electrical equipment has been developed. As a result of the research, it was determined that the model of the change of the generalized state of the technical state has the form of the second order nonlinear polynomial. It is proved that the use of mathematical methods of the theory of experiment planning allows us to construct a mathematical model of the change of the generalized index of a technical state with a fairly high accuracy of obtaining the initial result (for the various types of power equipment of traction substations the value of the index varies from 0.002254 to 0.002978).

The approach to priority planning of repair-and-prophylactic works on the basis of estimation of the actual residual resource of electrical equipment with the use of generalized indicators of the technical condition is proposed, which allows to

justify the establishment of the order of carrying out repair and maintenance works for the park of the same type of equipment.

On the basis of the method of estimating the actual residual life of electrical equipment, an automated system for continuous monitoring and calculation of the actual residual resource has been developed, which allows to react promptly to change the technical state of the controlled equipment and to allocate the most critical units of the technical equipment.

The software complex for monitoring the technical condition of the electric equipment of the traction substation has been developed, which enables to quickly evaluate the results of diagnostic measurements and to flexibly plan the repair work schedule while reducing the time for the analysis of the diagnostic results and the diagnosis of up to 700 years a year within the same distance of the power supply and increasing the accuracy. Making a diagnosis by eliminating the human factor and automating the process.

It was established that the use of the automated system for monitoring the technical condition of electrical equipment in the process of servicing electrical equipment in the electricity supply distances allows reducing financial expenses by 47878 UAH / year within a single electricity supply distance. It is determined that the payback period of the automated complex when it is implemented for only one type of equipment for the power supply distances in general is 6.3 years in the absence of personal computers and 4.35 years at their availability. At implementation of the complex for all types of electrical equipment TP costs for repairs and maintenance and payback period can be significantly reduced.

The practical value of the results obtained is that the proposed method of calculating partial and generalized indicators of the technical state allows to increase the speed and convenience of processing of diagnostic information up to 700 hours per year within the limits of one distant supply. An automated system for evaluating the technical state of electrical equipment on the basis of general indicators of technical condition has been developed, which reduces financial expenses by 47878 UAH / year within a single electricity supply distance. The created software tool allows to evaluate and monitor and forecast the technical state of equipment TP. At the same time, this software allows you to create a database of diagnostic parameters for further analysis of damage to electrical equipment.

The main results of the research were used in the fundamental research work "Development of energy-efficient technology for the interoperability of the system of centralized traction power supply and distributed alternative sources of electricity" (state registration number 0117U004481) and the state budget research project "Development of a system of maintenance and diagnostics of devices of traction substations of a permanent current "(No registration number 0113U000686).

The developed methods and practical approaches for increasing the efficiency of electrical equipment maintenance are accepted for use by the power supply service of the regional branch "Lvivska zaliznitsa". The results of work in the form of method of calculation of partial and generalized indicators of technical condition are implemented in the educational process of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after V. Lazaryan and used in the preparation of bachelors

and masters in the specialty "Power engineering, electrical engineering and electromechanics"

**Keywords:** power supply, traction substations, maintenance, electrical equipment repair, fuzzy sets, process approach, automated diagnostic system.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Основні положення і результати дисертації опубліковані*

#### **у виданнях, що індексуються Scopus:**

1. V. Sychenko, D. Mironov, "Development of a mathematical model of the generalized diagnostic indicator on the basis of full factorial experiment", *Archives of Transport*, vol. 43, no. 3. pp. 125-133, 2017.

#### **у фахових виданнях:**

2. О. Матусевич, Д. Міронов, "Дослідження експлуатації силового обладнання системи тягового електропостачання залізниць", *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*, № 6(54), с. 78-86, 2015.

3. О. Матусевич, Д. Міронов, "Математична модель ризик – аналізу технічного стану силового обладнання тягових підстанцій", *Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб.*, № 93, с. 48-50, 2014.

4. О. Матусевич, Д. Міронов, "Методика проведення ризик-аналізу технічного стану обладнання тягових мереж", *Електрифікація транспорту*, № 9, с. 115-123, 2015.

5. Д. Міронов, В. Сиченко, О. Матусевич, "Автоматизована система моніторингу та прогнозування фактичного залишкового ресурсу обладнання тягових підстанцій", *Електротехніка і електромеханіка*, №4, с. 51-63, 2016.

6. V. Sychenko, D. Mironov, A. Białoń, "Structural – functional model of maintenance and repair of the traction substations equipment", *Technika transportu szynowego*, №11, с. 49-52, 2017.

7. В. Сиченко, Д. Міронов "Оцінка ефективності автоматизованої системи моніторингу технічного стану обладнання тягових підстанцій", *Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"*, вып. 27 (1249), с.440-444., 2017.

8. Д. Міронов, "Удосконалення технічного обслуговування обладнання тягових мереж на основі процесного підходу", *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*, № 6(54), с. 78-86, 2014.

9. Д. Міронов, "Удосконалення системи ТО і Р обладнання тягових підстанцій з використанням узагальнених критеріїв", *ЕНЕРГЕТИКА: економіка, технології, екологія*, № 3 (41), с.107-116, 2015.

#### **Додаткові праці**

#### **тези доповідей та матеріали міжнародних науково-практичних конференцій:**

10. Д. Міронов, "Удосконалення технічного обслуговування обладнання тягових мереж на основі процесного підходу", на *74 Міжнар. науково-практ. конф. Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту*,

Дніпропетровськ, 2014, с. 160-161.

11. Д. Міронов, “Вдосконалення процесу технічного обслуговування обладнання тягових мереж шляхом впровадження системи управління ризиками”, на *V міжнар. науково-практ. конф. Енергозбереження на залізничному транспорті та у промисловості*, Дніпропетровськ, 2014, с.110-111.

12. В. Сиченко, Д. Міронов, “Оцінка технічного стану обладнання тягових підстанцій з використанням багатофакторного аналізу експлуатаційних показників”, на *VII Міжнарод. науково-практ. конф. Електрифікація транспорту "ТРАНСЕЛЕКТРО-2014"*, Дніпропетровськ, 2014, с. 57-58.

13. Д. Міронов, В. Скалько, “Вдосконалення системи ТО і Р обладнання тягових мереж шляхом використання системи управління ризиками”, на *міжнар. науково-практ. конф. «Науково-технічний прогрес на залізничному транспорті»*, Дніпропетровськ, 2015, с. 25-26.

14. Д. Міронов, О. Лябах, “Оцінка якості технічного обслуговування обладнання тягових підстанцій з застосуванням функції бажаності Харінгтона”, на *VI міжнар. науково-практ. конф. Енергозбереження на залізничному транспорті та у промисловості*, Дніпропетровськ, 2015, с.96-97.

15. Д. Міронов, “Методика оцінки фактичного технічного стану обладнання тягових підстанцій”, на *VIII Міжнар. науково-практ. конф. Електрифікація транспорту "ТРАНСЕЛЕКТРО-2015"*, Дніпропетровськ, 2015, с. 46-47.

16. Д. Міронов, “Методика оцінки ресурсу обладнання тягових підстанцій”, на *VII Міжнар. науково-практ. конф. «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті»*, Дніпропетровськ, 2016, с. 50-51.

17. Д. Міронов, “Оцінка ресурсу обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць”, на *I-й Міжнародній науково-практичній конференції Енергооптимальні технології перевізного процесу*, Дніпропетровськ, 2016, с. 97-99.

18. Д. Міронов, Ю. Громова, “Автоматизована система моніторингу технічного стану обладнання тягових підстанцій”, на *X Міжн. наук.-практ. конф. «Електрифікація транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО – 2017»*, Дніпро, 2017, с. 35-36.

**охоронні документи:**

19. Д. В. Міронов, В. Г. Сиченко, О. О. Матусевич, “Автоматизована система моніторингу та прогнозування технічного стану обладнання тягових підстанцій”, Патент на корисну модель №114608, 2017.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	14
<b>1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ.....</b>	<b>21</b>
1.1. Аналіз пошкоджуваності основного силового обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць.....	21
1.2. Система технічного обслуговування і ремонту та діагностування обладнання тягових підстанцій.....	29
1.3. Дослідження показників ефективності експлуатації тягових підстанцій.....	35
1.3.1. Терміни та визначення показників експлуатації електрообладнання.....	36
1.3.2 Розрахунок показників ефективності експлуатації обладнання тягових підстанцій.....	39
1.4. Система технічного обслуговування і ремонту та діагностування обладнання тягових підстанцій з точки зору процесного підходу.....	44
1.5. Моніторинг і аналіз процесів у рамках створення збалансованої системи показників на підприємстві.....	46
Висновки до розділу 1.....	48
<b>2 СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСНОГО УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ.....</b>	<b>50</b>
2.1. Місце системи технічного обслуговування і ремонту у структурі господарства електрифікації.....	50
2.2. Характеристика процесу технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій.....	53
2.3. Управління процесом технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій.....	57
2.4. Структурно-функціональна модель процесу технічного обслуговування обладнання тягових підстанцій.....	61
Висновки до розділу 2.....	70
<b>РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОГО ПОКАЗНИКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ.....</b>	<b>71</b>
3.1. Аналіз методів багатофакторної оцінки об'єктів.....	72
3.1.1. Метод аналізу ієрархій Т. Сааті.....	72
3.1.2. Метод множин рівня Р. Ягера.....	78
3.1.3. Узагальнена та часткова функція бажаності Харінгтона.....	82
3.2. Побудова узагальненого показника технічного стану електрообладнання тягових підстанцій.....	86
3.3. Розробка математичної моделі узагальненого показника технічного стану на основі повного факторного експерименту.....	95
3.3.1 План повного факторного експерименту $2n$ для узагальненого показника технічного стану.....	96
3.3.2. Ортогональний центральний - композиційний план другого порядку для узагальненого показника технічного стану.....	102
3.4. Методика оцінки фактичного залишкового ресурсу енергетичного обладнання на основі узагальненого показника технічного стану.....	106

Висновки до розділу 3.....	112
<b>4 АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ.....</b>	<b>114</b>
4.1. Автоматизована система моніторингу фактичного технічного стану обладнання тягових підстанцій.....	114
4.1.1. Алгоритм оперативного моніторингу технічного стану електрообладнання.....	114
4.1.2. Структура автоматизованої системи моніторингу фактичного технічного стану обладнання тягових підстанцій.....	116
4.2. Програмний комплекс моніторингу технічного стану електричного обладнання тягових підстанцій.....	120
Висновки до розділу 4.....	132
<b>5 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ УЗАГАЛЬНЕНИХ ПОКАЗНИКІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ.....</b>	<b>133</b>
5.1. Визначення оптимального об'єму і вартості робіт з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій.....	133
5.2. Економічний ефект від впровадження автоматизованої системи моніторингу технічного стану обладнання тягових підстанцій.....	139
Висновки до розділу 5.....	146
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>147</b>
<b>БІБЛІОГРАФІЯ.....</b>	<b>150</b>
<b>ДОДАТОК А.....</b>	<b>165</b>
<b>ДОДАТОК Б.....</b>	<b>167</b>
<b>ДОДАТОК Б.....</b>	<b>169</b>

## ВСТУП

**Актуальність теми.** На сьогоднішній день ситуація в електроенергетичній інфраструктурі залізничного транспорту України досить складна: значна частина обладнання, що знаходиться в експлуатації, вже вичерпала свій ресурс і потребує заміни або поетапної реконструкції та оновлення. Крім того, необхідно підвищувати ефективність використання наявного обладнання, застосовувати нові методи діагностування технічного стану обладнання, скорочувати експлуатаційні витрати і переходити на ресурсо- та енергозберігаючі технології. Розвиток швидкісного і високошвидкісного руху та зростання його інтенсивності, застосування електрорухомого складу нового покоління, вимагають заміни застарілого обладнання та елементів низької експлуатаційної надійності на високотехнологічні пристрої підвищеної надійності і збільшеного ресурсу, впровадження нових методів діагностики технічного стану обладнання та вдосконаленні існуючої системи технічного обслуговування та ремонту пристроїв електропостачання. На залізницях України тягове електропостачання здійснюється від 307 стаціонарних і пересувних ТП. З них 243 стаціонарних (82,09% від загальної кількості) та 10 пересувних ТП працюють з терміном служби понад 30 років [1]. На даний час зношеність основних фондів енергогосподарства виробничого та невиробничого характеру сягає 80 %. Темпи наростання зношеності електроустаткування складають 2-6% на рік від загальної кількості.

Об'єкти залізничного транспорту містять велику кількість пристроїв, тривала експлуатація яких без належного діагностування технічного стану та своєчасного проведення ремонтних робіт може привести до виходу їх з ладу та значного матеріального збитку. Так, внаслідок пошкодження пристроїв електропостачання на залізницях України за 2015 рік було затримано 1006 поїздів на 765,5 годин, у 2011 році 832 поїзди на 656 годин [2]. Ефективність функціонування залізничної галузі все в більшій мірі залежить від ефективності служб, які забезпечують процес підтримки технічних засобів в працездатному стані з мінімальними ремонтними витратами.

Проблемі експлуатації та технічного обслуговування електрообладнання систем електропостачання тяги поїздів та промислових енергетичних систем присвячена велика кількість робіт як вітчизняних, так і зарубіжних вчених. Розробкою методів планування, керування та організації займалися наступні вчені: П. Д. Андрієнко, В. М. Кутін, О. М. Назаричев, Е. Ю. Барзілович, Р. Барлоу, Б. Є. Боднар, А. Г. Галкін, М. І. Капиця, А. Н. Россальський, Ф. Байхельт, В. А. Савельєв, О. О. Матусевич, П. М. Сві та ін.

Незважаючи на важливу роль ремонтних служб в забезпеченні безперебійної роботи залізничних підприємств, рівень управління, технічного забезпечення, та організації роботи даних підрозділів залишається достатньо низьким. При цьому застосування системи технічного обслуговування і ремонту ускладнюється недостатнім фінансуванням для проведення ремонтів у повному обсязі. Так, на 2015 рік було виділено на виконання ремонтів суму 124883 тис. грн, порівняно з 2014 роком (281070 тис. грн) об'єм фінансування зменшився на 156187 тис. грн (55 %). До теперішнього часу не розроблено

критерії ефективності експлуатації обладнання, присутня велика частка суб'єктивізму в оцінці. Внаслідок цього ускладнене економічно обґрунтоване планування ремонтних робіт, визначення ресурсів, необхідних для забезпечення працездатності електроустаткування, а також витрат, пов'язаних з використанням сировини, матеріалів, запасних частин Тому гостро постає питання про розробку методів та способів підвищення ефективності експлуатації електрообладнання електрифікованих залізниць.

Аналіз сучасних методів підвищення ефективності функціонування підприємств з різним характером діяльності показує, що вирішення проблеми удосконалення процесу експлуатації електрообладнання може відбуватись шляхом застосування системи управління якістю, яка передбачає використання принципів процесного підходу для підвищення якості робіт, що виконуються в процесі експлуатації. При цьому, в якості контрольованого показника процесу експлуатації обладнання доцільно використовувати узагальнені критерії якості об'єкту експлуатації, які є більш зручними для розрахунку, контролю та прогнозування за даними поточної експлуатації та технічних обстежень електроустаткування.

Таким чином, задача розробки методів і способів підвищення ефективності експлуатації електрообладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць постійного струму є актуальною. Вирішенню даної задачі і присвячені дослідження, проведені в дисертаційній роботі.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана відповідно до державних програм і науково-дослідних робіт:

- Транспортна стратегія України на період до 2020 року, ухвалена Постановою Кабінету Міністрів України № 2174-р від 20.10.2010 р.;
- Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки, ухвалена Постановою Кабінету Міністрів України № 1390 від 16.12.2009 р. (із змінами, внесеними згідно з Постанови № 970);
- Постанова Верховної Ради України «Про програму діяльності Кабінету Міністрів України» № 1099-VIII від 14.04.2016 р.;
- Стратегічний план розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року, затверджений наказом Міністерства інфраструктури України від 21.12.15 № 547;
- «Розробка системи технічного обслуговування та діагностики пристроїв тягових підстанцій постійного струму» (№ держреєстрації 0113U000686);
- «Розробка енергоефективної технології сумісної роботи системи централізованого тягового електропостачання та системи розподілених альтернативних джерел електроенергії» (№ держреєстрації 0117U004481).

Автор брав участь у виконанні вказаних науково-дослідних робіт як виконавець.

**Метою** дисертаційної роботи є підвищення ефективності експлуатації електрообладнання тягових підстанцій з використанням узагальненого показника технічного стану об'єкта.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові задачі:

1. Проаналізувати методи технічного обслуговування і ремонту електрообладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць.
2. Розробити структурно-функціональну модель процесу технічного обслуговування і ремонту електрообладнання.
3. Розробити методику розрахунку часткових і узагальнених показників технічного стану електрообладнання.
4. Отримати аналітичні вирази для розрахунку узагальненого показника технічного стану електрообладнання.
5. Розробити спеціалізоване програмне забезпечення для вирішення задач моніторингу і прогнозування технічного стану електрообладнання.
6. Розробити методику моніторингу і прогнозування технічного стану електрообладнання на основі узагальнених показників технічного стану устаткування.

**Об'єкт дослідження** – процес експлуатації електрообладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць.

**Предмет дослідження** – система технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій електричного транспорту.

**Методи дослідження.** Основні теоретичні положення дисертації отримані за допомогою методів системного аналізу (при розробці структурно-функціональної моделі процесу технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) обладнання тягових підстанцій), математичної статистики (аналіз пошкоджуваності електрообладнання), математичного моделювання (розробка методики розрахунку часткових і узагальнених критеріїв), математичні методи планування багатофакторного експерименту (розробка математичної моделі узагальненого показника технічного стану електрообладнання), методи математичного програмування (розробка програмного комплексу автоматизованої системи моніторингу і прогнозування технічного стану електрообладнання), імітаційного моделювання.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше отримано узагальнений показник технічного стану обладнання тягових підстанцій у вигляді квадратичної залежності з урахуванням різнопланових експлуатаційних параметрів електрообладнання для комплексної оцінки технічного стану обладнання, а також отримано регресійну модель узагальненого показника технічного стану, що дозволяє визначити характер впливу експлуатаційних параметрів устаткування на його фактичний технічний стан.

2. Адаптовано метод процесного управління якістю технічного обслуговування і ремонту електрообладнання тягових підстанцій шляхом введення ієрархічного розподілу управлінських завдань, що дає змогу ефективного управління на всіх етапах проведення ремонтно-профілактичних робіт з метою мінімізації часу на виконання даних робіт за рахунок виокремлення найбільш ресурсоемних етапів процесу технічного обслуговування.

3. Набув подальшого розвитку метод оцінки залишкового ресурсу електрообладнання тягових підстанцій в частині застосування узагальненого показника технічного стану електрообладнання в якості основного показника спрацювання ресурсу, на базі якого запропоновано методику розстановки ремонтних пріоритетів на основі виробітку залишкового ресурсу обладнання, що дозволяє скоротити витрати часу на аналіз експлуатаційних параметрів та постановку діагнозу.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблена структурно-функціональна модель процесу ТО і Р за стандартом ISO 9000:2015 дозволяє виявити основні ресурсоємні етапи процесу ТО і Р обладнання ТП, ефективно управління якими дозволить знизити часові і матеріальні затрати на проведення профілактичних робіт.

2. Запропонована методика розрахунку часткових і узагальнених показників технічного стану дозволяє підвищити швидкість та зручність обробки діагностичної інформації, а також зменшити час на проведення технічного обслуговування на 700 год на рік в межах однієї дистанції електропостачання.

3. Розроблена автоматизована система оцінки технічного стану електрообладнання ТП на основі узагальнених показників технічного стану сприяє зменшенню фінансових витрат на 47878 грн/рік в межах однієї дистанції електропостачання.

4. Створений програмний засіб дозволяє проводити оцінку і моніторинг та прогнозування технічного стану обладнання ТП. При цьому даний програмний засіб дозволяє створити базу даних діагностичних параметрів для подальшого аналізу пошкоджуваності електрообладнання.

**Особистий внесок здобувача.** Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження, викладені в дисертаційній роботі, отримано дисертантом самостійно. У роботах, які написані в співавторстві, автору належать: [3] – збір та аналіз статистичних даних експлуатації пристроїв електропостачання; [4] - аналіз основних бізнес-процесів системи ТО і Р обладнання тягових підстанцій для побудови системи ризик-менеджменту; [5] - статистичний аналіз відмов основного силового обладнання ТП, аналіз показників ефективності системи ризик-менеджменту; [6] – розробка методики оцінки залишкового ресурсу, методики визначення ремонтних пріоритетів обладнання, розробка алгоритму роботи та структури автоматизованого діагностичного комплексу; [7] – розробка структурно-функціональних моделей підпроцесів ТО і Р; [8] – реалізація та аналіз результатів повного факторного експерименту; [9] – розробка структури автоматизованої системи, опис функціональних блоків; [10]– розрахунок показників ефективності системи технічного обслуговування і ремонту електрообладнання.

Роботи [11] та [12] написані та опубліковані без співавторів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на 74 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»; 5,

6, 7, 8 Міжнародній науково-практичній конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та у промисловості»; 7,8,9,10 Міжнародній науково-практичній конференції «Електрифікація транспорту "ТРАНСЕЛЕКТРО"»; 7 Міжнародній науково-практичній конференції «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті»; 1 Міжнародній науково-практичній конференції «Енергооптимальні технології перевізного процесу»; Міжнародній науково-практичній конференції Advanced Rail Technologies.

**Публікації.** Основний зміст дисертації опубліковано у 19 наукових працях і матеріалах конференцій: 9 основних праць, з них: 1 – стаття у журналі, що індексуються Scopus; 8 – у фахових виданнях; і 10 додаткових, з них: 9 – тези доповідей та матеріали конференцій, 1 – патент на корисну модель.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із анотації українською і англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основний текст роботи викладений на 149 сторінках, містить 36 рисунків за текстом і 29 таблиць. Список літературних джерел із 152 найменувань займає 16 с. Додатки займають 7 сторінок. Повний обсяг дисертації складає 171 сторінку.

# 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

## 1.1. Аналіз пошкоджуваності основного силового обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць

На сьогоднішній день значна частина обладнання електроенергетичної інфраструктури залізничного транспорту України вже вичерпала свій ресурс і потребує заміни або поетапної реконструкції та оновлення. Крім того, необхідно підвищувати ефективність використання існуючого обладнання, застосовувати нові методи діагностування фактичного технічного стану обладнання, скорочувати експлуатаційні витрати і переходити на ресурсозберігаючі та енергозберігаючі технології. Надійна робота пристроїв електропостачання грає важливу роль з питань вирішення проблеми безпеки руху на залізницях України. При цьому більшості відмов електроустаткування дистанцій електропостачання передують той або інший вид накопичених ушкоджень. Наприклад, внаслідок пошкодження пристроїв електропостачання на залізницях України за 2015 рік було затримано 1006 поїздів на 765,5 годин, у 2011 році 832 поїзди на 656 годин. Це на 18,0 % більше по кількості і на 15,0 % більше за часом [2].

Основним технологічним завданням господарства електропостачання залізниць України («Е») є якісне, безперебійне забезпечення електроенергією тягових та нетягових споживачів. Для виконання цього завдання підрозділи господарства «Е» перетворюють електричну енергію на тягових підстанціях, передають електроенергію заданих параметрів через контактну мережу до електрорухомого складу для тяги поїздів, а також живлять сторонніх споживачів через райони електропостачання. Технічне забезпечення виконання основного завдання господарства Е можна розділити на групи [13]:

1. Експлуатація технічних пристроїв електропостачання, яка включає в себе:

- моніторинг та діагностику технічного стану обладнання тягових підстанцій, контактної мережі та районів електропостачання;
- технічне обслуговування і ремонт обладнання тягових підстанцій, постів секціонування, пунктів паралельного з'єднання та обладнання районів електропостачання.

2. Забезпечення процесу експлуатації силового обладнання ТП з вирішенням проблем: модернізації і оновлення обладнання; виділення коштів на експлуатаційні витрати; забезпеченні кваліфікованим персоналом; забезпеченні запасними частинами; проведенні моніторингу та якісного діагностування обладнання ТП.

На сьогоднішній день розвиток швидкісного руху та зростання його інтенсивності, застосування електрорухомого складу нового покоління вимагають заміни застарілого обладнання низької експлуатаційної надійності на високотехнологічні пристрої підвищеної надійності і збільшеного ресурсу, впровадження нових методів діагностування технічного стану обладнання ТП та вдосконалення існуючої системи технічного обслуговування і ремонту пристроїв електропостачання електрифікованих залізниць України.

Зазначені обставини вказують на необхідність розробки науково-обґрунтованого комплексу методів і засобів, спрямованих на підвищення надійності системи тягового електропостачання (СТЕ). Даний комплекс повинен базуватися на детальному аналізі виходу з ладу електрообладнання СТЕ зі застосуванням сучасних математичних моделей і методів [14]-[17].

Результати такого дослідження можна використовувати:

- при розробці заходів з підвищення надійності тягового електропостачання залізниць України;
- при розробці концепції стратегії оперативного управління СТЕ;
- для вирішення задачі безперервної та надійної роботи обладнання ТП з мінімальними витратами на ТО і Р;
- для аналізу проблем виникнення аварійних ситуацій тягового електропостачання залізниць;
- для вирішення проблеми скорочення простоїв обладнання та позапланових робіт з ТО і Р обладнання ТП.

З метою вирішення проблеми підвищення якості ТО і Р системи тягового електропостачання залізниць України проведемо дослідження надійності обладнання системи та розглянемо порушення нормальної роботи пристроїв електропостачання різного ступеня тяжкості.

Аналіз динаміки зміни даних показників за 14 років показав, що в період з 2002 по 2007 рр. спостерігається зменшення кількості відмов силового обладнання. А починаючи з 2007 р. цей показник та кількість причин, що викликають його, навпаки зростає (рис. 1.1). В першу чергу це стосується порушень на контактній мережі та тягових підстанціях.

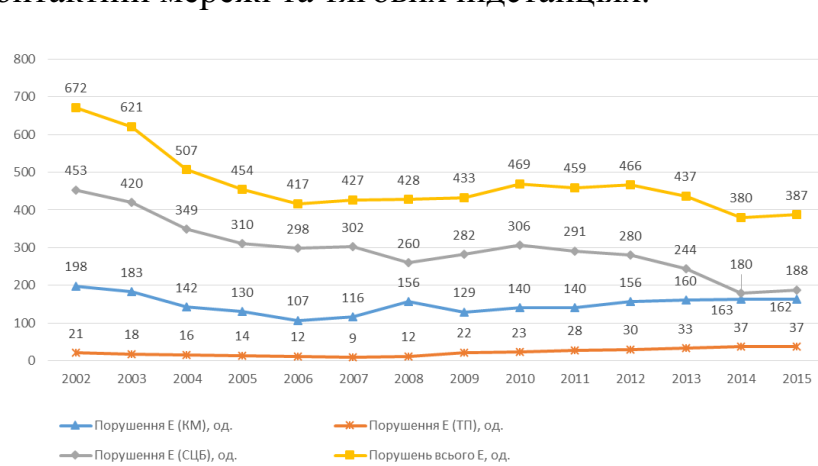


Рисунок 1.1 - Динаміка порушень нормальної роботи пристроїв електропостачання по господарству Е

З аналізу приведених графіків слідує, що починаючи з 2007 р. зростає кількість порушень в цілому як по всіх підрозділах служби Е, так і зокрема по ТП. Для ТП це зростання склало з 9 випадків в 2007 р. до 37 випадків в 2015.

По кількості затриманих поїздів в результаті порушень (відмов) силового обладнання тягових підстанцій також спостерігається динаміка зростання затримки поїздів за досліджуваний період (рис. 1.2).

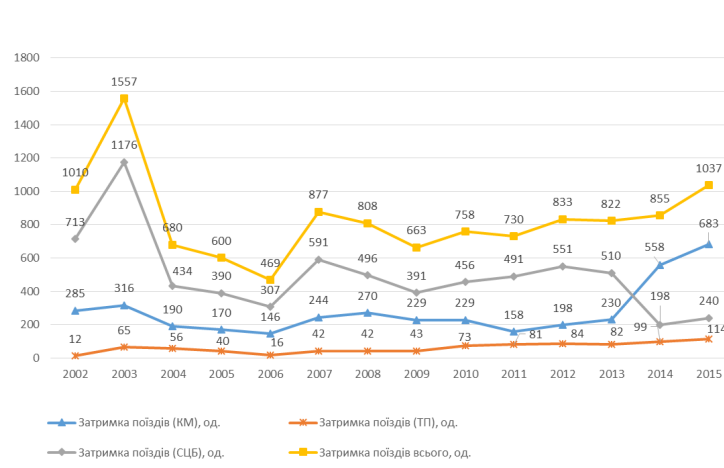


Рисунок 1.2 - Динаміка кількості затриманих поїздів в результаті відмов пристроїв електропостачання

З метою виявлення причин порушень нормальної роботи системи тягового електропостачання залізниць України проведено дослідження основних причин порушень за період з 2002 по 2015 р., результати якого наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Причини порушень нормальної роботи системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць України

Рік	Вихід з ладу основного силового обладнання ТП	перепади	механічні зруйнування, обриви	розрушення	перевантаження, пере на пруга	дефект монтаж у, виготовлення	вплив метеорологічних умов (ожеледь, вітер, температура)	вплив сторонніх предметів, тварин, птахів	невірна робота захисту	відключення енергосистемою
2015	29	1	8		11		3	4	4	34
2014	19	5	6		2	3	6		15	42
2013	19	2	1		10	2	2	1	2	44
2012	16	1	3	3	7	2	1		2	5
2011	23	2			3	2	3	1	4	26
2010	9				1	2	4	3		25
2009	25	2			3	1	1		4	25
2008	25	1			4		1	1		34
2007	8	1			4		1	1		13

Продовження табл. 1.1

2006	15		3		2		2	3		21
2005	32	1	3	1	3	1	2	6	1	2
2004	41	2	2	8		3	5	4	1	8
2003	35	1	8	2	3	3	5	1	2	5
2002	55	7	5	2	5	5	3	6	6	13

Однак, така велика кількість виявлених порушень нормальної роботи системи тягового електропостачання, які наведені у таблиці 1, ускладнює

можливість якісно виявити та надати оцінку порушень нормальної роботи системи тягового електропостачання.

Для вирішення цієї проблеми застосуємо закон Парето, принцип якого заснований на відокремленні важливих факторів від малозначущих і несуттєвих та дозволяє сфокусувати зусилля і ресурси на усунення найбільш значимих проблем [18].

Побудована діаграма Парето причин порушень нормальної роботи системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць України, які наведені у таблиці 1, представлена на рисунку 1.3.

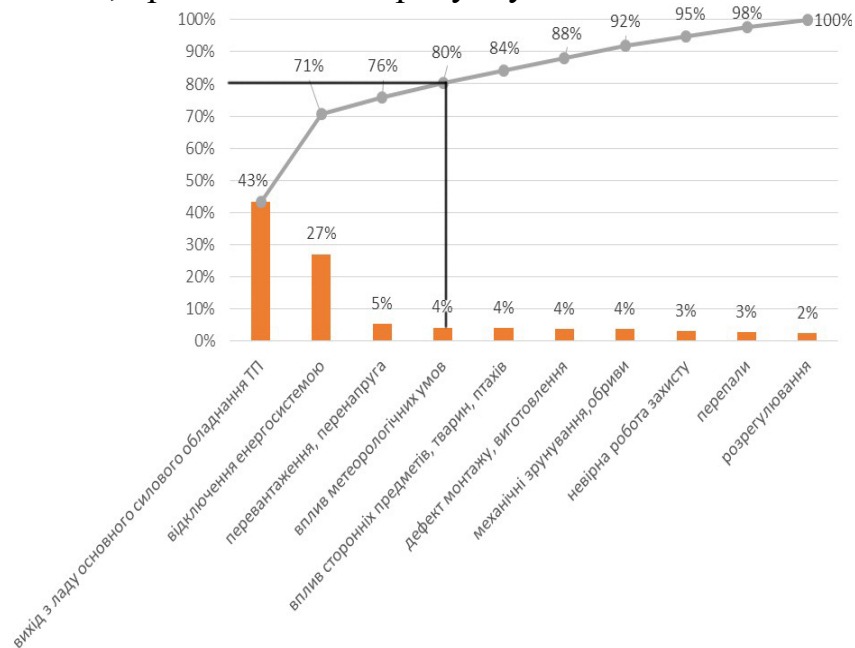


Рисунок 1.3 - Причини порушення роботи обладнання ТП

Аналіз діаграми показує, що 80 % причин порушень нормальної роботи системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць України за досліджуваній період складають: пошкодження основного силового обладнання ТП; відключення живлення енергосистемою; перевантаження та перенапруги; вплив метеорологічних умов. З них 43 % - відмови основного силового обладнання ТП. Результати дослідження відмов основного силового обладнання ТП електрифікованих залізниць України за 2000 – 2015 роки [2], представлено у таблиці 1.2.

Для виявлення обладнання ТП, стану якого необхідно приділити першочергову увагу при проведенні моніторингу, діагностуванні та ТО і Р, побудуємо діаграму Парето по результатам дослідження, які наведені у таблиці 2 (рис. 1.4).

Таблиця 1.2 - Розподіл порушень нормальної роботи основного обладнання ТП електрифікованих залізниць України

порушення	трансформатори	вимикачі	розрядники	компенсаційні пристрої	ізоляційні пристрої	роз'єдиачі	роз'єдиачі
-----------	----------------	----------	------------	------------------------	---------------------	------------	------------

Рік	всього	с и л о ві	тягові		ви мі р ю ва ль ні	ш в и д к о ді ю чі	6- 3 5 к В	1 1 0- 2 2 0 к В	фі де рні 27 ,5 кВ	п о с ті й н о го	з м і н н о го		р и			т
			по сті й н о го	змі н н о го												
2015	96	1	2	1		5	11	7	2		2		2	1		12
2014	105	1	2	3	2	3	5	1	2		2	1	3	1	1	
2013	46	1		7	1	3	4	1	2	2	1	1	1	2		8
2012	49	3		1	1	6	3		2			2	4		1	7
2011	58	2	4		4	5	3	3	1	1				1		9
2010	44				1	5	3	3	3			1	4	1	5	2
2009	43	2	1	3	4			1	1	1			4	1		
2008	28	2	3		1	1	2	2	2	1			3			
2007	28	2			1	1		1	2	1		1				2
2006	28				4	1	1	1	2		2		1		1	
2005	45		1		11		2	3	4		3		4	1	2	1
2004	58	1		1	6	4	2	2	1			1	5		2	9
2003	64			3	7	4	1	3	5		1	3	4		4	4
2002	96	3	1	3	8	5	5	2	8	1	3	4	9	2	3	6
2001	95	3	1	4	3	5	6	9	8	11		4	3	1	5	4
2000	120	1	1	3	5	7	3	2	4	3	3	14	9	2	3	19

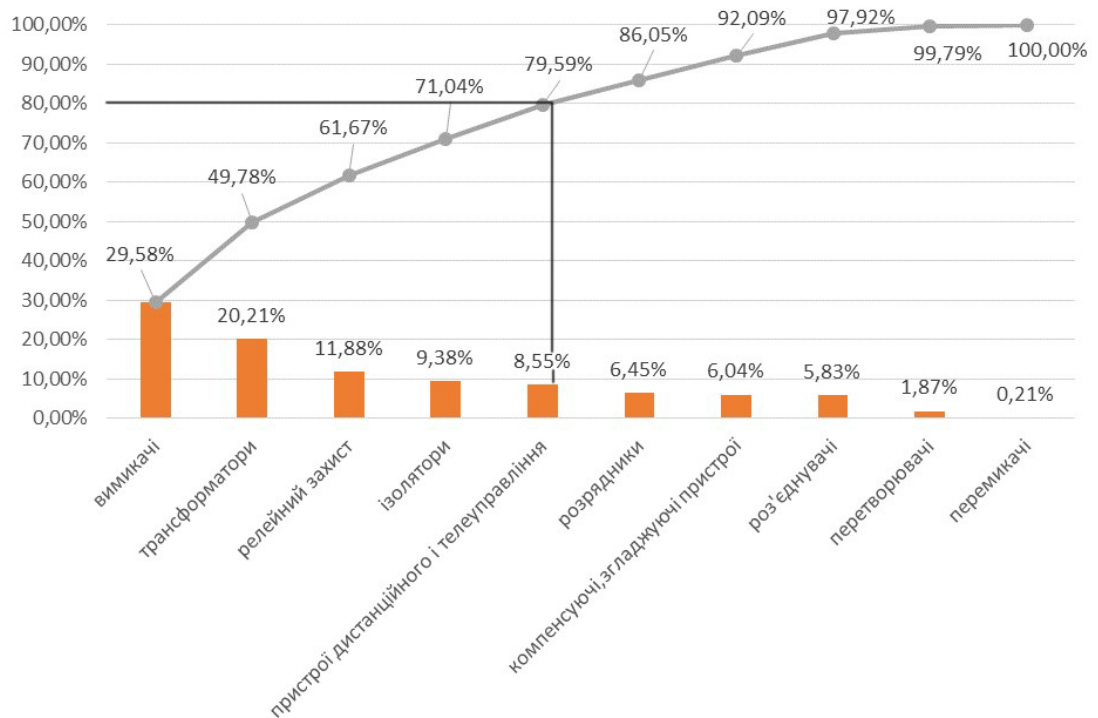


Рисунок 1.4- Розподіл порушень роботи обладнання ТП за типами устаткування

Аналіз діаграми показує, що основним обладнанням з вини якого здійснюється 79,59 % порушень нормальної роботи ТП електрифікованих залізниць України за досліджуваний період є: вимикачі, трансформатори (як силові, так і вимірювальні), пристрої релейного захисту, ізолятори та пристрої дистанційного і телеуправління. Також, основні порушення нормальної роботи ТП відбуваються за рахунок виходу з ладу вимикачів (29,58 %) та трансформаторів (20,21 %).

У електроенергетичних системах високовольтні вимикачі відносяться до одних з найбільш відповідальних видів електрообладнання. Якість функціонування високовольтних вимикачів визначає ступінь надійності і енергобезпеки роботи всієї системи передачі і розподілу електроенергії як в нормальних, так і в аварійних режимах. Ця проблема також стосується системи тягового електропостачання залізниць.

За допомогою високовольтних вимикачів здійснюються відключення аварійних струмів короткого замикання, операції комутації електропостачання, а також комутації, пов'язані зі зміною напрямку потоків потужностей в електроенергетичних системах. Очевидно, що в залежності від роботи вимикача його комутаційний ресурс витрачається нерівномірно. Будь-яким вимикачем можна виконати набагато більше операцій комутації номінального робочого струму, ніж аварійного, який в декілька десятків разів перевищує робочий струм вимикача. Оскільки спроби експлуатації вимикачів після вичерпання їхнього комутаційного ресурсу призводять до значних збитків, важливою технічною задачею є своєчасна оцінка залишкового комутаційного ресурсу цього класу пристроїв.

Основний парк вимикачів 110 кВ у господарстві електрифікації становлять вимикачі типу МКП з терміном експлуатації до 25 років (близько 70

%) [2], які зняті з виробництва, трудомісткі в експлуатації і не мають запасних частин.

Середньорічна кількість аварійних відключень на один живлячий фідер контактної мережі в 2015 становить 208 проти 258 у 2014 році.

Близько 55% від загальної кількості швидкодіючих вимикачів постійного струму складають вимикачі типу ВАБ-43. У 2015 році по залізницях замінено лише 4 швидкодіючих вимикачів постійного струму, на даний час залишається в експлуатації 352 морально застарілих вимикачів постійного струму типу АБ-2/4.

На змінному струмі експлуатуються масляні вимикачі типу ВМО-27,5 та ВМК-25, що мають низький ресурс відключень, потребують позачергових ремонтів і підлягають заміні. До того ж, ці вимикачі на даний час зняті з виробництва і відсутній обмінний фонд запчастин для виконання ремонтів.

Тому в даних умовах експлуатації ТП дуже актуальними є технічний контроль і діагностика стану високовольтних вимикачів, що дозволяють своєчасно виявляти дефекти або несправності, а потім оперативно усувати їх. Очевидно, що діагностиці високовольтних вимикачів, які знаходяться в експлуатації дистанцій електропостачання, слід приділяти підвищену увагу. В даний час для вирішення цієї проблеми в системі електропостачання залізниць, в тому числі і в діагностиці високовольтного електроустаткування, важливу роль починають грати сучасні методи з використанням автоматизованих систем діагностування. Застосування цих систем має важливе значення для зношеного електрообладнання, в першу чергу для вимикачів, яких застарілих в даний час знаходиться в експлуатації значно більше, ніж іншого силового обладнання ТП.

## **1.2. Система технічного обслуговування і ремонту та діагностування обладнання тягових підстанцій**

Ефективність і надійність тягового електропостачання залізниць залежить від технічного стану силового високовольтного обладнання ТП. Сучасне електрообладнання має досить високі розрахункові показники надійності [19]. Проте в процесі експлуатації під дією зовнішніх умов і режимів роботи вихідний стан обладнання безперервно погіршується, знижується експлуатаційна надійність і збільшується небезпека виникнення відмов. Як відомо, підтримання необхідного ступеня надійності обладнання в процесі його експлуатації забезпечується системою технічного обслуговування і ремонту. Метою системи технічного обслуговування і ремонту згідно ГОСТ 28.001-83 є управління технічним станом виробів протягом їх терміну служби або ресурсу до списання, що дозволяє забезпечити заданий рівень готовності виробів до застосування за призначенням та їх працездатність в процесі експлуатації, мінімальні витрати часу, праці та коштів на виконання ТО і Р виробів [13].

В даний час на дистанціях електропостачання електрифікованих залізниць Україні для ведення виробничої експлуатації і підтримки технічного стану устаткування ТП, відповідно до вимог нормативно-технічної документації та на основі складених річних графіків, застосовують систему планово-попереджувального ремонту [20] - [22]. Традиційно ця система базується на проведенні планових профілактичних робіт після напрацювання

певного часу.

Стратегія ППР зародилася в 40-х роках ХХ-го століття. Її поява була пов'язана із становленням планової економіки СРСР. З 1940 року вводяться Правила технічної експлуатації електричних станцій і мереж, а з 1955 - Єдина система планово-попереджувального ремонту і раціональної експлуатації технологічного устаткування машинобудівних підприємств. В 1963-1973 роках діє Положення про планово-попереджувальні ремонти устаткування і транспортних засобів на підприємствах металургійної промисловості СРСР, а з 1973 року - Положення про планово попереджувальні ремонти механічного обладнання, в основі якого використання статистичних даних про попередню експлуатацію механічного обладнання металургійних підприємств [23]. ТО і Р по стратегії ППР здійснюється періодично в планові терміни, що не залежать від технічного стану обладнання.

Основним техніко-економічним критерієм системи ППР служить мінімум простоїв устаткування ТП на основі жорсткої регламентації ремонтних циклів. Відповідно до цього критерію періодичність і об'єм робіт по ТО і Р визначаються заздалегідь встановленими для всіх видів устаткування типовими нормативами. Такий підхід попереджає прогресуючий знос устаткування і зменшує раптовість виходу його з ладу.

Система ППР дає можливість підготувати керовану і прогнозовану на тривалий період ремонтну програму: по видах ремонтів, типам устаткування ТП і дистанції електропостачання в цілому. Постійність ремонтних циклів дозволяє здійснювати надійне тягове електропостачання, а також прогнозувати матеріальні, фінансові і трудові ресурси. Це спрощує планування профілактичних заходів, дозволяє здійснити попередню підготовку ремонтних робіт, виконання їх в мінімальні терміни, підвищує якість ремонту і, зрештою збільшує надійність тягового електропостачання. Таким чином, система ППР призначена для підтримки надійної експлуатації обладнання ТП в умовах жорсткого централізованого планування і управління, стабільного завантаження силового електрообладнання ТП при його мінімальному резерві [ 24], [25].

В основу діючої системи ТО і Р ТП, згідно «Інструкції з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць» ЦЕ-0024 [22], покладено поєднання технічного обслуговування і планово-попереджувальних ремонтів. Залежно від важливості призначення устаткування в технологічному процесі, планово - попереджувальний ремонт може проводитися по методу планово - періодичного ремонту і ремонту по технічному стану. Згідно вимог даної Інструкції (пункт 4.14.7), ремонт обладнання за технічним станом виконується у випадку виявлення при оглядах несправностей, що загрожують нормальній роботі обладнання, після відмов у роботі обладнання та пристроїв релейного захисту і автоматики (РЗА), пошкодження обладнання аварійними струмами, атмосферними і комутаційними впливами, а також при виробітку встановленого механічного і комутаційного ресурсу. Як бачимо, питання визначення фактичного технічного стану обладнання за допомогою

діагностування, вимірів, випробувань, тощо не розглядається, а ТО і Р виконується за фактом пошкодження обладнання, його несправного стану або непрацездатності.

Існуюча система ППР в сучасних економічних умовах розвитку країни не забезпечує у багатьох випадках прийняття оптимальних техніко-економічних рішень [26], [27]. Це пояснюється тим, що призначення профілактичних робіт здійснюється згідно регламенту і не залежить від фактичного технічного стану обладнання на момент початку ремонту; плани-графіки ППР не встановлюють пріоритет виводу в ремонт різних видів електроустаткування за фактичним технічним станом; при складанні планів-графіків не враховується ряд обмежень (технологічних, матеріальних, трудових, тощо), а також не передбачається їх оптимізація з позиції раціонального управління станами процесу експлуатації і повного використання ресурсу кожної одиниці електроустаткування ТП; система ППР має велику трудомісткість профілактичних робіт. Також пропорційно зростанню кількості електроустаткування збільшується і загальна трудомісткість профілактичних робіт, що вимагає значного збільшення чисельності ремонтного персоналу. При проведенні профілактичних робіт через усереднені періоди які отримані статистичним методом, навіть за наявності поправочних коефіцієнтів на умови і режими експлуатації, без точного визначення фактичного технічного стану обладнання не можна гарантувати, що в міжремонтний період не стануться відмови електроустаткування ТП.

Оскільки при стратегії ППР періодичність всіх робіт жорстко регламентована і не залежить від фактичного стану пристроїв, така стратегія призводить до високих експлуатаційних витрат. Хоча дана стратегія зменшує інтенсивність поступових відмов, але не завжди впливає на раптові відмови і може привести до їх зростання після проведення профілактичних робіт [28]. Причому чим складніше пристрій і чим нижче кваліфікація обслуговуючого персоналу, тим більше відсоток відмов через людський фактор. Процес ТО при виборі профілактичної стратегії включає в себе регламентні роботи, додаткові роботи, роботи з відновлення пристроїв після відмов і комплексні перевірки стану пристроїв.

Обсяг роботи за системою ППР по ТО на певному об'єкті за час визначається кількістю і трудомісткістю окремих операцій, їх періодичністю та виражається формулою [13]:

(1.1)

де  $t_{\text{норм}}$  - нормований час виконання однієї регламентної роботи  
 $n$  - число виконуваних робіт;  
 $T$  - періодичність регламентної роботи;

- нормований час виконання додаткової роботи за планом підвищення надійності, в якому - об'єм робіт;

- середні витрати праці на відновлення об'єкта після відмови;

- середнє число відмов за період ;

- витрати праці на комплексну перевірку пристроїв на об'єкті;

- кількість комплексних перевірок за час .

Аналіз витрат праці технічного персоналу дистанцій електропостачання на ТО і Р при використанні профілактичної стратегії показує, що на виконання ТО і Р при такій стратегії витрачається до 80% сумарного часу, що визначається формулою (1.1). Тому основну увагу при оптимізації системи ТО і Р має приділятися вдосконаленню і можливому скороченню обсягу ТО і Р. Для цього, як видно з формули (1.1), є три шляхи:

- скорочення набору регламентних робіт - ;
- управління періодичністю регламентних робіт - ;
- зниження трудомісткості окремих операцій за рахунок вдосконалення технології виконання робіт.

При профілактичній стратегії неминуче виникають непродуктивні тимчасові втрати, які поділяються:

- на втрати, викликані низькою кваліфікацією і недостатнім досвідом працівників (збільшення наднормативного часу виконання окремих технологічних операцій, брак у роботі, виправлення браку в роботі, тощо);
- втрати, зумовлені недосконалим характером технологічного процесу (ручний спосіб вимірів, низька розв'язна здатність і великі похибки вимірювальних приладів викликають необхідність багаторазового повторення одних і тих технологічних операцій; інформація про відмови, яка надходить до експлуатаційного штату, вимагає уточнення і може викликати прийняття нерациональних рішень);
- втрати, пов'язані з неоптимальним плануванням робіт (непродуктивні пересування експлуатаційного штату при переході від одних пристроїв до інших або з одного виду робіт на інший);
- втрати, викликані причинами, що не залежать від експлуатаційного штату (порушення графіку виконання робіт через погані погодні умови, виходу з ладу інструменту, не передбачених збоїв та змін у графіку руху поїздів, відключення електроенергії, неузгодженість в діях різних служб, тощо).

Також система ППР має ще такі недоліки:

- планування профілактичних робіт здійснюється регламентовано і не залежить від фактичного технічного стану електрообладнання до моменту початку ремонту;

- плани-графіки профілактичних робіт не встановлюють пріоритету виведення в ремонт різних видів електрообладнання;
- система ППР не виключає можливості застосування технічної діагностики, однак, вона не вирішує завдання про те, як повинні враховуватися її результати;
- при складанні планів-графіків не враховується ряд обмежень (технологічних, матеріальних, обмежень часу, трудових), а також не передбачається їх оптимізація з позиції раціонального управління експлуатацією і більш повного витрачання ресурсу кожної одиниці електроустаткування;
- пропорційно зростанню кількості електрообладнання збільшується і загальна трудомісткість профілактичних робіт, що вимагає значного збільшення чисельності ремонтного персоналу;
- при проведенні ТО і Р через отримані статистичним шляхом регламентовані усереднені періоди, навіть при наявності поправочних коефіцієнтів на умови і режими експлуатації, без точного визначення фактичного технічного стану не можна гарантувати, що в міжремонтний період не виникатимуть відмови окремих вузлів або одиниць електроустаткування.
- у структурі ремонтних циклів не враховується фактичний час роботи електрообладнання.

Принципові положення системи ППР не змінювалися впродовж кількох десятиліть, а лише уточнювалися нормативи по періодичності і обсягу профілактичних робіт, в залежності від зміни режимів використання та конструкції електрообладнання.

Неадекватність існуючої системи ППР сучасним умовам експлуатації обладнання ТП носить багатоплановий характер. Вона залежить від багатьох зовнішніх і внутрішніх факторів які негативно впливають на стан системи тягового електропостачання залізниць. Їх негативна сторона полягає у невідповідності цілей, задач і змісту існуючої системи ППР сучасним умовам експлуатації електрообладнання ТП. До теперішнього часу не розроблено критерій ефективності управління ремонтною службою, велика частка суб'єктивізму в оцінці якості її функціонування, а внаслідок цього ускладнено економічно обґрунтоване планування ремонтних робіт, визначення ресурсів, необхідних для забезпечення працездатності електроустаткування, а також витрат, пов'язаних з використанням сировини, матеріалів, запасних частин і так далі. Це стримує поліпшення технології і організації, а також якості ремонтних робіт, гальмує зростання продуктивності праці ремонтного персоналу і підвищення ефективності використання ремонтних витрат.

Аналіз сучасних методів підвищення ефективності функціонування підприємств та їхніх підрозділів показує, що вирішення проблеми вдосконалення управління якістю ТО і Р та діагностування обладнання тягових підстанцій повинно здійснюватися на основі застосування досягнень сучасного менеджменту, у тому числі менеджменту якості [29] - [34].

### **1.3. Дослідження показників ефективності експлуатації тягових підстанцій**

Показники процесу експлуатації дозволяють оцінювати витрати (або загальні витрати) часу, праці та коштів на технічне обслуговування та ремонти і містять витрати, зумовлені конструкцією та технічним станом виробу ( оперативні витрати), і витрати, зумовлені організацією, технологією виконання технічного обслуговування та ремонтів, матеріально-технічним забезпеченням, кваліфікацією персоналу, умовами навколишнього середовища і т. д. [35] - [38].

Розрахунок даних показників техніки аналогічний розрахунку відповідних показників ремонтпридатності за ГОСТ 21623-76. При цьому замість оперативних витрат враховуються загальні витрати часу, праці і коштів. Показники для оцінки ремонтпридатності є оперативними складовими відповідних показників ГОСТ 18322-78 і ГОСТ 27.002-89 та засновані на обліку витрат часу, праці та коштів на технічне обслуговування і ремонт об'єкта, які обумовлені його конструкцією і технічним станом.

Ці витрати визначаються в заданих умовах виконання технічного обслуговування і ремонту з організації, технології, матеріально - технічного забезпечення, кваліфікації персоналу, умов навколишнього середовища, тощо для заданого напрацювання за певний період експлуатації.

В якості заданого напрацювання об'єкта при оцінці його ремонтпридатності приймають призначений ресурс до першого капітального ремонту, призначений ресурс між капітальними ремонтами або наробіток за встановлений термін служби до списання.

Значення показників для оцінки ремонтпридатності об'єктів обумовлюються кількістю (об'ємом) і періодичністю виконання робіт з ТО і Р, тобто безвідмовністю і довговічністю об'єктів та їх технологічністю при ТО і Р.

### **1.3.1. Терміни та визначення показників експлуатації електрообладнання**

Основні терміни та визначення показників експлуатації електрообладнання відповідно ГОСТ 18322-78 і ГОСТ 27.002-89 наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Показники експлуатації електрообладнання

Термін	Визначення
Середня тривалість (трудомісткість, вартість) технічного обслуговування (ремонт)	Математичне очікування тривалості ( трудомісткості, вартості) одного технічного обслуговування (ремонт) даного виду за певний період експлуатації або наробіток
Середня сумарна тривалість ( трудомісткість, вартість) технічних обслуговувань (ремонтів)	Математичне очікування сумарної тривалості ( трудомісткості, вартості) технічних обслуговувань (ремонтів) за певний період експлуатації або наробіток
Питома сумарна тривалість ( трудомісткість, вартість) технічних обслуговувань (ремонтів)	Відношення середньої сумарної тривалості ( трудомісткості, вартості) технічних обслуговувань (ремонтів) до заданого напрацювання

Продовження табл. 3.1.

Коефіцієнт готовності	Імовірність того, що обладнання виявиться в працездатному стані в будь-який момент часу, крім планованих періодів, протягом яких застосування виробу за призначенням не передбачається
-----------------------	--

Коефіцієнт технічного використання	Відношення математичного очікування сумарного часу перебування виробу в працездатному стані, за деякий період до математичного очікування сумарного часу перебування виробу в працездатному стані і простоях, викликаних технічним обслуговуванням та ремонтом за той же період.
------------------------------------	--

Загальна характеристика усього робочого часу виконавця при виконанні робіт з технічного обслуговування і ремонту об'єкта показано на рисунку 1.5.

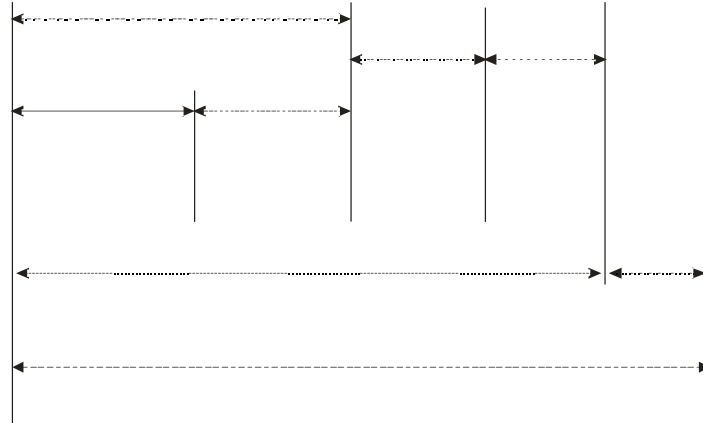


Рисунок 1.5 - Загальна характеристика усього робочого часу виконавця при виконанні робіт з ТО і Р об'єкта

Складові характеристики робочого часу при виконанні робіт з ТО і Р об'єкта:

1. Оперативний час технічного обслуговування (ремонту).

Поняття «Оперативний час технічного обслуговування (ремонту)» використовується для характеристики зайнятості кожного виконавця на роботах з технічного обслуговування (ремонту).

Оперативний час технічного обслуговування (ремонту) визначається при хронометражі робіт з технічного обслуговування і ремонту об'єктів кожного виконавця. Оперативний час в свою чергу складається з основного та допоміжного.

2. Основний час технічного обслуговування (ремонту).

Протягом основного часу ремонту здійснюється демонтаж або розбирання об'єкта або його частини, мийка, чистка, заміна деталей і складальних одиниць, складання об'єкта, тощо та його випробування після відновлення працездатності.

3. Допоміжний час технічного обслуговування (ремонту).

Протягом допоміжного часу технічного обслуговування (ремонту) здійснюється підготовка об'єкта до виконання робіт з технічного обслуговування (ремонту) шляхом часткового розбирання, наприклад демонтажу облицювання, капотів для забезпечення доступу до місця обслуговування (ремонту), і установка знятих складальних одиниць і деталей у вихідне робоче положення після операцій технічного обслуговування (ремонту). Допоміжний час є важливою характеристикою технологічності конструкції об'єкта при технічному обслуговуванні і поточному ремонті і є основною складовою при розрахунку коефіцієнта доступності як одного з показників для оцінки ремонтпридатності.

4. Підготовчо-заключний час.

Під підготовчо-заключним часом технічного обслуговування (ремонту) розуміється час, що витрачається кожним виконавцем на підготовку і приведення в порядок робочого місця і матеріальних засобів перед початком технічного обслуговування (ремонту), в процесі виконання і після його завершення, а також на отримання завдання, інструктаж і ознайомлення з технічною документацією. До матеріальних засобів, які використовуються при технічному обслуговуванні (ремонті), відносяться стаціонарне і пересувне обладнання, інструмент, матеріали, запасні частини, тощо.

5. Додатковий час.

Під додатковим часом технічного обслуговування (ремонту) розуміється час, що витрачається виконавцем на відпочинок і особисті потреби.

1.3.2 Розрахунок показників ефективності експлуатації обладнання тягових підстанцій  
Найбільш складним завданням ТО і Р є забезпечення правильного розрахунку показників тривалості технічного обслуговування та ремонтів, під якою розуміється пристосованість обладнання до операцій технічного обслуговування і ремонту. Для забезпечення достовірності і порівнянності результатів розрахунок показників тривалості технічного обслуговування та ремонтів слід проводити для оптимальних умов організації робіт при технічному обслуговуванні та ремонті. Це значить, що середня оперативна тривалість технічного обслуговування (ремонту) даного виду, на базі якої розраховуються середня сумарна оперативна і питома сумарна оперативна тривалість, повинна визначатися як тривалість мережевого графіка виконання технічного обслуговування (ремонту), який будується з урахуванням переліку та кількості операцій в технічному обслуговуванні (ремонті) даного виду та кількості виконавців цього обслуговування (ремонту).

Оперативна тривалість технічного обслуговування (ремонту)

Поняття «Оперативна тривалість технічного обслуговування (ремонту)» використовується для характеристики зайнятості об'єкта роботами з технічного обслуговування (ремонту) на відміну від поняття «Оперативний час технічного обслуговування (ремонту)», яке використовується для характеристики зайнятості роботами кожного окремого виконавця.

Оперативна тривалість технічного обслуговування (ремонту) залежить від пристосованості об'єкта до одночасного виконання робіт декількома виконавцями, що особливо важливо для складних об'єктів.

Мінімальна оперативна тривалість технічного обслуговування (ремонту) має місце при рівномірному і одночасному завантаженні всіх виконавців.

При нерівномірному і неодноразовому завантаженні всіх виконавців оперативна тривалість визначається інтервалом часу від початку робіт з технічного обслуговування (ремонту) першого виконавця до їх завершення останнім виконавцем. У разі одного виконавця оперативна тривалість збігається з оперативним часом і чисельно дорівнює оперативній трудомісткості технічного обслуговування (ремонту).

Середня сумарна оперативна тривалість (трудомісткість, вартість) технічних обслуговувань

Середня сумарна оперативна трудомісткість технічних обслуговувань об'єкта за певний період експлуатації представляє суму середніх оперативних трудомісткості окремих видів технічного обслуговування і в загальному вигляді може бути виражена формулою

(1.2)

де - середня оперативна трудомісткість технічного обслуговування виду;

- кількість ТО виду;

- кількість видів технічного обслуговування.

В свою чергу середню оперативну трудомісткість технічного обслуговування виду визначають за формулою:

(1.3)

де - кількість виконавців виду технічного обслуговування;

- кількість операцій виду технічного обслуговування;

- оперативне час, що витрачається - виконавцем на виконання операції, який визначається як математичне очікування оперативного часу або як середньоарифметичне значення всіх вимірів за період випробувань, тобто

(1.4)

де - кількість вимірювань.

Середня сумарна оперативна трудомісткість технічного обслуговування об'єкта може бути представлена як сума середніх оперативних трудомісток технічного обслуговування його комплектуючих складових, систем, агрегатів, і т.д., тобто

(1.5)

де - номер системи, агрегату, комплектуючої складової;  
- кількість систем, агрегатів, комплектуючих складових, даного об'єкта;

- середня оперативна трудомісткість технічного обслуговування даної системи, агрегату і т.д. за певний період експлуатації.

За аналогією з виразом (1.3)

(1.6)

де - оперативний час, що витрачається - виконавцем на виконання операції технічного обслуговування даної системи, агрегату і т.д., що визначається у відповідності з (1.4).

У разі необхідності оцінити середню сумарну оперативну трудомісткість технічного обслуговування об'єкта в цілому або його систем, агрегатів і т.д. за видами робіт (контрольні, кріпильні, регулювальні, мастильні і т.д.) оперативну трудомісткість можна представити як

(1.7)

де - номер виду робіт;  
- кількість видів робіт;

- середня оперативна трудомісткість кожного виду робіт, яку обчислюють за формулою

(1.8)

Визначення показників для оцінки пристосованості об'єкта до планового технічного обслуговування може бути проведена на основі врахування затрат часу, праці та коштів за один цикл всіх видів технічних обслуговувань.

Середня сумарна оперативна тривалість (трудомісткість, вартість) поточних ( капітальних) ремонтів

Відповідно до ГОСТ 18322-78 поточні (капітальні) ремонти можуть бути плановими і неплановими. Витрати часу, праці та коштів на проведення планових поточних ремонтів визначаються кількістю (об'ємом) операцій, періодичністю їх виконання та ремонтної технологічності об'єкта.

Витрати часу, праці та коштів на проведення непланових поточних ремонтів, при яких усуваються наслідки відмов і ушкоджень, що виникають при експлуатації, визначаються номенклатурою відмов, їх інтенсивністю і ремонтної технологічності об'єкта. При визначенні показників для оцінки пристосованості об'єкта до планового капітального ремонту повинні враховуватися витрати часу, праці та коштів на перший капітальний ремонт об'єкта, що проводиться після вичерпання ресурсу від початку експлуатації в цілях повного або близького до повного його відновлення. Витрати часу, праці та коштів на проведення планового капітального ремонту визначаються лише кількістю (об'ємом) операцій та ремонтної технологічності. При цьому відповідні показники визначаються на основі оцінки витрат часу, праці та коштів на ремонт методом заміни деталей без врахування витрат на їх відновлення.

Витрати часу, праці та коштів на відновлення деталей повинні враховуватися окремо. Включення цих витрат у розрахунок показників обмовляється. Витрати часу, праці та коштів на відновлення деталей визначаються тільки при наявності нормативно-технічної документації на методи відновлення деталей. Витрати часу, праці та коштів на проведення непланових капітальних ремонтів визначаються номенклатурою відмов, їх інтенсивністю і ремонтної технологічності об'єкта.

Коефіцієнт використання. Плановим (фактичним) коефіцієнтом використання (для кожного окремого пристрою або для обладнання в цілому) називається відношення сумарного часу справної роботи пристрою (обладнання) за період експлуатації до даного періоду експлуатації:

(1.9)

де  $K_{\text{пл}}$  - плановий (фактичний) коефіцієнт використання;

$T_{\text{пл}}$  - сумарний час справної роботи;  
 $T_{\text{р}}$  - період експлуатації;

$T_{\text{ТО і Р}}$  - сумарний час проведення ТО і Р.

Чим більш ефективно використовується обладнання, чим менше витрати часу на всі види робіт з ТО і Р, включаючи профілактичну і процес відновлення справності, тим вище коефіцієнт використання. При правильно організованому ТО і Р апаратури  $K_{\text{пл}}$ , отже витрати часу на всі види робіт з технічного обслуговування не перевищують тривалості її експлуатації

**Коефіцієнт готовності.** Плановий (фактичний) коефіцієнт готовності відрізняється від коефіцієнта використання тим, що при його визначенні беруть

до уваги не тривалість технічного обслуговування , а тільки сумарні витрати часу які обумовлені простоями апаратури в процесі відновлення справності, отже при розрахунку коефіцієнта готовності виключаються сумарні витрати часу на профілактичне обслуговування :

$$(1.10)$$

де  $K_{г}$  - плановий (фактичний) коефіцієнт готовності ;  
 $T_{п}$  - період експлуатації;  
 $T_{ср}$  - сумарні витрати часу для ремонту.

Очевидно, чим вище коефіцієнт готовності, тим менше тривалість простоїв апаратури і вище якість і ефективність робіт з відновлення справності обладнання. При використанні методу централізованого обслуговування . Іншими словами, витрати часу при простоях апаратури складають тривалості справної роботи між двома наступними одне за іншим ушкодженнями пристроїв.

В даній роботі в якості показників ефективності системи технічного обслуговування і ремонту пропонується оцінювати середню сумарну оперативну тривалість робіт з технічного обслуговування та ремонту обладнання тягових підстанцій, вартість проведення даних робіт, а також коефіцієнт готовності та коефіцієнт технічного використання.

#### **1.4. Система технічного обслуговування і ремонту та діагностування обладнання тягових підстанцій з точки зору процесного підходу**

Огляд літературних джерел показав, що нині є велика кількість публікацій, пов'язаних із застосуванням процесного підходу [39] - [42], у яких автори розглядають цю концепцію стосовно процесів випуску продукції, тобто основних виробничих процесів. Проте організація допоміжних і обслуговуючих процесів грає не менш важливу роль при впровадженні на підприємстві СМЯ.

Отже, розглядаючи діяльність підприємства у вигляді послідовності взаємопов'язаних процесів, необхідно приділяти підвищену увагу до якості протікання обслуговуючих і допоміжних процесів, одним з найважливіших серед яких є процес технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) устаткування .

Доказом цього служать наступні факти.

По-перше, тягові підстанції оснащені силовим електрообладнанням, електронними системами керування та діагностики які відносяться до класу наукомістких виробів з довготривалою експлуатацією у важких умовах. В процесі експлуатації вони втрачають свої робочі якості, головним чином із-за зносу і руйнування окремих деталей і вузлів, тому знижується точність, потужність, продуктивність і інші параметри. Для компенсації зносу і

підтримки устаткування в нормальному, працездатному стані потрібно його систематичне технічне обслуговування і виконання ремонтних робіт [43] - [46].

По-друге, нераціональна організація ТО і Р устаткування ТП може стати причиною порушення ходу виробничого процесу, оскільки спричиняє за собою втрати у вигляді:

- простоїв працівників на основних і допоміжних роботах;
- затримки поїздів в результаті раптових відмов обладнання ТП;
- зростання кількості непридатного і готового до ліквідації

устаткування;

- нераціональних витрат на проведення ТО і Р електрообладнання ТП

;

- великих часових простоїв обладнання ТП, які визначаються особливостями експлуатації, організацією ТО і Р і діагностування (використання техніки різних виробників, висока вартість запасних частин і високі витрати при складському зберіганні, брак кваліфікованих кадрів для експлуатації нової та модернізованої техніки, тощо).

По-третє, річні витрати на ТО і Р устаткування на підприємствах складають 10-25% від первинної вартості основних фондів, а доля цих витрат в структурі собівартості продукції досягає 6-8%. При цьому чисельність робітників, зайнятих ремонтом і обслуговуванням устаткування, коливається в межах 20-30% від загальної чисельності допоміжних робітників [47].

Отже, технічне обслуговування нині не можна вважати діяльністю, що не приносить прибутку, а основним завданням ремонтних служб підприємств має бути поліпшення способів організації ремонтних робіт, якого можна добитися застосуванням принципів процесного підходу. Тому діяльність ремонтної служби дистанцій електропостачання пропонується розглядати як процес ТО і Р технологічного устаткування.

Цей процес можна віднести до розряду критичних, тобто тих процесів, неналежна організація яких або недотримання вимог до виконання яких можуть представляти фактичну або потенційну небезпеку для виробничого процесу в цілому, а, отже, і для ефективності роботи всього підприємства [48] - [50].

Незалежно від системи централізації і організації виконання ремонтних робіт, структури ремонтної служби, процес ТО і Р устаткування в тому або іншому вигляді існує на будь-якому промисловому підприємстві, що має ремонтну службу [51].

### **1.5. Моніторинг і аналіз процесів у рамках створення збалансованої системи показників на підприємстві**

Для підвищення ефективності існуючої системи ТО і Р обладнання тягових підстанцій доцільно застосовувати сучасні системи управління якістю, які базуються на стандартах ISO 9000:2009.

Згідно з вимогами стандартів ISO 9000:2009 в організації має бути розроблена і застосовуватися методика моніторингу і виміру процесів СМЯ, яка демонструє здатність процесів досягати запланованих результатів.

Методика виміру процесів, а також вимірювані параметри процесів мають бути описані у внутрішніх нормативних документах, які є основою

системи управління якістю. Вихідні дані аналізу результатів виміру процесів СМЯ документуються керівниками процесів, контролюються уповноваженим за якістю і представляються вищому керівництву в якості вхідних даних для аналізу.

Найбільш важливі умови, необхідні для документування вимірюваних параметрів для кожного процесу підприємства приведені в таблиці 1.4 [52].

Для ефективного оцінювання керівництвом діяльності підприємства необхідно узагальнити і проаналізувати величезні масиви різнорідних даних, отриманих в процесі діяльності. В результаті аналізу формуються показники, на основі яких і приймаються управлінські рішення і здійснюється діяльність по поліпшенню.

Таблиця 1.4 - Вимоги до вимірюваних показників процесів

Назва	Легко сприймане ім'я, яке описує дію або результат дії і відбиває деталізацію стратегії компанії по якому-небудь напрямку
Визначення	Значення показника
Методика розрахунку	Точна формула для розрахунку з описом використовуваних даних
Періодичність розрахунку	Визначає, як часто цей показник розраховуватиметься (щодня, щомісячно, щокварталу, щорічно)
Відповідальна особа	Людина, яка є фахівцем в області, описаній показником, бере участь в його розрахунку і відповідає за його значення
Джерело даних	Визначає, чи наявні дані в організації, і вказує на місце і формат їх зберігання
Рівень управління	Пояснює, на якому рівні управління цей показник розраховується і надається

Для адекватної оцінки якості процесу ТО і Р обладнання тягових підстанцій пропонується використання комплексного узагальненого показника технічного стану, який повністю задовольняє вимогам, представленим в табл. 1.4. Даний показник, побудований на основі функцій бажаності Харінгтона, яка широко використовуються при формуванні часткових і комплексних показників якості при вирішенні задач оптимізації, спрощує процес обробки великих масивів діагностичних даних, а також дає змогу отримати диференційовану оцінку якості технологічного процесу незалежно від способу виміру його показників. Комплексний критерій якості може служити основою для розробки методики удосконалення системи ТО і Р обладнання ТП. Процес ТО і Р має своєю головною метою забезпечення: життєздатності організації в різних умовах зовнішнього і внутрішнього середовища. У зв'язку з цим аналіз і оцінку якості цього процесу слід проводити як відносно підпроцесів усередині нього, так і відносно результатів його дії на функціонування процесів основного виробництва підприємства для підвищення їх ефективності. Основу організації взаємодії процесу ТО і Р і процесів основного виробництва на дистанції електропостачання повинні складати внутрішньовиробничі взаємозв'язки, які повинні проявлятися у вигляді єдиної системи матеріального стимулювання і відповідальності між підрозділами, що виконують основні і допоміжні процеси у рамках мережі процесів підприємства.

При організації таких стосунків необхідно враховувати особливості діяльності ремонтної служби. Ці особливості проявляються, передусім, в тому, що:

- діяльність ремонтної служби не може розглядатися в відриві від показників роботи ЕЧ в цілому;

- перед ремонтною службою, як правило, не ставиться мета збільшення обсягу основного виробництва, тобто головним завданням процесу ТО і Р являється не збільшення кількості відремонтованого устаткування, а підтримка його в стані постійної працездатності;

- надплановий об'єм робіт, зроблений ремонтною службою, тягне за собою збільшення витрат основного виробництва і знижує загальну ефективність діяльності ЕЧ.

Отже, при розробці методів підвищення ефективності існуючої системи ТО і Р та діагностування обладнання тягових підстанцій необхідно базуватись на створенні збалансованої системи управління якістю ремонтного процесу.

### **Висновки до розділу 1**

Існуюча система ППР в сучасних економічних умовах розвитку країни не забезпечує у багатьох випадках прийняття оптимальних техніко-економічних рішень. Це пояснюється тим, що призначення профілактичних робіт здійснюється згідно регламенту і не залежить від фактичного технічного стану обладнання на момент початку ремонту. Аналіз статистики експлуатації електрообладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць, а також динаміки затримки поїздів показав негативну картину зміни. Так, внаслідок пошкодження пристроїв електропостачання на залізницях України за 2015 рік було затримано 1006 поїздів на 765,5 годин, у 2011 році 832 поїзди на 656 годин. В свою чергу зростає і кількість відмов пристроїв електропостачання. Це показує, що існуюча система ППР стала неадекватною економічним умовам функціонування системи тягового електропостачання та експлуатації силового обладнання ТП електрифікованих залізниць і увійшла до протиріччя з ринковими механізмами виробничо-господарської діяльності об'єктів господарства електропостачання Укрзалізниці. На сучасному етапі розвитку залізниць України удосконалення системи ТО і Р електроустаткування ТП стає однією з основних задач підвищення надійності тягового електропостачання та вирішення проблеми скорочення витрат на ТО і ремонт.

При цьому, до теперішнього часу, не розроблено критерії оцінки ефективності експлуатації електрообладнання. Це призводить до зниження якості виконуваних робіт, нераціонального використання матеріальних та людських ресурсів, що спричиняє додаткові збитки. Тому в даній роботі запропоновано використовувати узагальнений показник технічного стану електрообладнання тягових підстанцій, який дає змогу оцінити максимально можливий спектр експлуатаційних показників контрольованого обладнання для більш точної оцінки технічного стану, в якості критерію ефективності експлуатації електроустаткування

Для підвищення ефективності експлуатації електрообладнання тягових підстанцій з використанням узагальненого показника технічного стану об'єкта необхідно вирішити наступні наукові задачі:

1. Проаналізувати методи технічного обслуговування і ремонту електрообладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць.
2. Розробити структурно-функціональну модель процесу технічного обслуговування і ремонту електрообладнання.
3. Розробити методику розрахунку часткових і узагальнених показників технічного стану електрообладнання.
4. Отримати аналітичні вирази для розрахунку узагальненого показника технічного стану електрообладнання.
5. Розробити спеціалізоване програмне забезпечення для вирішення задач моніторингу і прогнозування технічного стану електрообладнання.
6. Розробити методику моніторингу і прогнозування технічного стану електрообладнання на основі узагальнених показників технічного стану устаткування.

Основні положення розділу опубліковані в роботах [1, 2, 4, 5].

## 2 СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСНОГО УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ

### 2.1. Місце системи технічного обслуговування і ремонту у структурі господарства електрифікації

Основною технологічною задачею господарства Е є гарантоване забезпечення електроенергією залізничних та сторонніх споживачів. Електроенергія виступає основним видом продукції. З позицій процесного підходу і відповідно до вимог стандарту системи управління якістю (ДСТУ ISO 9001-2009), функціонування інфраструктури господарства Е може бути представлене у вигляді схеми (рисунок 2.1), в якій гарантоване забезпечення електроенергією залізничних та сторонніх споживачів визначається як головний бізнес-процес господарства [53], [54].

На цій функціональній схемі блоками зображені бізнес-процеси системи. Ліва сторона блоків призначена для входів, права – для виходів, нижня – для механізмів, верхня – для керівних факторів. Таке позначення окреслює основні системні принципи: вхідна продукція перетворюється у вихідну, управління системою обмежує або вказує умови виконання перетворень, механізми показують, хто, що і яким чином виконує функції процесів та підпроцесів [55], [56].

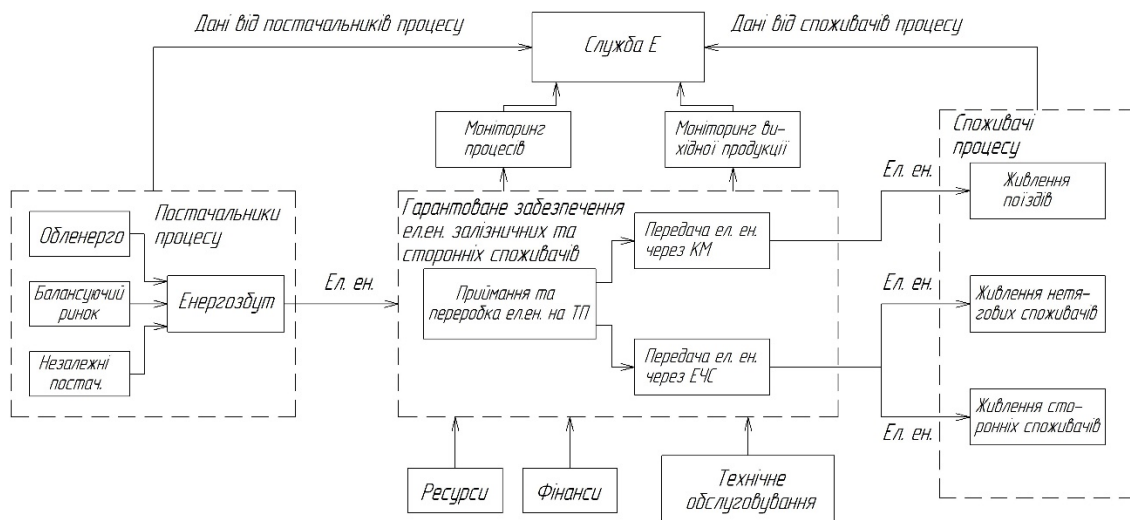


Рисунок 2.1. Функціональна структура головного бізнес-процесу господарства Е

Споживачами послуг господарства Е виступають:

- залізничні тягові споживачі - до 80 % електроенергії припадає на споживання електрорухомим складом (далі ЕРС) і спрямована на забезпечення тяги поїздів;
- залізничні нетягові споживачі - споживана ними електроенергія припадає на експлуатаційні потреби по господарствам та дирекціям на філіалах колії, вагонного господарства, вантажної і комерційної роботи, сигналізації та зв'язку, служби руху, локомотивного господарства, цивільних споруд та ін.;
- сторонні споживачі, які мають технологічне приєднання до електричних мереж підприємств господарства Е.

На підставі даної градації споживачів послуг господарства Е та виходячи з основної технологічної задачі господарства - гарантованого забезпечення електроенергією споживачів - якість виконання послуг визначається задоволеністю споживачів. Відносно залізничних тягових споживачів слід говорити про задоволеність перевезень [57].

Для виконання головного завдання - забезпечення електроенергією залізничних та сторонніх споживачів - підприємства господарства Е перетворюють електроенергію на тягових підстанціях (далі ТП), передають електроенергію заданих параметрів через КМ на ЕРС для тяги поїздів, а також передають електроенергію заданих параметрів через райони електропостачання стороннім споживачам (населенню, підприємствам).

Якість виконання основної технологічної задачі господарства Е визначається якістю виконання технологічного процесу постачання електроенергії і залежить від постачальників процесу [58].

Обсяг купленої та отриманої електроенергії для господарства Е в значній мірі обумовлений розмірами руху поїздів. Освоєння обсягів електроенергії, а також їх планування здійснюється відповідними структурними підрозділами Укрзалізниці - службами руху локомотивного господарства, фінансово-економічною службою, які визначені як «постачальники процесу». Вищеперераховані процеси відносяться до *основних процесів*.

Можливість реалізації завдань, покладених на господарство Е, багато в чому визначається відведеним для цього матеріальним і фінансовим ресурсом, розрахованим на певний період. В рамках своїх повноважень власник процесу здійснює менеджмент фінансів та ресурсів. У зв'язку з цим можна говорити про наявність керуючих факторів, що визначають якість виконання господарством Е поставлених перед ним завдань. Ці процеси відносяться до *процесів управління*.

Організаційно-технічний супровід головного процесу здійснюється лінійними підприємствами господарства служби Е - дистанціями електропостачання (далі ЕЧ) та їх лінійними підрозділами – ЕЧЕ, ЕЧК і районами електропостачання (далі ЕЧС).

Функції технічного обслуговування головного процесу господарства Е можна розбити на два підпроцеси, кожен з яких в свою чергу також поділяється на свої підпроцеси (рисунок 2.2):

1. Експлуатація технічних пристроїв електропостачання, що включає:

- моніторинг та діагностику технічного стану обладнання ТП, КМ і ЕЧС;
- технічне обслуговування та ремонт обладнання ТП, КМ, постів секціонування та пунктів паралельного з'єднання, а також обладнання ЕЧС.

2. Забезпечення процесу експлуатації технічних пристроїв, що включає модернізацію та оновлення обладнання, підготовку виробництва та інші види діяльності [3]. Ці процеси відносяться до *забезпечуючих процесів*.

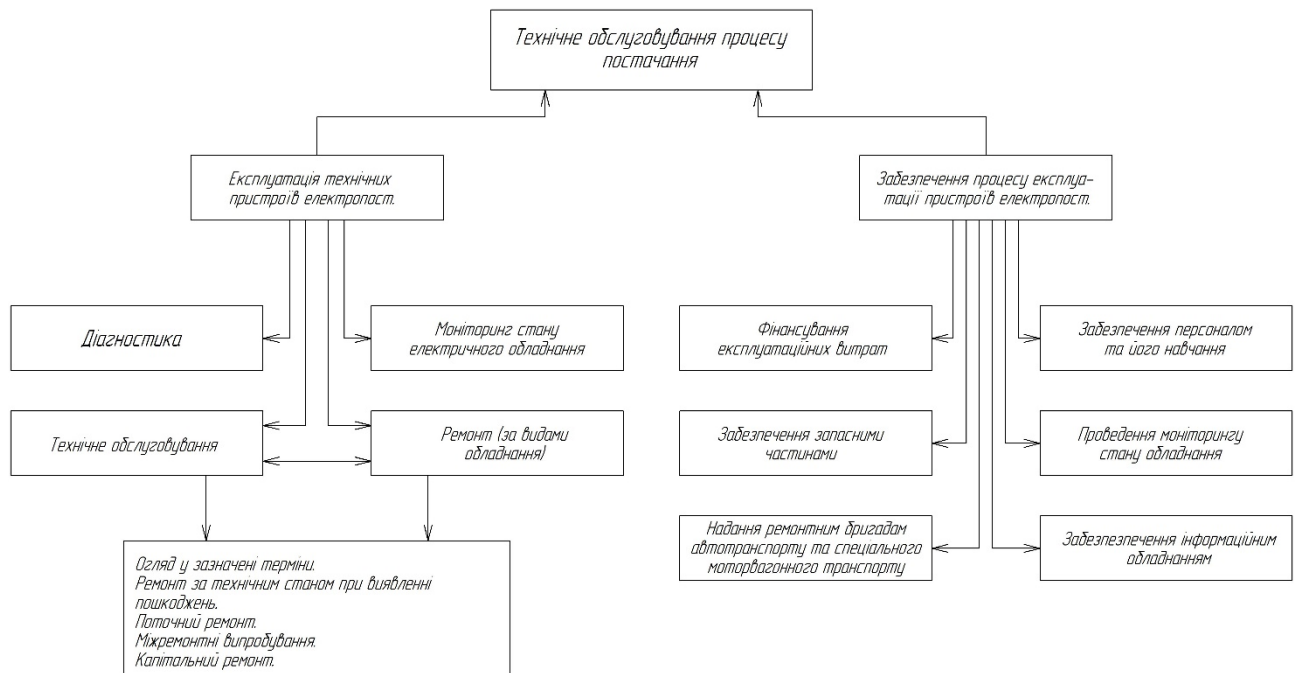


Рисунок 2.2. Функціональна структура технічного обслуговування процесу експлуатації

Для забезпечення процесу експлуатаційної роботи використовуються наступні ресурси і процеси: фінансування експлуатаційних витрат, забезпечення персоналом та його навчання, забезпечення запасними частинами, проведення моніторингу стану обладнання (ТП) і (КС), надання ремонтним бригадам автотранспорту та спеціального моторвагонного транспорту, забезпечення інформаційним обладнанням [44].

## 2.2. Характеристика процесу технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій

Практична реалізація процесного підходу на підприємствах передбачає опис процесів з урахуванням усіх компонентів, необхідних для його належного функціонування. У загальному випадку, в розгорнутому описі процесу доцільно вказувати наступні його характеристики [39], [52], [41], [42], [59]:

- повне найменування процесу (воно має бути коротким і по можливості максимально зрозумілим);
  - визначення процесу (формулювання, що розкриває суть, основний зміст процесу);
  - мета процесу (необхідний або бажаний результат процесу);
  - власник процесу (особа, відповідальна за перспективне планування, ресурсне забезпечення і ефективність процесу);
  - керівник процесу (особа, відповідальна за поточне планування і ведення процесу з метою досягнення запланованих результатів);
  - нормативи процесу (документація, що містить показники норм, відповідно до яких здійснюється процес);
  - входи процесу (матеріальні і інформаційні потоки, що надходять в процес ззовні і підлягають перетворенню);
  - виходи процесу (результати перетворення, що додають вартість).
- Будь-який процес повинен мати, принаймні, один вихід;

- ресурси (фінансові, технологічні, матеріальні, часові і інформаційні, за допомогою яких здійснюється перетворення входів у виходи);
- процеси постачальників (внутрішні або зовнішні постачальники — джерела входів даного процесу);
- процеси споживачів (процеси внутрішнього або зовнішнього походження, що є користувачами результатів даного процесу);
- вимірювані параметри процесу (його характеристики, які підлягають виміру і контролю);
- показники результативності і ефективності процесу (відповідності фактичних результатів процесу запланованим, а також зв'язок між досягнутим результатом і використаними ресурсами) [60] - [62].

Найважливіші характеристики процесу ТО і ремонту електрообладнання ТП, виявлені відповідно до перерахованих вимог, приведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Характеристики процесу ТО і ремонту

Повне найменування процесу	Технічне обслуговування і ремонт обладнання ТП
Визначення процесу	Задоволення потреб дистанції електропостачання в проведенні робіт по підтримці в працездатному стані електрообладнання ТП

Продовження табл. 2.1.

Мета процесу	Підтримання електроустаткування в робочому стані при мінімальних трудових і матеріальних витратах
Власник процесу	Керівництво дистанції електропостачання
Керівник процесу	Начальник ЕЧЕ
Нормативи процесу	Нормативна документація («Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів», «Інструкція з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць» ЦЕ-0024, «Технологічні карти поточного ремонту обладнання тягових підстанцій залізниць», «Типові норми часу на поточний ремонт обладнання та пристроїв тягових підстанцій і постів секціонування електрифікованих залізниць»), передісторія виконання ремонтних робіт, план-графік ППР.
Входи процесу	- номенклатура обладнання; - технологічне обладнання: а) справне (вимагає ТО і плановий ремонт); б) несправне (вийшло з ладу в результаті аварії)
Виходи процесу	- обладнання, що пройшло ТО; - обладнання, що пройшло ремонт (плановий і неплановий); - звіт про проведення робіт по ТО і ремонту
Ресурси	- персонал ремонтної служби; - інфраструктура (обладнання, будівлі і виробничі приміщення, транспорт, зв'язок і так далі);

	- матеріальні і часові ресурси, необхідні для виконання усіх видів ремонтних робіт; - програмне забезпечення, задіяне при виконанні процесу
Постачальник процесу	Дистанція електропостачання та залізниця в цілому
Споживач процесу	Дистанція електропостачання та залізниця в цілому

Продовження табл. 2.1.

Вимірювані параметри процесу	Витрати на проведення ремонтно-профілактичних робіт (РПР), матеріальний збиток діяльності залізниці в результаті відмов обладнання дистанції електропостачання (затримка поїздів)
Показники результативності і ефективності процесу	Узагальнений показник технічного стану (Інструмент управління якістю процесу ТО і ремонту)

На основі даних таблиці 2.1 можна зробити наступні висновки, що характеризують процес ТО і ремонту обладнання.

- процес ТО і Р орієнтований на дистанцію електропостачання та залізницю в цілому. Дистанції електропостачання є одержувачами продукції – працездатного устаткування, а залізниця в результаті – відсутності перерв у русі поїздів внаслідок виходу з ладу електрообладнання;
- виконання технологічних операцій в рамках процесу повинне бути строго регламентоване. Тому воно регулюється низкою нормативних документів, які висвітлені в нормативах процесу;
- процес ТО і Р обладнання має бути завжди налаштований на очікування споживачів, які потрібно знати. Тому необхідно знати конкретні розраховані показники ефективності процесу ТО і Р електрообладнання;
- процес ТО і Р утворюється сукупністю взаємозв'язаних і завершених робіт. Результати однієї роботи є початком іншої, утворюючи ланцюжок внутрішніх постачальників і споживачів. Іншими словами, кожен учасник цього процесу є одночасно споживачем результатів роботи попереднього і постачальником для виконавця, що слідує за ним;
- кожна з робіт у складі процесу ТО і Р зазвичай виконується окремими людьми або підрозділами ремонтної служби дистанції електропостачання. Окремий підрозділ або працівник ремонтної служби може брати участь в декількох підпроцесах. Це треба враховувати при плануванні робіт з ТО і Р.

### **2.3. Управління процесом технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій**

Кожен процес повинен мати власника – відповідальна особа (група осіб, підрозділ) з чітко визначеними обов'язками і повноваженнями. Ця особа несе відповідальність за розробку процесу, його документацію, оцінку ефективності

функціонування процесу, а також за навчання співробітників і визначення взаємозв'язків між ними. Власник процесу безперервно або з встановленою періодичністю контролює хід процесу і приймає керівні рішення у випадках відхилення параметрів процесу від критеріїв, встановлених для нормального ходу процесу [63]. В якості методу управління процесом ТО і ремонту електрообладнання ТП був вибраний рекомендований стандартом ISO 9001:2009 цикл Демінга-Шухарта PDCA (Plan-Do-Check-Act), що включає функції планування, організації робіт, контролю їх виконання і регулювання [64]. Суміщена схема циклу P-D-C-A та схеми процесного підходу зображена на рисунку 2.3.

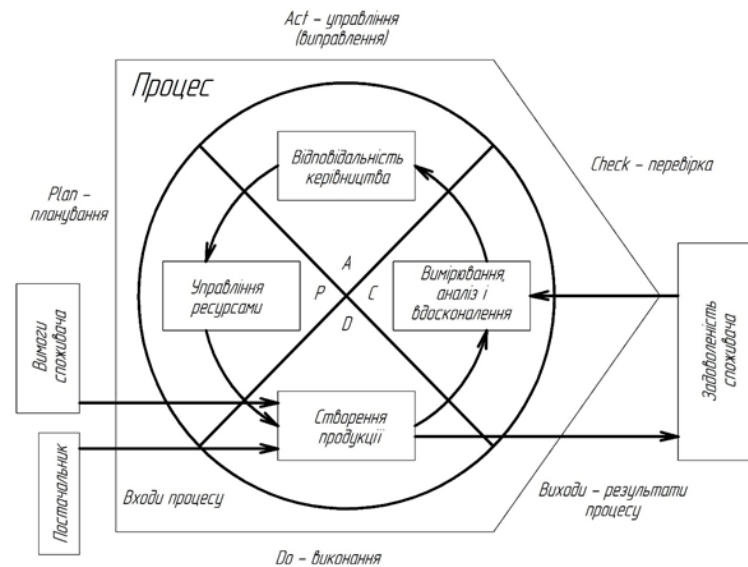


Рисунок 2.3 - Суміщена схема циклу Демінга-Шухарта та схеми процесного підходу

Проаналізуємо функції цього циклу управління стосовно даного процесу:

- при плануванні процесу ТО і ремонту (*Plan*) встановлюються обґрунтовані завдання і визначаються матеріальні і часові ресурси, необхідні для їх виконання;
- організація ремонтних робіт (*Do*) - це впорядкування (раціональний розподіл) діяльності підрозділів і посадовців ремонтної служби ЕЧ з метою досягнення запланованих результатів;
- контроль виконання процесу ТО і ремонту (*Check*) - це безперервний аналіз і оцінка відповідності фактичних значень вимірюваних параметрів встановленим, а також періодичне оцінювання результативності і ефективності процесу;
- регулювання цього процесу (*Act*) передбачає усунення невідповідностей (за допомогою корекції або коригуючих дій), що виникають в ході процесу, і його постійне поліпшення. Основними напрямками поліпшення процесу ТО і ремонту слід рахувати мінімізацію його змінності і перевищення досягнутих показників ефективності. Очевидно, що чим складніше процес, тим більше потенціал, необхідний для його поліпшення.

Функціонування головного процесу господарства Е (рисунок 2.1) здійснюється під загальним управлінням з боку Служби електрифікації та електропостачання. Саме вона являється власником процесу. Служба Е

проводить моніторинг та оцінку головного процесу та його підпроцесів; слідкує за належним рівнем якості відпущеної електроенергії (основного продукту); отримує інформацію від постачальників та споживачів процесу; проводить аналіз ходу процесу. Результати моніторингу, а також дані про задоволеність споживачів і дані від постачальників є основою для аналізу результативності та ефективності процесу його власником. За результатами аналізу здійснюються коригуючі дії, а також постійне поліпшення процесу за рахунок запобіжних дій.

Управління процесами здійснюється на основі аналізу надійної інформації. Тому вимірювання показників функціонування процесів є одним з найважливіших завдань системи менеджменту якості. Виміри стосуються показників якості продукції і параметрів процесів, задоволеності споживачів і співробітників, продуктивності, результативності та ефективності процесів, витрат, пов'язаних з реалізацією процесів. На основі проведених вимірів заповнюється відповідна документація, котра свідчить про якість виконання основних процесів та підпроцесів [40], [64].

Система управління, заснована на процесному підході, повинна бути орієнтована на постійне вдосконалення всіх процесів підприємства. Існують два шляхи покращення процесів: безперервне вдосконалення (включає в себе стандартизацію, скорочення часу виконання, поступове підвищення кваліфікації персоналу і т.д.) та вдосконалення за рахунок динамічних нововведень (впровадження новітніх технологій, перепроєктування процесів, значне підвищення кваліфікації персоналу і т.д.). При цьому другий метод вимагає значних капіталовкладень і має високий рівень ризику, проте приводить до різкого зростання показників якості процесу [65].

Практична реалізація процесного підходу в ремонтній службі ЕЧ також припускає розподіл управлінських завдань по трьох рівнях:

- вищий управлінський персонал (керівництво дистанції електропостачання) - власник процесу ТО і ремонту приймає довгострокові стратегічні рішення і відстежує виконання рішень, принципівих з точки зору діяльності усієї організації.
- середній рівень (начальник ЕЧЕ) - керівник процесу реалізує прийняті на вищому рівні рішення шляхом поточного планування і ведення процесу ТО і ремонту з метою досягнення запланованих результатів.
- операційний рівень управління (керівники ремонтних бригад) відповідає за поточний стан справ в ремонтній службі ЕЧ, тобто безпосередньо за ремонт і технічне обслуговування обладнання.

Очевидно, що для максимально ефективної роботи управлінців на кожному з цих рівнів потрібно різні види інформації, яку повинна надавати відповідна інформаційна система (ІС).

Під ІС процесу ТО і ремонту розуміється уся сукупність інформації, циркулююча в ремонтній службі обладнання, породжувана в процесі його діяльності і впливаюча на результати його діяльності. При цьому неважливо, у якому вигляді присутня інформація: в електронному, у формі паперових документів або у вигляді знань і досвіду співробітників. ІС припускає облік усіх типів інформації, присутньої в ремонтній службі в явному або неявному

виді.

Інформація існує незалежно від того, доходить вона до управлінського персоналу або не доходить, сприймається ним або не сприймається [52], [66]. Частина ІС знаходиться під контролем управлінського персоналу і використовується ним для ухвалення рішень. Назвемо таку інформацію *контрольованою*. Деяка частина ІС залишається поза увагою і не піддається аналізу і контролю незалежно від того, знає про неї хтось, і чи звертають на неї увагу при ухваленні рішень. Це область *незатребуваної* інформації.

Відповідно, одним із завдань управління процесом ТО і ремонту обладнання ТП є збільшення долі контрольованої інформації в ремонтній службі підприємства з подальшим її описом.

Друге завдання управління полягає в "підвищенні керованості" процесом ТО і ремонту (ремонтною службою) за рахунок застосування досконалішої методики процесного управління, з обов'язковим дотриманням вимог до її застосування.

Згідно [40], [41], у основі керованості процесу лежить:

- наявність реальних керівників процесу;
- наявність у них усіх необхідних ресурсів;
- наявність документованих процедур (стандартів, методик, інструкцій, технологій) виконання процесу;
- побудова системи збору об'єктивної інформації про хід і параметри процесу, про параметри продукту і задоволеності споживача.

Вирішити управлінські завдання на кожному рівні процесу ТО і ремонту обладнання неможливо без його детального опису і подальшого аналізу. Опис процесу і кожного виду робіт (діяльності, підпроцесу, процесу другого або подальших рівнів або функцій), що входять в нього, повинно відбуватися із застосуванням особливих методик і прийомів графічного зображення процесів, досить добре розроблених і дозволяючих виключити багато помилок.

#### **2.4. Структурно-функціональна модель процесу технічного обслуговування обладнання тягових підстанцій**

Для вирішення завдання підвищення якості управління процесом ТО і ремонту обладнання ТП був виконаний структурно-функціональний аналіз цього процесу на дистанціях електропостачання. В якості лінгвістичного забезпечення для вирішення цього завдання був використаний пакет Міжнародних стандартів моделювання IDEF (Icam Definition), що дозволяє аналізувати процеси з трьох ключових точок зору одночасно, - IDEFO (Integrated Definition for Function Modeling), IDEF3 і DFD (Data Flow Diagram) [67] - [71].

IDEFO — технологія структурного аналізу і проектування. Це мова моделювання, згідно з якою аналізований процес представляється у вигляді сукупності безлічі взаємозв'язаних дій, робіт (Activities), які взаємодіють між собою на основі певних правил (Control), з урахуванням споживаних інформаційних, людських і виробничих ресурсів (Mechanism), що мають чітко певний вхід (Input) і не менш чітко певний вихід (Output).

IDEF3 — технологія збору даних, необхідних для проведення структурного аналізу системи, доповнююча технологію IDEF0. За допомогою цієї технології є можливість уточнити картину процесу, привертаючи увагу аналітика до черговості виконання функцій, підпроцесів — і процесів в цілому. Логіка цієї технології дозволяє будувати і аналізувати альтернативні сценарії розвитку процесів (моделі «Що — якщо?»).

DFD - структурний аналіз потоків даних. Діаграми DFD дозволяють описати процес обміну інформацією між елементами системи, що вивчається. DFD відображає джерела і адресати даних, ідентифікує процеси і групи даних, що зв'язують в потоки одну функцію з іншою, а також, що важливо, визначає накопичувачі (сховища) даних, які використовуються в досліджуваному процесі.

IDEF-моделювання — це спосіб зменшити кількість дорогих помилок за рахунок структуризації процесу на ранніх етапах створення інтелектуальної системи, поліпшення контактів між користувачами і розробниками і згладжування переходу від аналізу до проектування.

Виходячи з положень IDEF- моделювання, складна задача ТО і ремонту була розбита на ряд простих задач, рішення яких дозволило найпростіше впоратися з початковою проблемою. Структурно- функціональне моделювання з виділенням подій робилося по методології IDEF0, опис процесів - за методологією IDEF3, а для побудови діаграм потоків даних використовувався метод DFD.

Загальне представлення процесу ТО і Р електрообладнання ТП представлено на рисунку 2.4 у вигляді діаграми А0. Згідно методології IDEF0, ліва сторона блоків призначена для входів, права – для виходів, нижня – для механізмів, верхня – для керівних факторів. Таке позначення окреслює основні системні принципи: вхідна продукція перетворюється у вихідну, управління системою обмежує або вказує умови виконання перетворень, механізми показують, хто, що і яким чином виконує функції процесів та підпроцесів [64], [56]. Структурно-функціональна модель процесу ТО і Р електрообладнання ТП, розроблена за допомогою методології IDEF, представлена на рисунку 2.5. Вона є деталізованим представленням процесу ТО і Р і включає в себе найважливіші підпроцеси з їх взаємозв'язками, а комірки А1 - А4 нижнього рівня представляють деталізовані процеси ТО і Р з необхідним рівнем конкретизації. На рисунках 2.6 та 2.7 відповідно представлені підпроцеси основного процесу ТО і Р електрообладнання ТП.

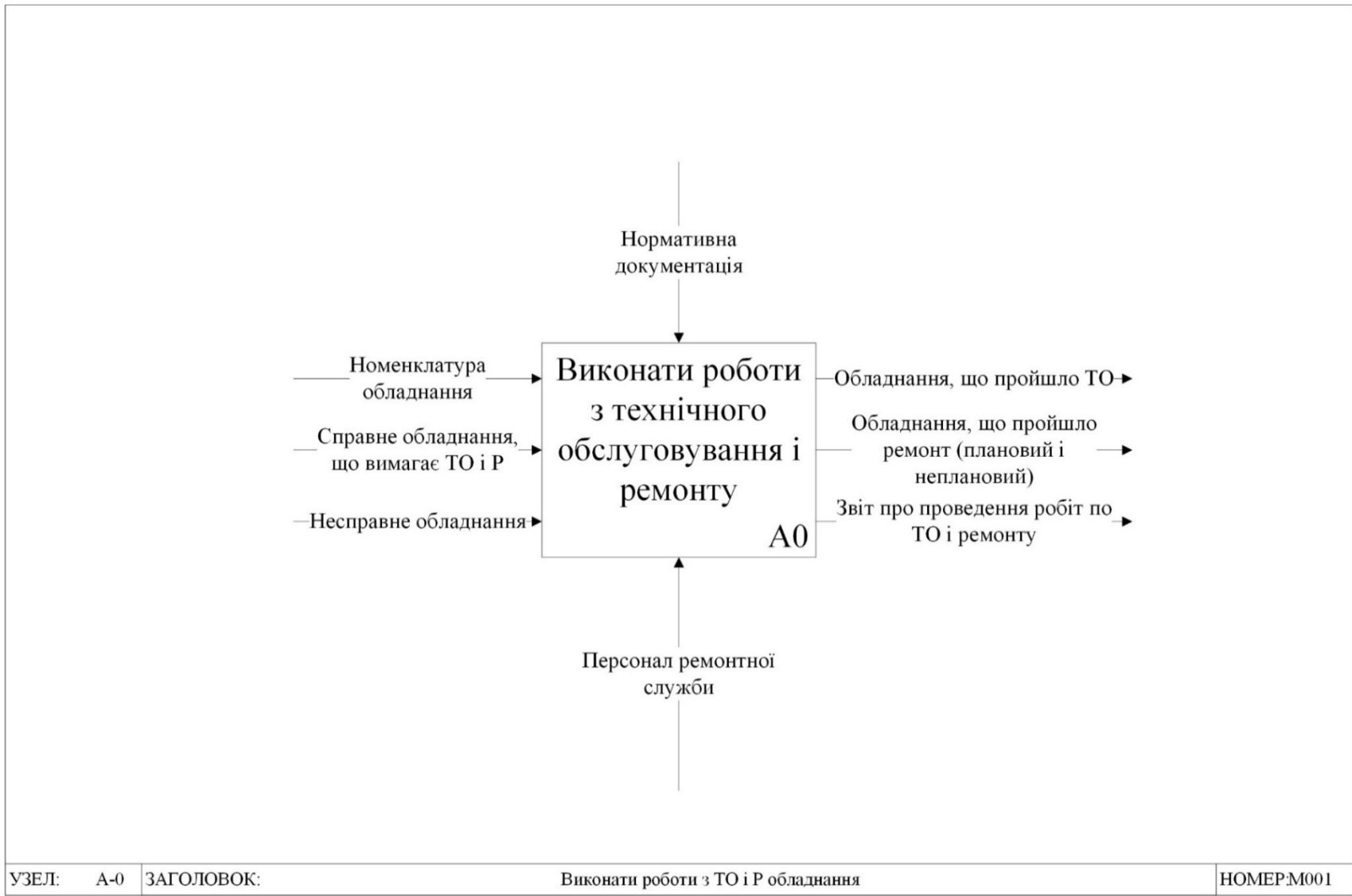


Рисунок 2.4 – Процес ТО і Р електрообладнання ТП

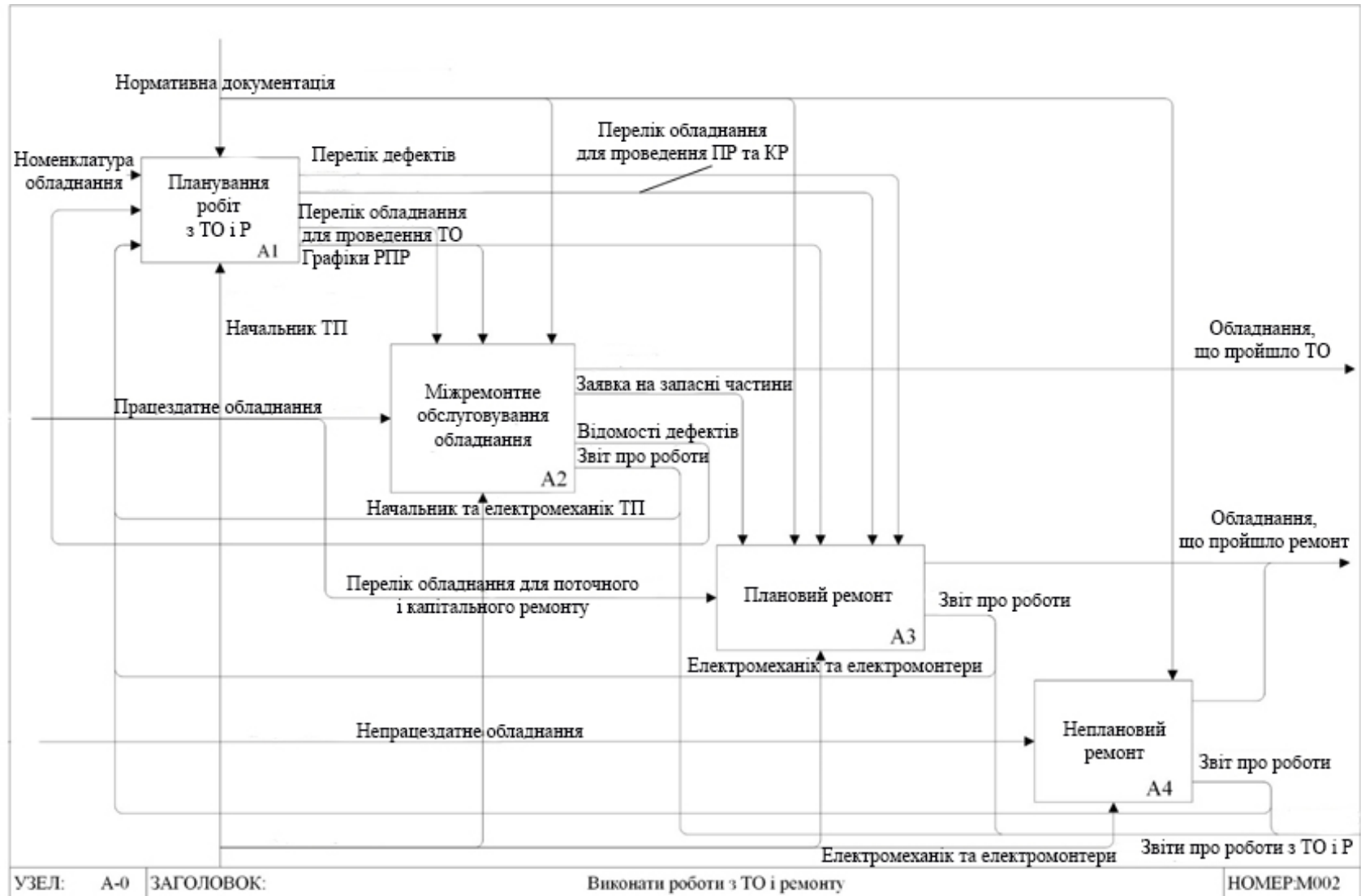


Рисунок 2.5 - Структурно-функціональна модель процесу ТО і ремонту електрообладнання ТП

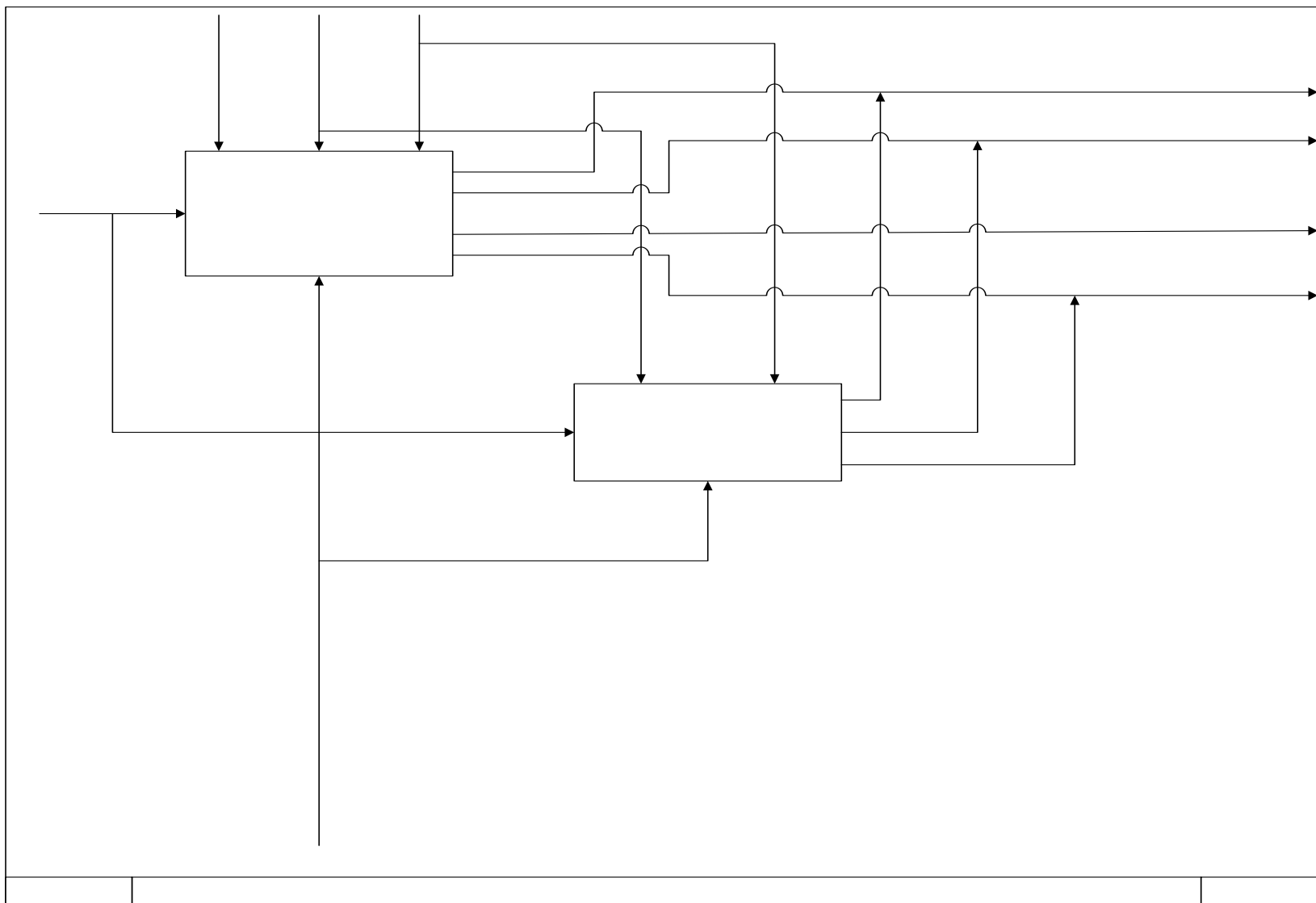


Рисунок 2.6 - Структурно-функціональна модель підпроцесу міжремонтного обслуговування обладнання ТП

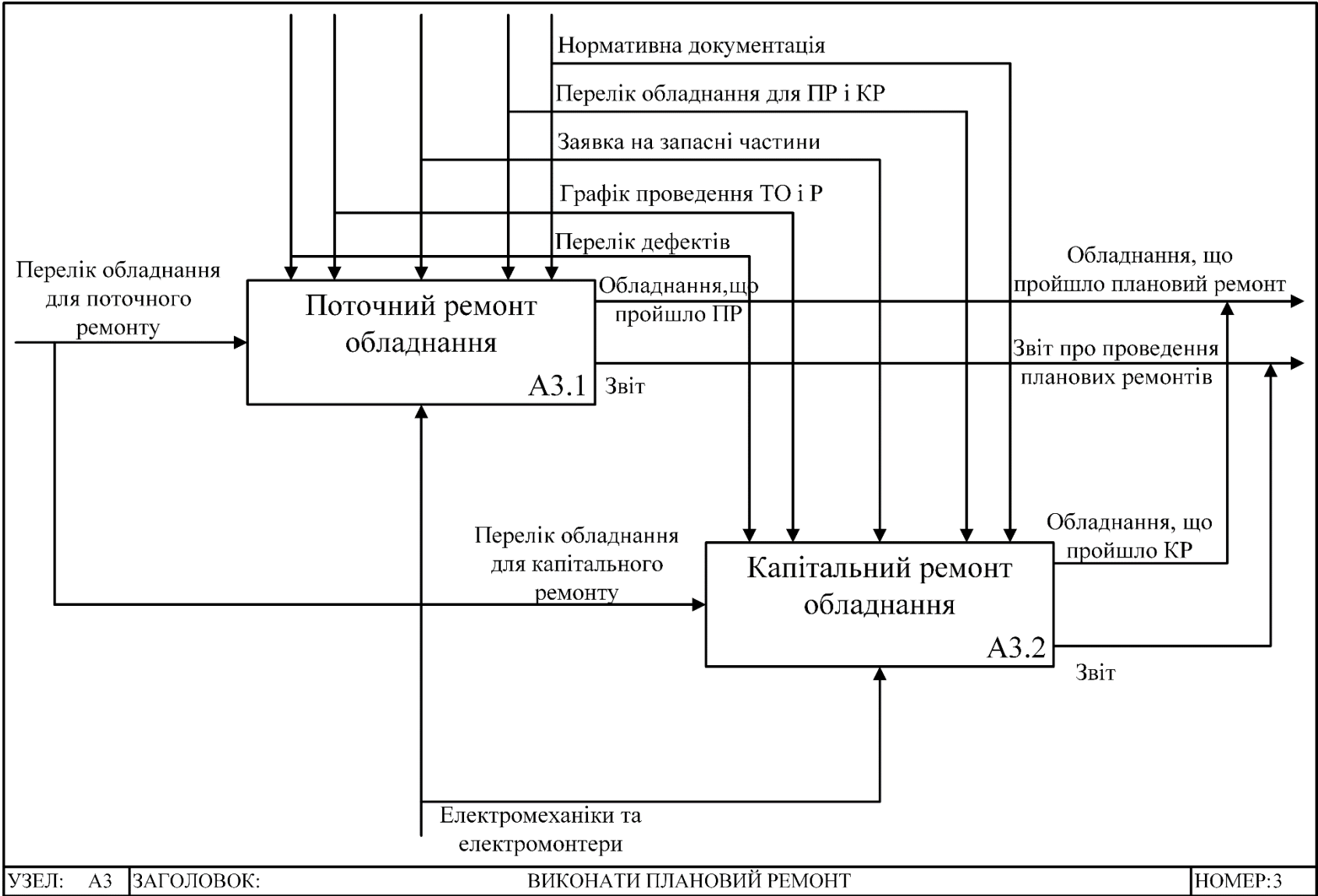


Рисунок 2.7 - Структурно-функціональна модель підпроцесу планового ремонту обладнання ТП

Проведений структурно-функціональний аналіз показує, як функціонує система ТО і Р, та взаємозв'язок між процесами ТО і Р електрообладнання ТП. Список вузлів структурно-функціональної моделі та види робіт, відповідні етапам процесу технічного обслуговування та ремонту електрообладнання ТП, представлений в табл. 2.2. Список вузлів та види робіт, відповідні етапам кожного підпроцесу структурно-функціональної моделі представлено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.2 - Вузли структурно-функціональної моделі процесу ТО і Р електрообладнання ТП

Вузол	Назва підпроцесу ТО і Р електрообладнання ТП
A1	Планування робіт з ТО і Р
A2	Міжремонтне обслуговування електрообладнання ТП
A3	Плановий ремонт електрообладнання ТП
A4	Неплановий ремонт електрообладнання ТП

Таблиця 2.3 - Вузли підпроцесів структурно-функціональної моделі процесу ТО і Р електрообладнання ТП

A1.1	Статистичний аналіз результатів діагностичних обстежень електрообладнання ТП
A1.2	Коригування плану-графіка ППР
A1.3	Планування і розподіл ресурсів для проведення ремонтно-профілактичних робіт
A2.1	Організація технічного обслуговування електрообладнання ТП
A2.2	Виконання діагностичних обстежень електрообладнання ТП
A3.1	Виконання поточного ремонту електрообладнання ТП
A3.2	Виконання капітального ремонту електрообладнання ТП

Продовження табл. 2.3.

A4.1	Виявлення причин відмови електрообладнання ТП
A4.2	Визначення об'єму робіт, виконавців, джерела фінансування
A4.3	Проведення службового розслідування і покарання винних
A4.4	Проведення закупівлі запасних частин і матеріалів
A4.5	Визначення матеріальних і часових ресурсів
A4.6	Формування структури завдання ремонтному підрозділу
A4.7	Виконання аварійного ремонту електрообладнання ТП

Аналіз вузлів структурно-функціональної моделі процесу ТО і Р електрообладнання ТП показує, що найбільша кількість підпроцесів і, відповідно, об'єм робіт включає в себе вузол «Неплановий ремонт обладнання» (рис. 2.8).

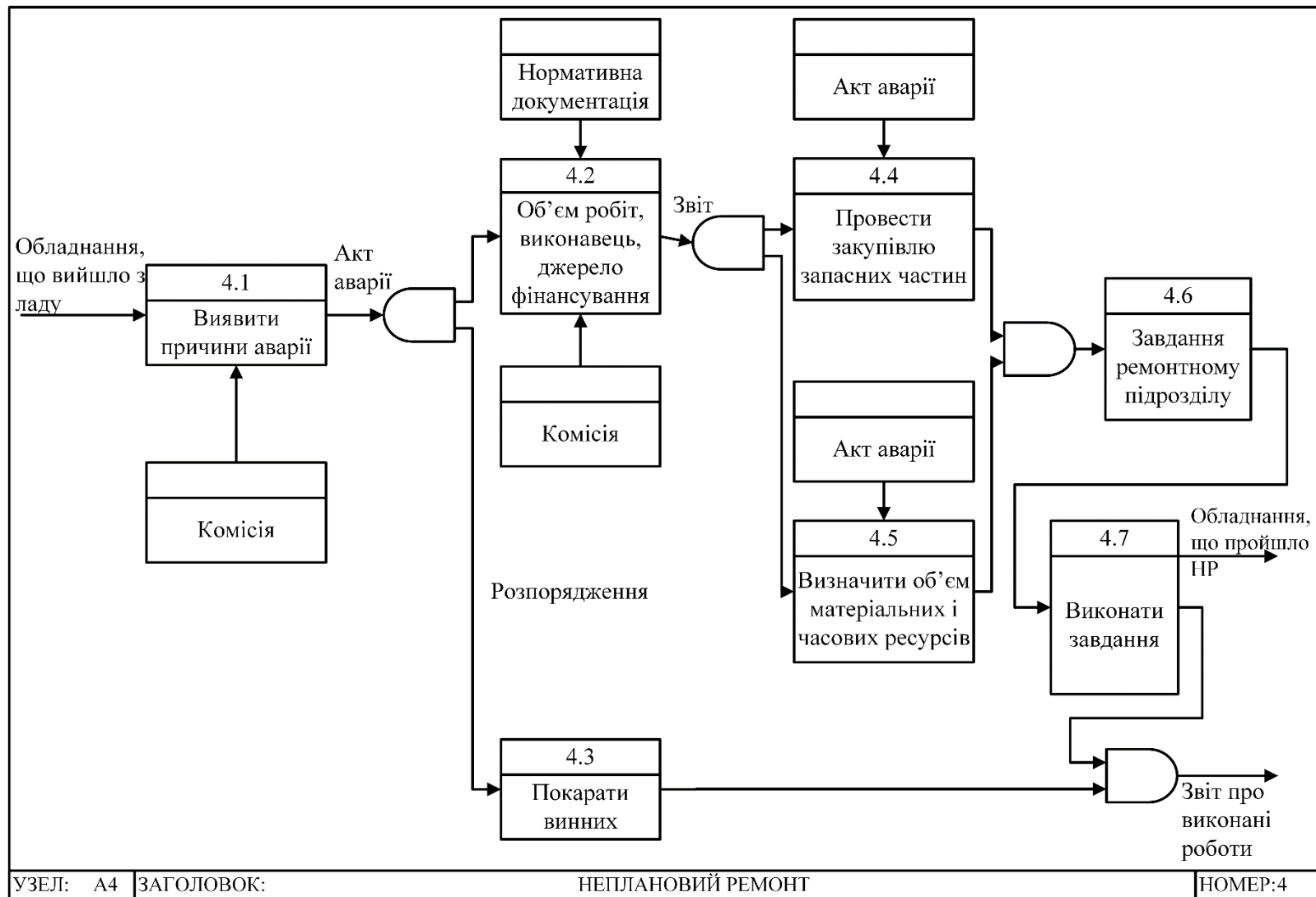


Рисунок 2.8 - Структурно-функціональна модель процесу непланового ремонту обладнання ТП

Неплановий ремонт, викликаний аварією обладнання або не передбачений графіком планово-попереджувальних ремонтів (вузол А4), неминуче призводить до додавання до складу сформованого раніше виробничого завдання термінових, позапланових робіт. При цьому вимагається оперативно визначити матеріало- і трудомісткість майбутніх ремонтних робіт (вузол 4.5), і залежно від результатів оцінки прийняти рішення про закупівлю необхідних матеріалів і деталей (вузол 4.4), що вимагають заміни, або виготовлення їх силами ремонтної служби (вузол 4.6). В цьому випадку керівниками ремонтних підрозділів заново переглядаються терміни і послідовність проведення позапланових ремонтних робіт і запланованих раніше робіт і оперативно призначаються їх виконавці (вузол 4.6). Важливим вузлом даного підпроцесу також являється вузол А4.3 («Проведення службового розслідування і покарання винних»). Він вимагає залучення додаткових людських і часових ресурсів, що несе за собою небажані фінансові затрати. Також необхідно зазначити, що на дистанціях електропостачання, на прикладі яких був виконаний структурно-функціональний аналіз, відсутня комплексна оцінка результативності і ефективності діяльності ремонтної служби, необхідна для впровадження процесного підходу.

### **Висновки до розділу 2**

1. Розроблена узагальнена схема управління процесом ТО і ремонту технологічного устаткування по рекомендованому ISO 9000:2009 циклу PDCA, що включає ієрархічний розподіл управлінських завдань, що дозволяє чітко встановити функції кожного працівника а також дає змогу більш гнучко розподіляти матеріальні, часові та фінансові ресурси для проведення РПР.

3. Виконано структурно-функціональний аналіз процесу ТО і Р електрообладнання і розроблена структурно-функціональна модель процесу. Встановлено, що увагу необхідно приділити підпроцесу непланових аварійних ремонтів електрообладнання ТП, так як він вимагає додаткових фінансових і матеріальних затрат та включає в себе найбільший об'єм ремонтно-профілактичних робіт і, відповідно, найбільшу кількість підпроцесів для виконання.

Основні положення розділу опубліковані в роботах [7, 11].

## РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОГО ПОКАЗНИКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

Для побудови ефективної системи технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій необхідно застосовувати методи контролю технічного стану устаткування, які б дозволяли зменшити витрати часу на проведення ремонтних та діагностичних робіт з дотриманням необхідного рівня безвідмовної роботи обладнання. При цьому дані методи повинні давати змогу оцінити максимально можливий спектр діагностичних показників контрольованого обладнання для більш точної постановки діагнозу [72] - [75].

Забезпечення контролю, експертизи, нормування та моніторингу технічного стану енергетичного обладнання, використання інноваційних технологій діагностування є основою стратегії підвищення ефективності системи діагностування [3], [11], [76]-[78]. Сучасне енергетичне обладнання представляє собою складні технічні об'єкти, надійність роботи яких повинна забезпечуватися, прогнозуватися і діагностуватися на всіх етапах життєвого циклу. Для електрообладнання принципово важливо визначити, які параметри контролювати і які чинники враховувати при оцінці його технічного стану, тобто вирішити питання про глибину діагностування [79], [80]. Як відомо, при оцінці технічного стану аналізу підлягають механічні (вібраційні), теплові, електричні і інші чинники, що мають різну фізико-хімічну природу. При цьому згадані чинники призводять до зміни окремих властивостей електроустаткування [81], [82]. У цьому випадку оцінка технічного стану за окремими властивостями електрообладнання виконується більш менш задовільно. Проте загальна оцінка технічного стану пристрою надзвичайно ускладнена через необхідність зіставлення показників різної фізичної природи і відсутності між ними взаємозв'язку, який можна описати аналітичним виразом [83]. Ця проблема примушує шукати інший підхід до загальної оцінки технічного стану електрообладнання. Для адекватної оцінки якості експлуатаційних показників енергетичного обладнання необхідно користуватися узагальненими характеристиками їх роботи, в тому числі і визначеними на основі методів теорії нечітких множин.

### 3.1. Аналіз методів багатофакторної оцінки об'єктів

Одним із основних понять нечіткої логіки є поняття функції приналежності нечіткої множини. Відомо безліч методів побудови функції приналежності на основі експертної інформації. Їх детальний огляд і класифікацію можна знайти, наприклад, в роботі [84]. З сучасним станом цього питання можна ознайомитися, зокрема, за допомогою роботи [85].

Серед експертних методів побудови функції приналежності прийнято виділяти дві групи: прямі і непрямі. Прямі методи характеризуються тим, що експерт безпосередньо задає правила визначення значень функції приналежності  $\mu_A(x)$  для нечіткої множини  $A$ , що задає формалізуючі поняття для кожного елемента області визначення  $X$ . Як правило, прямі методи використовуються в тих випадках, коли шуканий параметр характеризується розмірними властивостями (висота, об'єм, швидкість і тому

подібне).

Непрямі методи побудови функції приналежності засновані на розбитті задачі визначення ступені приналежності  $\mu A(x)$  для кожного елементу області визначення на ряд простіших підзадач і можуть використовуватися у тому числі і у випадках, коли елементарні виміряні властивості відсутні. Вони більш трудомісткі, ніж прямі, але їх перевага полягає в стійкості до випадкових помилок в результатах експертного опитування і порушень внутрішньої узгодженості суджень експерта. Найбільшої популярності серед непрямих методів набули метод парних порівнянь, запропонований Т. Сааті в [86]; метод множин рівня, запропонований Р. Ягером в статті [87] і методика теорії нечітких множин, заснована на об'єднанні різнопланових показників в узагальнений показник [88].

### 3.1.1. Метод аналізу ієрархій Т. Сааті

Сутність методу полягає в наступному. Чинники порівнюються між собою попарно один відносно одного за їх впливом на кінцевий показник. При цьому вплив інших чинників не враховується. Для попарного порівняння чинників автором методу Сааті запропонована спеціальна оцінна шкала, що складається з п'яти основних і чотирьох проміжних суджень. У ній судження експертів представляються таким чином (таблиця. 3.1):

Таблиця 3.1 - Ієрархія експертних порівнянь чинників

Судження	Пояснення
1. Рівна важливість	Рівний вклад чинників в мету
2. ...	Проміжне судження
3. Помірна перевага	Досвід і судження дають легку перевагу одного чинника над іншим
4. ...	Проміжне судження
5. Істотна перевага	Сильна перевага одного чинника над іншим
6. ...	Проміжне судження
7. Значна перевага	Є майже значна перевага одного чинника над іншим
8. ...	Проміжне судження
9. Дуже сильна перевага	Є значна перевага одного чинника над іншим

У результаті результати парних порівнянь представляються у вигляді квадратної матриці  $A = (a_{ij})$  з одиничною діагоналлю (порівняння чинника самого з собою дорівнює одиниці). Тут  $a_{ij}$  означає відношення оцінок відповідних елементів; індекси  $i$  і  $j$  змінюються від одиниці до величини, рівної кількості чинників. Оскільки при послідовному переборі усіх можливих пар чинники порівнюються між собою двічі (спочатку - чинник  $a_i$  з чинником  $a_j$ , потім - в зворотному порядку), при складанні матриці повинна виконуватися умова "зворотної симетричності":

. З цього виходить, що досить заповнювати тільки одну частину матриці - вище або нижче діагоналі, що не має принципового значення внаслідок елементарного перерахунку взаємно зворотних значень. Якщо

розглядається  $n$  чинників, то усього можлива наявність значущих поєднань.

У МАІ для кодування використовується номер відповідного рядка таблиці. 1. Кожне з приведених суджень кодується числом від 1/9 до 9. Наприклад, якщо надана істотна перевага елементу  $A_i$  (наприклад, кількість комутацій вимикача) над елементом  $A_j$  (наприклад, довжина вимикаючих пружин), то вважають, що в матриці парних порівнянь  $a_{ij} = 5$  і відповідно  $a_{ji} = 1/5$ , оскільки для кодування використовується п'ятий рядок.

Сутність обробки матриці полягає в розкладанні: , де

. Мета - визначення компонент вектору пріоритетів  $Z = (z_1, \dots, z_n)$ , що дозволяє ранжувати чинники  $A_i$ .

Обчислення пріоритетів можна здійснити декількома способами. Одним з можливих підходів до апроксимації вектору пріоритетів може служити спосіб обчислення власного вектору матриці парних порівнянь, який дорівнює відповідному максимальному власному числу. Відповідні алгоритми знаходження власного вектору досить детально розроблені, і опис їх можна знайти в монографіях [89], [90] і в іншій літературі [91].

Процедура МАІ має вбудований критерій якості роботи експерта - індекс узгодженості (ІУ), який дає інформацію про ступінь порушення чисельної (кардинальної) і транзитивної (порядкової) узгодженості експертних суджень. Перевірка на кардинальність полягає в контролі за певними числовими характеристиками, відхилення від яких свідчить про наявність помилок при формалізації експертних суджень. Іншими словами, якщо прийняті деякі правила кодування експертних суджень, наприклад, від нуля до одиниці, то експертні судження не повинні виходити за рамки встановлених цими правилами множини значень, тобто бути від'ємними або більше одиниці. Транзитивність дозволяє перевірити логіку мислення експерта. Якщо експерт вважає, що чинник А перевершує чинник Б, а чинник Б, у свою чергу, перевершує чинник В, то при парному порівнянні чинник В не повинен перевершувати чинник А, тобто повинна виконуватися нерівність  $A > B > V$ . Відсутність узгодженості може бути серйозним обмежуючим чинником для дослідження деяких проблем.

ІУ обчислюється таким чином. Разом з матрицею парних порівнянь можна отримати міру оцінки ступеню відхилення від узгодженості. ІУ в кожній матриці і для усієї ієрархії можна приблизно оцінити, використовуючи формулу

де  $\lambda$  - власне число,  $n$  - число порівнюваних чинників.  $I_U$  порівнюється з величиною, отриманою при випадковому виборі кількісних величин, яка трактується як середня. Середні узгодженості ( $S_U$ ) для випадкових матриць різного порядку приведені в таблиці 3.2, де  $n$  - число чинників.

Таблиця 3.2 - Середні узгодженості ( $S_U$ ) для випадкових матриць різного порядку

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_U$	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Якщо розділити  $I_U$  на  $S_U$  для матриці того ж порядку, то отримаємо відношення узгодженості ( $B_U$ ):

Якість експерта оцінюється за величиною  $B_U$ . Щоб бути прийнятною, величина  $B_U$  рекомендується близько 10% або менше. В деяких випадках, коли розглядається складна і залежна від великої кількості чинників система, можна встановити верхню межу, рівну 20%, але не більше. Якщо  $B_U$  виходить за ці межі, то результати роботи таких експертів рекомендується виключити з розгляду.

Метод МАІ має наступні позитивні переваги:

- 1) На перший погляд, здається, що МАІ - ідеальний інструментарій для вирішення широкого кола багатофакторних завдань, в яких експертні методи використовуються як ключові.
- 2) Попарність порівнянь - порівняння критеріїв по парам закладене в самій людській природі [92]. Відсутність необхідності постійно тримати в полі зору усі чинники або, принаймні, групу однорідних чинників, дозволяє експертові сконцентрувати увагу на конкретній проблемі: наскільки чинник  $A_i$  перевершує чинник  $B_j$  або поступається йому. Внаслідок цього слід чекати точніших результатів.
- 3) Змінюваність початкової матриці - у практиці досліджень систем нерідко виникають ситуації, коли число впливаючих чинників змінюється. Це відбувається як внаслідок циклічності природних процесів, так і внаслідок зміни соціально-економічних умов. Тоді доводиться додавати, зменшувати або замінювати одні чинники іншими. При використанні МАІ це приводить тільки до необхідності порівняння знову виникших пар або ж до викреслювання рядків і стовпців матриці парних порівнянь, відповідно вилучених з розгляду чинників, до утворення мінору матриці. Отримані результати попередніх опитувань зберігаються, і повне оновлення анкети, як це відбувається в інших випадках, не потрібно. З урахуванням того, що процедура МАІ, по суті, зводиться до пошуку власного вектору відповідної матриці, що належить максимальному власному значенню, з "технічної" точки зору включення додаткових чинників є збільшенням розмірності відповідного лінійного простору за рахунок додавання прямих доданків.
- 4) Вбудований критерій якості роботи експерта - за результатами опитування експерти, як правило, підлягають перевірці. Для цього зазвичай застосовуються різні числові індекси, розроблені як для групових, так і для індивідуальних опитувань. При цьому питання про оптимальний критерій є

відкритим, а його вибір довільний. У цьому сенсі наявність в МАІ такої характеристики (параметра), як відношення узгодженості, дуже зручне, особливо при створенні автоматизованого програмно-апаратного комплексу.

Проте не усі переваги МАІ такі очевидні. Виникає низка запитань при інтерпретації результатів і пов'язані вони, передусім, з критерієм якості роботи експерта - з відношенням узгодженості:

1) Використання транзитивності для якісних показників - відношення транзитивності добре працює, коли усі характеристики досліджуваної системи можна представити числовими величинами. Але як тільки це стає неможливим, вимога наявності транзитивності частенько вступає в протиріччя з логікою дослідника. Проілюструємо сказане на прикладі, який можна зустріти в процесі діагностування технічного стану електрообладнання. Нехай експертові поставлено завдання оцінити відповідність діагностичних параметрів нормативним: площа прилягання головних контактів вимикача, кількість комутацій і наявність підгарів. Перші два параметри можна в результаті порівняння виразити у числовому вигляді, третій же показник є якісним показником, який не піддається числовій оцінці.

2) "Зворотна" логіка - критерії якості роботи експерта у більшості своїй - і відношення узгодженості теж - ґрунтуються на відхиленні від деякої статистичної характеристики, наприклад, математичного очікування. Як і усі критерії, що мають в основі статистичний характер, відношення узгодженості є формальним і в деяких випадках призводить до результатів, що важко інтерпретуються.

3) Неодноразово доводиться стикатися з такою проблемою. Аналізуючи результати опитувань експертів, які потрапляли в межі заданого рівня якості ( $VU < 10-20\%$ ), практично завжди виявляється декілька випадків, коли вагові коефіцієнти різко відрізняються від більшості, а то і носять прямо протилежний характер: ті чинники, яким більшість надавала найбільшу значущість, ці експерти оцінювали як менш значимі, і - навпаки. При усереднюванні результатів усіх експертів, що відповідають заданому критерію, що зазвичай роблять для отримання узагальнених оцінок, це призводить до зміщення середніх значень вагових коефіцієнтів.

4) Що таке "ідеальний експерт"? - відношення узгодженості засноване на порівнянні результатів цього експерта з деяким ідеальним експертом - таблицею. 3.2. Проте, що таке ідеальний експерт в МАІ, не зовсім зрозуміло.

Метод аналізу ієрархій є досить якісною процедурою для знаходження вагових коефіцієнтів впливаючих чинників при аналізі систем. Проте критерій відбору експертів, що входить до його складу, щонайменше, потребує підключення додаткових процедур з відповідними алгоритмами, що вимагають спеціального вивчення. А неможливість достатньо точної оцінки якісних показників змушує використовувати інші методи багатofакторного аналізу

### **3.1.2. Метод множин рівня Р. Ягера**

У 1982 р. Р. Ягером в статті [87] був запропонований ще один непрямий метод побудови функції приналежності - метод множин рівня. Проте, за час свого існування запропонований метод так і не набув широкої популярності. У

зарубіжних публікаціях він, як правило, згадується нечасто, лише в якості одного з можливих методів побудови функції приналежності [93], [94]; можна виділити роботи [95]-[97], де висвітлюються питання практичного застосування цього методу.

Слід зазначити, що на відміну від методу парних порівнянь Сааті, важливою частиною якого є формальна, теоретично обґрунтована процедура оцінки узгодженості суджень експерта (що може служити певною мірою довіри до отриманих значень мір приналежності), для методу множин рівня така процедура, очевидно, відсутня. У початковій роботі Р. Ягера міститься лише згадка про те, що "якщо неузгодженість буде дуже велика, то можна просити людину переглянути свій вибір, повідомивши його про результати розрахунків" [87]. Таким чином, достовірність результатів, що отримуються за допомогою методу множин рівня, не контролюється у рамках самого методу і визначається в основному мірою компетентності і сумлінності експерта, а також рівнем його уважності при винесенні суджень. Метод використовує поняття множини  $X$  - рівня (  $\alpha$ -зрізу) нечіткої множини. Множиною  $A$  - рівня нечіткої множини  $X$  називається чітка підмножина  $A$  універсальної множини (області визначення)  $X$ , усі елементи якого належать нечіткій множині  $X$ , з ступенем, не меншим  $\alpha$  :

Позначимо  $A_\alpha$ , і припустимо, не порушуючи зв'язку, що

Значення  $\alpha$  є шуканими. Метод множини рівня ґрунтується на наступному стохастичному експерименті: спочатку випадковим чином вибирається значення  $a_j$ , потім, також випадково, елемент  $x_j$  відповідної множини  $X$  - рівня. Ймовірність вибору конкретного елемента  $x_j$  в цьому експерименті позначимо через  $P(x_j)$ . Зв'язок значень  $P(x_j)$  і  $a_j$  визначається таким чином:

Очевидно, що  
 Перетворюючи цю систему, отримуємо:

Тим самим, для обчислення шуканих значень  $a_j$  необхідно якимсь чином оцінити значення  $P(x_j)$ . Для оцінки можна використати наступний підхід. Нехай на відрізку  $[0, 1]$  заданий кінцевий набір  $x_1, x_2, \dots, x_k$  різних значень рівня  $y$ . Позначимо через  $k_i$  число елементів, що належать множині рівня  $y$ .

Тоді використану в описаному вище експерименті ймовірність можна оцінити таким чином:

звідки (по формулі повної ймовірності) :

де підсумовування ведеться по тих значеннях  $i$ , при яких

З урахуванням цього, приходимо до наступного алгоритму знаходження значень степеню приналежності  $a_j$ .

1. С кожним елементом  $x_j$  області визначення зв'язується величина  $T_i$ , спочатку рівна нулю.
2. Визначається об'єм вибірки  $M$  (значення  $M$  не має бути дуже малим).
3. На відрізьку  $[0, 1]$ , починаючи з його правої межі, вибираються  $M$  рівновіддалених точок, множини яких позначатимемо через  $S$ . Наприклад, якщо  $M = 25$ , то  $S = \{1; 0,96; 0,92; \dots; 0,08; 0,04\}$ .
4. Випадковим чином без з множини  $S$  вибирається елемент
5. Експерт відповідає на питання, які елементи  $x_j$ , на його думку,

належать множині рівня  $\mu_A(x_j)$  шуканої нечіткої множини  $A$ , тобто мають міру приналежності, не меншу  $\mu_A(x_j)$ .

6. Якщо елемент  $x_i$  був включений експертом у множини рівня  $\mu_A(x_j)$ , побудовану на етапі 5, то

де  $k_i$  - загальне число елементів, включене експертом в цю множини.

7. Етапи 4-6 повторюються до тих пір, поки множини  $S$  не виявиться порожньою.

8. Для усіх  $x_j$  обчислюються оцінки  $P(x_j)$  по формулі  $P(x_j) = T_j / M$ .

9. Елементи  $x_j$  переупорядковуються так, щоб виконувалося співвідношення

10. Визначаються значення  $a_j$  мір приналежності елементів  $x_j$  нечіткій множині  $A$ .

У роботі [87] відзначається, що ця методика "прийнятніша в емоційному плані, ніж процедура прямого призначення мір приналежності". Очевидно, автор має на увазі, що людині психологічно простіше визначити приналежність елементу до ряду множини рівня, чим назвати міру його приналежності до нечіткої множини.

Порівняно з іншими непрямими методами визначення функції приналежності, метод множини рівня цікавий тим, що він не вимагає апріорного введення яких-небудь аксіом і припущень відносно порівнюваних за приналежністю нечіткій множині елементів області визначення. Наприклад, згадуваний раніше метод парних порівнянь Сааті виходить з передумови, що порівнювані елементи пов'язані мультиплікативним відношенням, тому

застосування цього методу стає неможливим в тих випадках, коли немає підстав припускати наявність такого відношення. Тим самим, метод множин рівня є в цьому плані більше універсальним.

Добре відомо, що з визначення множини рівня явним чином виходить властивість монотонності таких множин відносно вкладеності:

Проте у рамках даного методу до експерта не пред'являються вимоги, згідно з якими його судження мають бути погоджені з цією умовою. У початковій роботі також відзначається, що навіть у разі наявності неузгодженості в судженнях експерта метод "все одно приведе до визначення мір приналежності" [87]. При цьому, як вже відзначалося раніше, в роботі не представлено ніякої методики оцінки узгодженості суджень, а також міркувань про те, в яких випадках міру неузгодженості можна вважати достатньою для того, щоб вона служила підставою для перегляду і коригування експертних суджень.

Враховуючи недоліки описаних методів детально розглянемо методику побудови часткової та узагальненої функції бажаності, запропонованої Р. Харінгтоном, яка цих недоліків не має.

### **3.1.3. Узагальнена та часткова функція бажаності Харінгтона**

При аналізі технічного стану енергетичного обладнання одним з найбільш зручних для практичного використання методів математичного моделювання є, зокрема, методика теорії нечітких множин, заснована на об'єднанні часткових показників якості в узагальнений - в так звану узагальнену функцію бажаності (функцію Харінгтона) [88], [98]-[102].

Для побудови узагальненої функції бажаності пропонується перетворити виміряні значення різних критеріїв у безрозмірну шкалу бажаності [88], [100]. Шкала бажаності, в яку перетворюються значення часткових критеріїв, є безрозмірною психофізичною шкалою. Вона встановлює відповідність між значеннями критеріїв у фізичних шкалах і психофізичними параметрами – суб'єктивними оцінками бажаності того чи іншого значення відповідного критерію. Шкала влаштована так, що кращому значенню критерію відповідає більше значення бажаності. Для перетворення значень критерію в шкалу бажаності, множина значень кожного критерію поділяється на підмножини, щодо яких дослідник може сказати, що якість об'єкта на кожному з них близька до оцінки "добре", "задовільно", "погано" (градацій може бути і більше).

Побудова шкали бажаності, яка встановлює співвідношення між значенням критерію  $u$  і відповідним йому значенням  $d$  (частковою функцією бажаності), є суб'єктивною і відображає ставлення дослідника до окремих критеріїв [103].

Для побудови шкали бажаності зручно використовувати метод кількісних оцінок з інтервалом значень бажаності  $d$  від нуля до одиниці, хоча можливі й інші варіанти шкали. Значення  $d = 0$  (або  $D = 0$ ) відповідає найгіршому значенню критерію, а  $d = 1$  ( $D = 1$ ) – найкращому значенню, причому подальше поліпшення критерію або неможливе, або не представляє інтересу. Проміжні значення бажаності і відповідні їм числові значення наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Базові позначки шкали бажаності

Кількісна відмітка на шкалі бажаності	Бажаність значення критерію
0,80 - 1,00	Дуже добре
0,63 - 0,80	Добре
0,37 - 0,63	Задовільно
0,20 - 0,37	Погано
0,00 - 0,20	Дуже погано

Найпростішим типом перетворення служить таке, в якому існує верхня і (або) нижня межа значень критерію, причому ці межі є єдиними і не допускають змін. Поза цими межами значення  $d$

Часткова функція бажаності при односторонньому обмеженні має вигляд:

(3.1)

Аналогічним чином можна отримати часткову функцію бажаності, якщо задано обмеження критерію зверху.

Якщо для даного параметру існує двостороннє обмеження, то:

(3.2)

Приклади функцій бажаності для одностороннього та двостороннього обмеження критерію зображено на рисунках 3.1, 3.2.

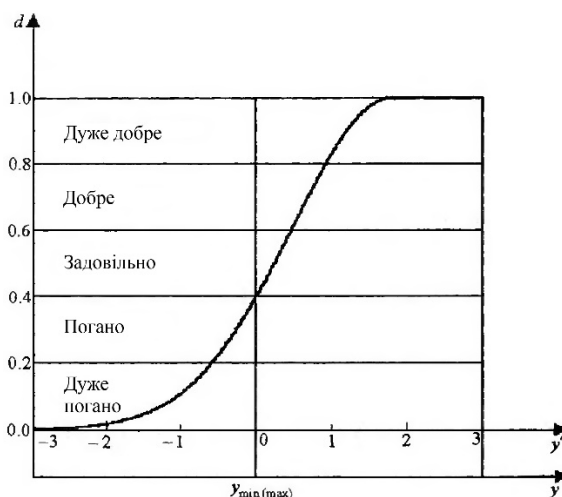


Рисунок 3.1 – Функція бажаності для критерію, обмеженого з однієї сторони

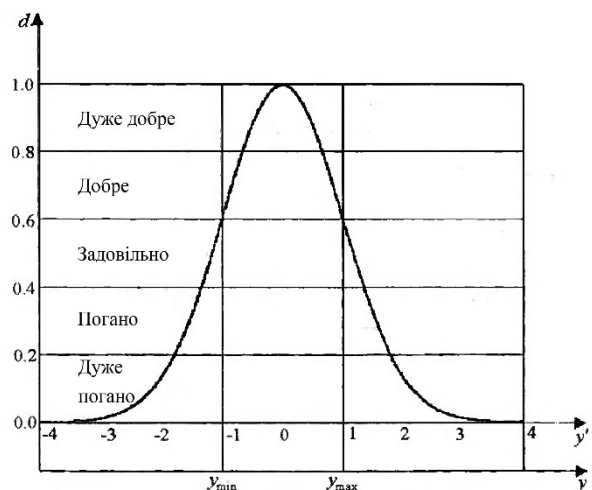


Рисунок 3.2 – Функція бажаності для критерію, обмеженого з двох сторін

Завжди бажано, щоб значення відгуку знаходилося не тільки між граничними значеннями, але і на певній відстані від них через властиві виробничому процесу випадкові коливання. Для двостороннього обмеження перетворення виміряного критерію  $y$  в шкалу  $d$  виконується за допомогою

виразу:

$$\text{де } n - \text{ додатнє число, не обов'язково цїле;} \quad (3.3)$$

(3.4)

Показник ступеня  $n$  можна обчислити, задавши виміряному значенню  $y$  відповідне значення бажаності, переважно в інтервалі  $0,6 < d' < 0,9$  за формулою:

(3.5)

Для односторонніх обмежень виду  $y < d$  або  $y > d$  більш зручною формою перетворення  $y$  в  $d$  служить інша експоненціальна залежність:

(3.6)

де  $d$  - часткова функція бажаності, а  $y$  обчислюється за формулою:

(3.7)

Коефіцієнти  $k_i$  можна визначити, якщо задати для двох значень  $y$  відповідні значення бажаності, переважно в інтервалі  $0,2 < d < 0,8$ .

Маючи кілька критеріїв, перетворених в шкалу бажаності  $d$ , можна ввести узагальнений показник якості процесу  $D$ , як згортку часткових функцій бажаності. У термінах цієї шкали можна сконструювати середню геометричну згортку:

(3.8)

де  $n$  – число аналізованих параметрів;  
 $w_i$  – вагові коефіцієнти, які вказують на значимість часткових критеріїв:

Для  $D$  пропонується скористатися методом часткових статистик [104]-[106]. Даний метод дозволяє отримати значення вагових коефіцієнтів на основі статистики по частковим критеріям  $d_i$ . Для цього розраховуються оцінки середнього квадратичного відхилення по кожному критерію

(3.9)

Для обчислення використовується співвідношення

(3.10)

Число аналізованих параметрів систем або об'єктів, які підлягають оцінці та порівнянню шляхом використання функції бажаності, може бути неоднаковим. Це дозволяє порівнювати узагальнені коефіцієнти навіть тоді, коли відсутні частина параметрів або їх значення. Корінь  $n$ -го ступеню «згладжує» виникаючі відхилення, а отриманий результат дозволяє оцінювати об'єкт (систему) досить точно. При цьому, якщо який-небудь один відгук є абсолютно незадовільним, узагальнена функція бажаності  $D$  повинна дорівнювати нулю, незалежно від значення інших відгуків.

### 3.2. Побудова узагальненого показника технічного стану електрообладнання тягових підстанцій

На прикладі швидкодіючого вимикача постійного струму типу ВАБ-43 було виконано оцінку технічного стану шляхом використання функції бажаності. Зроблено припущення, що залежність між контрольованим параметром та відповідною йому частковою функцією бажаності лінійна. Тобто, гранично допустимому значенню параметра відповідає найменший рівень бажаності, а найкращому значенню параметра – найбільше значення бажаності

. Види контрольованих параметрів та межі їх припустимих значень визначено згідно з [22]. При цьому одностороннє обмеження мають наступні контрольовані параметри:

- площа прилягання головних контактів – не менше 70%;
- площа прилягання якоря до магнітопроводу – не менше 70%;
- комутаційний ресурс в залежності від кількості відключень – не більше 80 циклів;
- комутаційний ресурс в залежності від сумарного відключеного струму – не більше 1000 кА.

Двостороннє обмеження накладається на такі контрольовані параметри:

- натискання головних контактів – кгс;
- натискання дугогасних контактів – кгс;
- провал головного контакту ( $\delta_1$ ) – мм;
- провал дугогасного контакту ( $\delta_2$ ) – мм;
- зазор між дугогасним контактом і рогом ( $\delta_6$ ) у переддвімкненому положенні – мм;
- зазор між головними контактами ( $\delta_7$ ) – мм;

- зазор між рухомим контактом та упором ( $\delta 8$ ) – мм;
- сумарний зазор між шийками осі і торцями пазів у важелі якоря ( $\delta 3$ ) – мм;
- вільний хід тяги блок-контактів ( $\delta 10$ ) – мм;
- натяг вимикаючих пружин – кгс;
- довжина вимикаючих пружин у ввімкненому положенні вимикача – мм.

Для односторонніх обмежень до контрольованих параметрів виду , перетворення значень контрольованих параметрів в частковій бажаності виконувалося за виразом (3.6). Для визначення коефіцієнтів і , які входять до виразу (3.7), з врахуванням лінійної залежності між та було встановлено наступні співвідношення: гранично допустимому значенню контрольованого параметра згідно з [22] відповідає рівень бажаності, рівний 0,37 (“погано”), а найкращому – найбільше значення бажаності 0,8 (“дуже добре”) (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 - Базові значення функцій бажаності і відповідні значення контрольованих параметрів

Вид контрольованого параметра	Значення контрольованого параметра	Значення часткової функції бажаності	Бажаність значення параметра
Комутаційний ресурс в залежності від кількості відключень , шт.	0 80	0,8 0,37	добре погано
Комутаційний ресурс в залежності від сумарного відключеного струму , кА	0 1000	0,8 0,37	добре погано
Площа прилягання головних контактів , %	100 70	0,8 0,37	добре погано
Площа прилягання якоря до магнітопроводу , %	100 70	0,8 0,37	добре погано

Відповідно до (3.6) маємо:

звідси ;

звідси

Система рівнянь, що визначає коефіцієнти і для площі прилягання головних контактів , має вигляд:

В результаті розв'язання даної системи отримаємо

Аналогічно за даними табл. 3.2 визначено коефіцієнти  $i$  для комутаційного ресурсу в залежності від кількості відключень, від сумарного відключеного струму та для площі прилягання якоря до магнітопроводу.

В результаті отримано залежності часткових функцій бажаності від нормативних значень контрольованих параметрів вимикача:

$$(3.11)$$

$$(3.12)$$

$$(3.13)$$

$$(3.14)$$

При наявності двосторонніх обмежень для контрольованих параметрів виду перетворення значень контрольованих параметрів в частковій бажаності виконувалося за виразом (3.3). Для визначення показника ступеню, який входить до виразу (3.3), з врахуванням лінійної залежності між значенням контрольованого параметра та значенням часткової функції бажаності встановлені наступні співвідношення: гранично допустимому значенню контрольованого параметра ( $\dots$ ) надається значення бажаності, рівне 0,37, а найкращому – 0,8 (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 - Базові значення функцій бажаності і відповідні значення контрольованих параметрів

Вид контрольованого параметра	Значення контрольованого параметра	Значення часткової функції бажаності	Бажаність значення параметра
Натискання головних контактів, кгс	35 25	0,8 0,37	добре погано
Натискання дугогасних контактів, кгс	12,5 5	0,8 0,37	добре погано

Провал головного контакту ( $\delta_1$ ) мм	1,75 0,5	0,8 0,37	добре погано
Провал дугогасного контакту ( $\delta_2$ ) , мм	2,25 1,0	0,8 0,37	добре погано
Зазор між дугогасним контактом і рогом ( $\delta_6$ ) у передввімкненому положенні, мм	3,5 2	0,8 0,37	добре погано
Зазор між головними контактами ( $\delta_7$ ) , мм	19 12	0,8 0,37	добре погано
Зазор між рухомим контактом та упором ( $\delta_8$ ) , мм	2,5 1	0,8 0,37	добре погано
Сумарний зазор між шийками осі і торцями пазів у важелі якоря ( $\delta_3$ ) , мм	4,5 1	0,8 0,37	добре погано
Вільний хід тяги блок-контактів ( $\delta_{10}$ ) , мм	2 2,5	0,8 0,37	добре погано
Натяг вимикаючих пружин кгс	40 10	0,8 0,37	добре погано
Довжина вимикаючих пружин у ввімкненому положенні вимикача , мм	200 195	0,8 0,37	добре погано

Визначимо коефіцієнт для натискання головних контактів за виразом (3.5), попередньо визначивши коефіцієнт за виразом (3.4):

Аналогічно за даними табл. 3.3 визначимо коефіцієнт для натискання головних контактів , натискання дугогасних контактів , провалу головного контакту ( $\delta_1$ ) , провалу дугогасного контакту ( $\delta_2$ ) , зазору між дугогасним контактом і рогом ( $\delta_6$ ) у передввімкненому положенні, зазору між головними контактами ( $\delta_7$ ) , зазору між рухомим контактом та упором ( $\delta_8$ ) , сумарного зазору між шийками осі і торцями пазів у важелі якоря ( $\delta_3$ ) , вільного ходу тяги блок-контактів ( $\delta_{10}$ ) , натягу вимикаючих пружин , довжини вимикаючих пружин у

ввімкненому положенні вимикача .

В результаті отримано залежності часткових функцій бажаності від нормативних значень контрольованих параметрів вимикача:

- (3.15)
- (3.16)
- (3.17)
- (3.18)
- (3.19)
- (3.20)
- (3.21)
- (3.22)
- (3.23)
- (3.24)
- (3.25)

Значення контрольованих параметрів шести вимикачів, отримані в результаті міжремонтних випробувань, приведені в табл. 3.6. За виразами (3.11-3.25) ці значення перераховані в часткові функції бажаності (табл. 3.7). За формулами (3.9-3.10) розраховані вагові коефіцієнти для кожного з критеріїв, з урахуванням яких за формулою (3.8) обчислено узагальнену функцію бажаності .

Таблиця 3.6 - Значення контрольованих параметрів вимикачів типу ВАБ-43

	Номер досліджуваного вимикача					
	1	2	3	4	5	6

	40	45	48	50	46	46
	450	400	500	612	587	400
	83	80	90	73	78	73
	85	82	89	74	78	82
	30	32	33	26	32	23
	15	16	14	18	17	4
	1,4	1,3	2	2,8	2,4	3,2
	2,8	2,7	2,4	1,3	3,6	1
	3,2	3	3,4	2,4	4,1	2,2
	22,8	23	20	11,2	15,8	12
	1,9	2	2,4	0,9	1,5	4,2
	5,5	3,6	4,8	1,5	5,5	7,9
	2,3	2,2	2,1	1,5	2,2	1,6
	36	35	38	32	34	49
	197	196	198	195	196	206

Таблиця 3.7 - Функції бажаності

	Номер досліджуваного вимикача						Значення вагового коеф.
	1	2	3	4	5	6	
	0,624	0,596	0,578	0,566	0,59	0,59	0,01
	0,645	0,666	0,624	0,572	0,584	0,666	0,022
	0,599	0,551	0,697	0,43	0,518	0,43	0,055
	0,629	0,584	0,684	0,448	0,518	0,584	0,044
	0,529	0,634	0,704	0,393	0,634	0,331	0,079
	0,698	0,612	0,8	0,473	0,537	0,325	0,089
	0,666	0,615	0,726	0,413	0,533	0,329	0,081
	0,572	0,615	0,8	0,439	0,348	0,37	0,091
	0,664	0,58	0,8	0,431	0,548	0,397	0,079
	0,536	0,522	0,8	0,337	0,579	0,37	0,088
	0,548	0,58	0,8	0,355	0,45	0,342	0,091
	0,555	0,569	0,701	0,392	0,555	0,372	0,065

	0,537	0,653	0,8	0,368	0,653	0,444	0,084
	0,577	0,529	0,704	0,421	0,488	0,4	0,059
	0,537	0,444	0,653	0,368	0,444	0,32	0,064
	0,585	0,579	0,746	0,405	0,517	0,369	
	задов.	задов.	добре	задов.	задов.	погано	

Проаналізуємо результати розрахунку на прикладі швидкодіючого вимикача №6. Значення функції для даного вимикача дорівнює 0,369, а згідно з табл. 3.3 дане значення відповідає рівню бажаності “погано”, що, в свою чергу, свідчить про незадовільний технічний стан вимикача. Для визначення причин необхідно проаналізувати часткові функції бажаності контрольованих параметрів даного вимикача. З табл. 3.7 чітко видно, що значення , , , та відповідають рівню бажаності “погано”, а це означає, що значення контрольованих параметрів **“натискання головних контактів”, “натискання дугогасних контактів”, “провал головного контакту”, “зазор між рухомих контактом та упором” та “довжина вимикаючих пружин у ввімкненому положенні вимикача”** знаходяться за межами, встановленими в [22]. Тому рекомендується для вимикача №6 проведення профілактичних робіт з метою усунення дефектів. Дана методика аналізу функції застосовується і для інших п’яти вимикачів.

Достовірність запропонованого методу оцінки технічного стану електрообладнання підтверджена практичними даними протоколів (Додаток А) міжремонтних випробувань швидкодіючих вимикачів ВАБ-43 тягової підстанції «Нижньодніпровськ-Вузол» (табл. 3.8).

Таблиця 3.8 – Результати міжремонтних випробувань швидкодіючих вимикачів підстанції НД-Вузол

№ протоколу	Тип вимикача	Висновок	Значення
15101315	ВАБ-43	«БВ_ ФА-9_ ВАБ-43 испытан в полном объеме, отклонений не выявлено. Выключатель к вводу в эксплуатацию готов.»	0,72
17091315	ВАБ-43	«БВ_ ФА-3А_ ВАБ-43 испытан в полном объеме, отклонений не выявлено. Выключатель к вводу в эксплуатацию готов.»	0,78
17101315	ВАБ-43	«БВ_ ФА-7 _ ВАБ-43 испытан в полном объеме, выявлены граничные значения по пунктам 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9. Выключатель к вводу в эксплуатацию готов, необходимо сократить временной интервал межремонтных испытаний.»	0,63
17111315	ВАБ-43	«БВ_ ФА-5А _ ВАБ-43 испытан в полном объеме, выявлены несоответствия по пунктам 1, 3, 5, 7, 10, 11, 12, 13. Выключатель к вводу в эксплуатацию не готов, необходимо выполнить наладку и устранить причины.»	0,35

Отримане значення узагальненої функції бажаності є комплексною оцінкою технічного стану електроустаткування і визначає наступні задачі технічного обслуговування: коригування та оптимізація термінів та обсягів ТО і Р, визначення та безперервна діагностика найбільш критичних за результатами розрахунку часткових функцій бажаності елементів. В залежності від значення узагальненої функції бажаності пропонуються наступні стратегії ТО і Р:

- для – обладнання знаходиться у передаварійному стані. Проводиться безперервне діагностування усіх елементів електроустаткування. При досягненні ними граничного стану проводиться попереджувальний ремонт устаткування. Для забезпечення задовільного технічного стану необхідне покращення контрольованих параметрів та розробка рекомендацій по управлінню якістю утримання обладнання на підставі обслуговування та ремонту за поточним технічним станом. В подальшому при повторюванні даного результату є сенс розглядати питання про заміну окремих елементів або обладнання в цілому;

- для – обладнання знаходиться у задовільному стані. Питання про призначення термінів ТО і Р вирішується на основі періодичного діагностування за планом, який включається в календарні графіки. Проводиться аналіз часткових функцій бажаності з метою визначення “слабших” показників, по відношенню до яких проводиться безперервне діагностування в процесі експлуатації;

- для – обладнання знаходиться на даний момент у гарному стані. В ремонтний цикл, як основну операцію технічного обслуговування, необхідно включити графік контролю технічного стану електрообладнання. На підставі діагностування міжремонтний період кожної одиниці електрообладнання коригується залежно від його фактичного технічного стану.

Як зазначалося вище, діагностування електрообладнання тягових підстанцій пов’язане з отриманням і подальшою обробкою великого об’єму інформації шляхом проведення вимірювань різними діагностичними методами, які за інформативністю і достовірністю різняться між собою. Аналіз результатів вимірювання ряду параметрів обладнання пов’язаний з використанням великої кількості обчислювальних ресурсів, а процес математичної обробки діагностичної інформації є досить складним і об’ємним. Цей процес вимагає значних затрат часу та матеріальних ресурсів. Одним із шляхів зниження об’єму та уніфікації діагностичної інформації, і, відповідно, підвищення швидкодії системи технічного обслуговування і ремонту є використання розробленого узагальненого показника технічного стану. Показник якості спрощує процес обробки великого об’єму діагностичних даних та надає диференційовану оцінку технічного стану обладнання, яка не залежить від способу діагностики.

### **3.3 Розробка математичної моделі узагальненого показника технічного стану на основі повного факторного експерименту**

За своїм характером задача моделювання узагальненого показника технічного стану електрообладнання тягових підстанцій є багатофакторною і нелінійною, що призводить до застосування різних методів її вирішення. Одним із шляхів розв'язання даної задачі є використання математичних методів теорії планування експерименту. Застосування методів планування експерименту дозволяє визначити похибки математичної моделі та судити про її адекватність. Найпростішим планом першого порядку є план повного факторного експерименту (ПФЕ) вигляду  $2^n$ . Якщо точність моделі виявляється недостатньою, то застосування методів планування експерименту дозволяє моделювати математичну модель з проведенням додаткових дослідів без втрати попередньої інформації з мінімальними втратами.

При плануванні експерименту для побудови математичної моделі узагальненого показника технічного стану необхідно визначити фактори, які впливають на зміну технічного стану ЕО, визначити вид математичної моделі та вибрати оптимальний план експерименту [107], [108].

Фактори, які використовуються при плануванні експерименту, повинні задовольняти наступним вимогам [107]:

- 1) Керованість.
- 2) Операційність.
- 3) Точність вимірювання.
- 4) Однозначність.

При плануванні експерименту зазвичай одночасно змінюється кілька факторів. Тому дуже важливо сформулювати вимоги, які пред'являються до сукупності факторів. Перш за все висувається вимога *сумісності*. Сумісність факторів означає, що всі їх комбінації здійсненні і безпечні. При плануванні експерименту важлива *незалежність* факторів, тобто можливість встановлення фактору на будь-якому рівні незалежно від рівнів інших факторів.

При визначенні виду математичної моделі основними вимогами, які пред'являються до неї, є простота і адекватність. Вважається, що алгебраїчні поліноми є найпростішими моделями. Поліноми лінійні відносно невідомих параметрів моделі, що значно спрощує обробку результатів експерименту [107]. Саме тому в якості математичної моделі в даній роботі були вибрані алгебраїчні поліноми.

### **3.3.1 План повного факторного експерименту $2^n$ для узагальненого показника технічного стану**

Для отримання математичної моделі узагальненого показника технічного стану проведено повний факторний експеримент  $2^n$  на прикладі швидкодіючого вимикача постійного струму ВАБ-43. Геометричне відображення ПФЕ  $2^n$  (наприклад  $n=2$ ) із зазначенням номерів точок плану в факторному просторі представлено на рис. 3.3 [109], де +1 – верхнє значення факторів, -1 – нижнє значення факторів, 0 – середнє значення факторів.

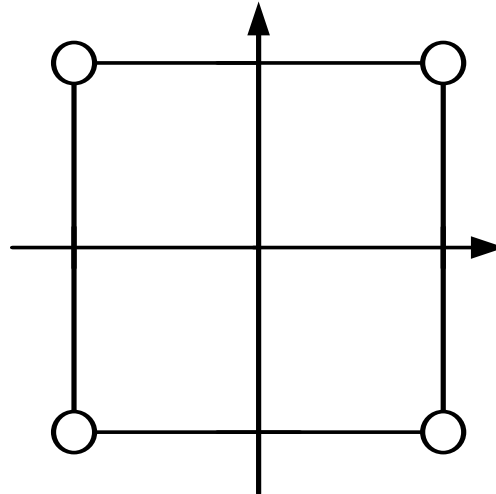


Рисунок 3.3 – Геометричне відображення плану 22

В якості функції відгуку використано узагальнений показник технічного стану  $D(t)$  [12]. Згідно [22], [44] визначені основні діагностичні показники: натискання головних контактів, натяг пружин, к-ть відключень вимикача, площа прилягання головних контактів та провал головного контакту. Межі їх зміни для отримання  $D$  приведені у табл. 3.9.

Таблиця 3.9 - Межі зміни діагностичних показників

Параметр	Натискання головних контактів, кгс	Натяг пружин, кгс	К-ть відключень, шт..	Площа прилягання головних контактів, %	Провал головного контакту, мм
Основний рівень	30	35	40	85	1,125
Верхня межа	33	38	60	94	1,515
Нижня межа	27	32	20	76	0,735

При виборі плану насамперед доводиться враховувати критерії оптимальності і число дослідів [108], [110]. У нашому випадку ясно, що шуканий план повинен бути дворівневим (оскільки нас цікавить лінійна модель), ортогональним і ротатабельним. Ортогональність дозволяє рухатися по градієнту пропорційно коефіцієнтам лінійної моделі і незалежно інтерпретувати ефекти. Ротатабельність забезпечує гарантовану рівність дисперсій прогнозування при русі в будь-якому напрямку від центру експерименту. Всім цим вимогам задовольняє повний факторний експеримент типу  $2^n$  [111]. Враховуючи критерії оптимальності і кількість факторів було вибрано план повного факторного експерименту першого порядку типу 25 [112]. Враховуючи, що кількість факторів відома, можна відразу знайти кількість дослідів, необхідну для реалізації всіх можливих комбінацій рівнів факторів:

$$(3.26)$$

де  $n$  – кількість дослідів,  $k$  – кількість факторів,  $2$  – кількість рівнів. Для даного експерименту кількість дослідів складе 32.

На наступному етапі складемо таблицю, в якій значення факторів знаходяться у всіх можливих поєднаннях і проведемо моделювання для всіх варіантів (табл. 3.10). Приймемо припущення, що модель коефіцієнту втрат лінійна.

Таблиця 3.10 - Фрагмент матриці планування повного факторного експерименту

Номер досліджу	x0	x1	x2	x3	x4	x5	D
1	1	34	43	40	97	2,5	0.638
2	1	34	47	40	97	2,5	0.601
3	1	38	43	40	97	2,5	0.587
4	1	38	47	40	97	2,5	0.553

В даній матриці значення факторів знаходяться у всіх можливих поєднаннях. Перший стовпець відповідає коефіцієнтам вільного члена моделі, стовпці з 2-го по 6-ий відповідають значенням факторів, 7-ий стовпець – значення відгуку системи.

Для спрощення запису умов експерименту і обробки експериментальних даних масштаби по осях вибираються так, щоб верхній рівень відповідав +1, нижній -1, а основний нулю. Для факторів з неперервною областю визначення це завжди можна зробити за допомогою перетворення

$$(3.27)$$

де  $x_j$  – кодоване значення фактора,  $x_j^0$  – натуральне значення фактора,  $x_j^1$  – натуральне значення основного рівня,  $x_j^2$  – інтервал варіювання,  $j$  – номер фактора. Для якісних факторів, що мають два рівні, один рівень позначається +1, а інший – 1; порядок рівнів не має значення.

Матриця планування повного факторного експерименту побудована стовпцями взаємодії факторів між собою (стовпці 7 – 32), результати експерименту в залежності від встановлення факторів на заданих рівнях (значення функції відгуку) записані в останній стовпець матриці повного факторного експерименту (табл. 3.11).

Таблиця 3.11 - Фрагмент кодової матриці планування повного факторного експерименту

Номер досліджу	Фактори та взаємодії																																D				
	x0	x1	x2	x3	x4	x5	x1x2	x1x3	x1x4	x1x5	x2x3	x2x4	x2x5	x3x4	x3x5	x4x5	x1x2x3	x1x2x4	x1x2x5	x1x3x4	x1x3x5	x1x4x5	x2x3x4	x2x3x5	x2x4x5	x3x4x5	x1x2x3x4	x1x2x3x5	x1x2x4x5	x1x3x4x5	x2x3x4x5	x1x2x3x4x5					
1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0,59216

2	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	0	·	5	3	4	2	9	
3	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	0	·	5	3	8	5	1
4	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	0	·	4	8	5	8	9

Побудована матриця планування експерименту задовольняє всім вимогам повного факторного експерименту:

- 1) Симетричність відносно центру експерименту

(3.28)

де  $j$  - номер фактора,  $N$ — число дослідів,  $j = 1, 2, \dots, k$ .

- 2) Умова нормування

(3.29)

Це наслідок того, що значення факторів у матриці задаються  $+1$  і  $-1$ .

3) Ротатабельність – точки в матриці планування підбираються так, що точність передбачення значень параметра оптимізації однакова на рівних відстанях від центру експерименту і не залежить від напрямку.

- 4) Ортогональність матриці планування

(3.30)

Наступним кроком проведення повного факторного експерименту є обробка результатів експерименту, яка включає в себе наступні кроки:

- 1) Розрахунок оцінки дисперсії відтворюваності.

(3.31)

де  $\bar{y}_j$  - математичне очікування функції відгуку,  $n_j$  - число рівнів свободи.

- 2) Визначення коефіцієнтів регресії.

(3.32)

3) Перевірка значущості коефіцієнтів регресії.

(3.33)

де - табличне значення критерію Стюдента при кількості рівнів

свободи, з якими визначалася і вибраному рівні значимості (для нашого випадку 0,05).

Коефіцієнт значимий, якщо його абсолютна величина більша або дорівнює .

4) Перевірка адекватності моделі.

(3.34)

де - критерій Фішера. При цьому ;

- число рівнів свободи, ;

- дисперсія адекватності:

(3.35)

де - значення функції відгуку, розраховане за рівнянням регресії;

- значення функції відгуку, отримане в результаті експерименту.

Модель узагальненого показника технічного стану, отриману в результаті проведення повного факторного експерименту, запишемо у вигляді рівняння регресії:

(3.36)

Визначимо коефіцієнти регресії за виразом (3.12) і запишемо результати у табл. 3.10:

Таблиця 3.12 – Коефіцієнти рівняння регресії в кодованих координатах

b0	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9	b10	b11	b12	b13
0,558296	0,002000	0,002000	-0,002000	0,002000	0,002000	0,002000	-0,002000	0,002000	0,002000	-0,002000	0,002000	0,002000	-0,002000

Продовження таблиці 3.12

4	b1	b15	b16	b17	b18	b19	b20	b21	b22	b23	b24	b25	b26	b27	b28	b29	b30	b31
0,00005	0,00000	-4,00000	6,00000	6,00000	-4,00000	-4,00000	5,00000	-5,00000	-5,00000	6,00000	-4,00000	-2,00000	-2,00000	2,00000	-2,00000	-2,00000	-1,00000	-1,00000

З отриманих коефіцієнтів рівняння регресії виберемо статистично значимі за виразом (3.33). Статистично значимими в результаті виявились коефіцієнти  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ .

З огляду на це отримаємо наступне рівняння регресії:

$$\dots \quad (3.37)$$

Перевіримо адекватність отриманої моделі за виразом (3.34), розрахувавши при цьому дисперсію адекватності за виразом (3.35).

Розрахункове значення критерію Фішера , табличне

[107]. Оскільки умова

не виконується, модель (3.37) не може бути визнана адекватною.

Враховуючи отриманий результат було вирішено побудувати план повного факторного експерименту до ортогонального центрально-композиційного плану другого порядку без втрати інформації про попередні досліді.



Продовження таблиці 3.13

b14	b15	b16	b17	b18	b19	b20	b21	b22	b23	b24	b25
0, 001 185	-0, 001 03	0, 001 318	0, 001 282	-0, 000 93	-0, 000 9	0, 001 147	-4, 9E- 05	6, 25 E- 05	6, 09 E- 05	-4, 4E- 05	-4, 3E- 05

Продовження таблиці 3.13

b26	b27	b28	b29	b30	b31	b32	b33	b34	b35	b36
5, 44E -05	-4, 8E- 05	-4, 6E- 05	5, 89E -05	-4, 1E- 05	-2, 255E- 06	-2, 2E- 06	2, 8E- 06	-2E -06	-2, 1E- 06	-1, 009E -07

Із таблиці 3.13 виберемо статистично значимі коефіцієнти за умовою (3.33). Статистично значимими в результаті виявились коефіцієнти  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$ ,  $b_8$ ,  $b_{10}$ .

З огляду на це отримаємо наступне рівняння регресії:

(3.39)

Здійсненою перевіркою на адекватність встановлено, що отримана модель адекватна ( ) [107]. Результати моделювання узагальненого показника технічного стану наведені на рис. 3.4.

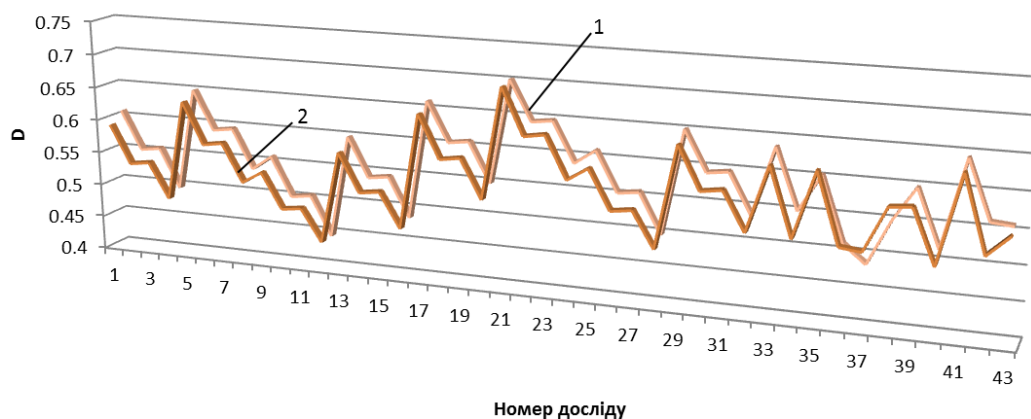


Рисунок 3.4 – Узагальнений показник технічного стану :  
 1 – значення за рівнянням регресії, 2 – значення за результатами експерименту

Як слідує з аналізу рис. 3.4 значення узагальненого показника технічного стану, отримані за результатами експерименту та за рівнянням регресії майже не відрізняються ( ), що свідчить про адекватність отриманих результатів.

Для отримання поліноміальної моделі узагальненого показника технічного стану для швидкодіючого вимикача постійного струму, придатної для застосування у задачах прогнозування [113], необхідно перейти від кодованих значень змінних до натуральних за виразом (3.27). Виконавши перетворення отримаємо наступний вираз:

(3.40)

В результаті аналізу рівняння регресії (3.39) визначено характер впливу діагностичних факторів на зміну технічного стану швидкодіючого вимикача. При збільшенні значення таких факторів, як натискання головних контактів, натяг пружин, площа прилягання головних контактів, провал головного контакту (коефіцієнти регресії цих факторів мають додатній знак) та зменшенні значення фактору кількість відключень (коефіцієнт регресії фактору має від'ємний знак) величина узагальненого показника технічного стану буде збільшуватись. При зменшенні значення діагностичних факторів натискання головних контактів, натягу пружин, площі прилягання головних контактів, провалу головного контакту та збільшенні значення фактору кількість відключень стан вимикача буде наближатися до передаварійного, що сигналізуватиме про необхідність виводу його з експлуатації та проведення профілактичних робіт.

Застосувавши методику проведення повного факторного експерименту були отримані поліноміальні моделі узагальненого показника технічного стану і для інших типів високовольтних вимикачів тягових підстанцій:

1) Масляні вимикачі ( )

(3.41)

2) Вакуумні вимикачі ( )

(3.42)

3) Елегазові вимикачі ( )

(3.43)

### **3.4. Методика оцінки фактичного залишкового ресурсу енергетичного обладнання на основі узагальненого показника технічного стану**

Вирішення проблеми оцінки індивідуального ресурсу на практиці ускладнюється з наступних причин [114], [115]:

- поточний контроль стану обладнання може бути здійснений лише за обмеженою кількістю показників, у той час як прийняття рішення щодо продовження ресурсу потребує поточної оцінки по всій множині діагностичних показників;
- необхідно розглядати не тільки локальні часткові показники ресурсу, але і формувати узагальнені агреговані показники, що відображають стан агрегату в цілому, на основі яких можна було б приймати достовірні рішення з планування ремонтних робіт.

Таким чином, для реалізації індивідуального підходу до планування ремонтних робіт необхідна не тільки наявність діагностичних систем контролю стану електрообладнання, а й відповідна алгоритмічна та методична база оцінки залишкового ресурсу енергоагрегату за його поточним станом, заснована на систематизації інформації про діагностичні показники експлуатації [116] - [118]. Ідентифікація показників процесу зміни ресурсу обладнання при експлуатації повинна здійснюватися на основі інформації з різних джерел, таких, як результати обстежень під час ремонтних робіт, результати поточного контролю з використанням різних методів, статистики аварій, експертні оцінки [119]-[121].

Для складних агрегатів число контрольованих діагностичних показників становить десятки і більше [122]. Відповідно, по кожному з параметрів оцінюється свій частковий ресурс. Таким чином, контрольований агрегат, який є об'єктом спостереження, характеризується безліччю часткових ресурсів:

(3.44)

де  $r_i$  - частковий ресурс агрегату по  $i$ -му показнику працездатності;  
 $R$  - індексна множина часткових ресурсів.

На сьогоднішній день існує безліч методів контролю та діагностики технічного стану обладнання, які, в основному, спрямовані на виявлення найбільш

проблемних вузлів контрольованого агрегату [44]. Даний підхід до оцінки ресурсу агрегату передбачає виявлення таких показників працездатності, за якими частковий ресурс контрольованого агрегату є мінімальним. Аналітично даний підхід можна записати в наступному вигляді:

(3.  
45)

де - оцінка критичного ресурсу агрегату.

Такий підхід для окремих агрегатів, безумовно, є виправданим, оскільки дозволяє одночасно вирішувати задачу діагностики стану обладнання та попереджати виникнення аварій на основі цілеспрямованих профілактичних ремонтів. Тому деталізований контроль часткових показників є обов'язковим для всіх методик оцінки передаварійних ситуацій [123], [124].

Однак даний підхід має недоліки. По-перше, обсяг контрольованих показників працездатності завжди є обмеженим. Неконтрольовані параметри можуть зумовити непрогнозовану аварійну ситуацію. Тому оцінка критичного ресурсу контрольованого агрегату є неповною і повинна розглядатися в якості однієї з можливих, хоча й досить представницьких оцінок, але потребуючої подальшого уточнення. По-друге, на практиці, як правило, не представляється можливим одночасно проводити діагностику всього парку контрольованого обладнання традиційними методами. Більш того, деякі методи діагностики вимагають виведення обладнання з експлуатації. У зв'язку з цим, особливо важливе значення має вирішення завдання моніторингу загального технічного стану обладнання в реальному часі, з метою виявлення окремих агрегатів, що вимагають проведення більш детальних обстежень відомими методами [125], [126]. Тут знання узагальненого технічного стану обладнання дозволяє оцінити надійність всього технологічного комплексу в цілому і правильно розподілити ресурси на проведення ремонтно-профілактичних робіт за видами обладнання.

Для усунення зазначених вище недоліків розроблено методику оцінки узагальненого залишкового ресурсу електрообладнання, наведену далі. Методика передбачає введення додаткової оцінки залишкового ресурсу агрегату на основі використання узагальненого показника технічного стану електрообладнання [12].

У процесі експлуатації електрообладнання піддається впливу різних експлуатаційних факторів, кожен з яких певною мірою впливає на зміну його технічного стану. Припустимо, що при роботі електрообладнання в реальних умовах на нього впливають  $N$  різних експлуатаційних факторів, які характеризуються величиною  $F_i$ . Фактором може бути як деякий одиничний вимірюваний параметр, так і комплекс величин, що характеризують природу досліджуваного експлуатаційного фактору. Припустимо, що на конкретне електрообладнання діє деякий фактор  $F_i$ . При збільшенні інтенсивності впливу фактору  $F_i$  на величину фактичний залишковий ресурс електрообладнання зменшується в  $k_i$  разів, а при зменшенні - збільшується в  $k_i$  разів.

разів. Тому можна записати наступний вираз для обчислення фактичного залишкового ресурсу електрообладнання залежно від зміни величини

$$\text{де } \dots \quad (3.46)$$

де - фактичний залишковий ресурс електроустаткування;  
 - нормативний ресурс електрообладнання при ;  
 параметричний показник зміни діагностичного параметру . Параметричний показник обчислюється за наступним виразом:

$$\text{де } \dots \quad (3.47)$$

де - поточне значення діагностичного параметру;  
 граничне (аварійне) значення ; - номінальне (робоче) значення

Формула (3.46) справедлива для випадку, коли на електрообладнання впливає один єдиний  $i$ -й фактор . В реальних умовах експлуатації на зміну технічного стану електрообладнання впливає безліч факторів. Для аналізу результатів діагностичних вимірювань, уніфікації інформації та отримання узагальненої оцінки технічного стану електрообладнання пропонується використання методики, представленої в [12]. З врахуванням цього вираз (3.46) можна представити у наступному вигляді:

$$\text{де } \dots \quad (3.48)$$

де - поточне значення узагальненого показника технічного стану;  
 - граничне (аварійне) значення ( );  
 - номінальне (робоче) значення ( ).

Розроблену методику можна використовувати для оцінки фактичного залишкового ресурсу електрообладнання різного типу. Розглянемо приклад застосування методики для оцінки фактичного залишкового комутаційного ресурсу швидкодіючого вимикача постійного струму ВАБ-43. Згідно з [22] визначено види контрольованих діагностичних параметрів та межі їх припустимих значень. За методикою, представленою в [12], виконано перетворення діагностичних параметрів в часткові функції бажаності. Значення контрольованих параметрів та результати розрахунку часткових і узагальнених функцій бажаності представлені у табл. 3.14 та табл. 3.15.

Таблиця 3.14 - Значення контрольованих параметрів вимикачів типу ВАБ-43

	Номер досліджуваного вимикача		
	1	2	3
	10	46	70
	90	78	73
	89	78	82
	33	32	23
	14	17	4
	2	2,4	3,2
	2,4	3,6	1
	3,4	4,1	2,2
	20	15,8	12
	2,4	1,5	4,2
	4,8	5,5	7,9

Продовження табл. 3.14

	2,1	2,2	1,6
	38	34	49
	198	196	205

Таблиця 3.15 - Функції бажаності

	Номер досліджуваного вимикача		
	1	2	3

	0,764	0,59	0,438
	0,697	0,518	0,43
	0,684	0,518	0,584
	0,704	0,634	0,331
	0,8	0,537	0,325
	0,726	0,533	0,329
	0,8	0,348	0,37
	0,8	0,548	0,397
	0,8	0,579	0,37
	0,8	0,45	0,342
	0,701	0,555	0,372
	0,8	0,653	0,444
	0,704	0,488	0,4
	0,653	0,444	0,37
	0,753	0,517	0,377
	добре	задов.	погано

Користуючись даними табл. 3.13 розрахуємо фактичний залишковий комутаційний ресурс швидкодіючих вимикачів за виразом (3.48). При цьому, згідно з [22] нормативний комутаційний ресурс швидкодіючого вимикача ВАБ-43 відключень.

відключення;

відключень;

відключення;

Отримані значення фактичного залишкового ресурсу дозволяють оцінити поточний технічний стан контрольованого обладнання. Результати розрахунку можуть бути використані для коригування графіку ремонтно-профілактичних робіт (РПР) на тягових підстанціях, що дозволяє перейти від системи ППР до обслуговування обладнання за фактичним технічним станом.

При розгляді цілого парку енергетичного обладнання і, як правило, дефіцитному ремонтному фонді підприємства, найчастіше виникає завдання оперативного планування ремонтно-профілактичних робіт по фактичному стану обладнання [127]-[129]. По суті, необхідно обґрунтовано встановити чітку черговість виведення того чи іншого обладнання в ремонт. З використанням даної методики реалізований підхід до оперативного планування ремонтно-профілактичних робіт, заснований на розстановці ремонтних пріоритетів контрольованого обладнання. Розстановка ремонтних пріоритетів здійснюється, виходячи з виробітку узагальненого залишкового ресурсу однотипного обладнання:

(3.49)

де  $\Delta R_i$  - вироблення залишкового ресурсу  $i$ -го обладнання;

$R_i$  - залишковий ресурс  $i$ -го обладнання на момент прийняття рішення;

$R_{\text{норм}}$  - нормативний ресурс електрообладнання при  $R_{\text{норм}}$ .

Далі необхідно провести ранжування отриманих значень вироблення в порядку спадання і присвоїти кожному з агрегатів відповідний номер. Кожному агрегату присвоюється ремонтний пріоритет, який відображається на графіку у верхній частині стовбчастої діаграми. Одиниця присвоюється агрегату з найбільшою виробленням залишкового ресурсу. Чим більше вироблення залишкового ресурсу агрегату, тим вище його ремонтний пріоритет.

Проведемо розстановку ремонтних пріоритетів за результатами розрахунку фактичного залишкового ресурсу  $R_i$  - (рис. 3.5).

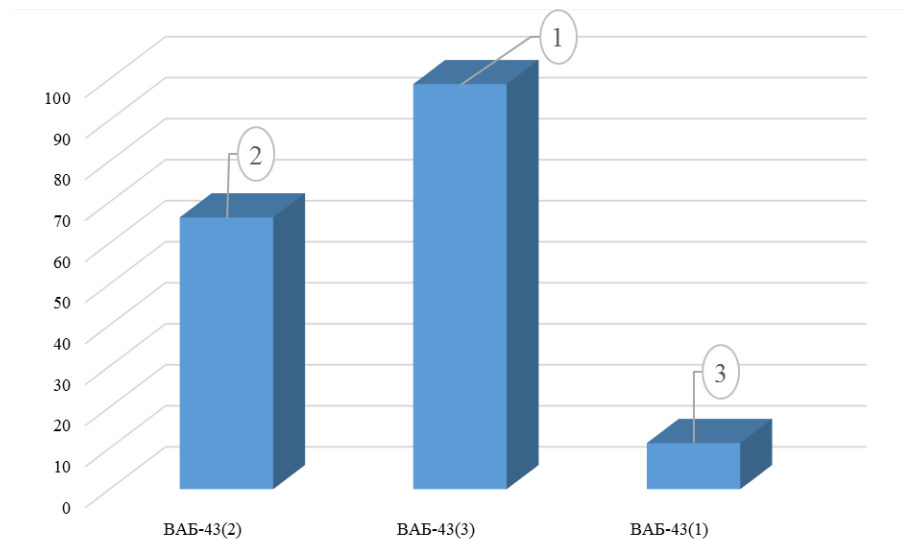


Рисунок 3.5 – Ремонтні пріоритети для швидкодіючих вимикачів ВАБ-43

Призначення ремонтних пріоритетів контролюваного обладнання дозволяє встановлювати чітку черговість проведення ремонтно-профілактичних робіт однотипного обладнання, а аналіз фактичного залишкового ресурсу – необхідність їх проведення на момент прийняття рішень в умовах дефіциту матеріальних ресурсів.

### Висновки до розділу 3

1. Визначено, що аналітичний вираз зміни узагальненого показника технічного стану має вигляд нелінійного поліному другого порядку. Доведено, що використання математичних методів теорії планування експерименту дозволяє побудувати математичну модель зміни узагальненого показника технічного стану з досить високою точністю отримання вихідного результату (значення середньоквадратичного відхилення для різних типів силового обладнання тягових підстанцій коливається в межах від 0,002254 до 0,002978).
  2. Запропоновано підхід до пріоритетного планування ремонтно-профілактичних робіт на основі оцінки фактичного залишкового ресурсу електрообладнання з використанням узагальнених показників технічного стану, що дозволяє обґрунтовано встановити черговість проведення ремонтно-профілактичних робіт для парку однотипного обладнання.
  3. Розроблено методику оцінки узагальненого залишкового ресурсу електрообладнання, яка передбачає введення додаткової оцінки залишкового ресурсу агрегату на основі використання узагальненого показника технічного стану електрообладнання. Це дає змогу отримання узагальненої оцінки залишкового ресурсу електрообладнання з урахуванням максимально можливого спектру експлуатаційних показників електроустаткування.
- Основні положення розділу опубліковані в роботах [8, 12].

## **4 АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ**

### **4.1. Автоматизована система моніторингу фактичного технічного стану обладнання тягових підстанцій**

Організація ефективної системи технічного обслуговування та діагностування обладнання тягових підстанцій неможлива без автоматизованих засобів діагностування та обробки зростаючих масивів діагностичних даних [130]-[132]. Ця система повинна відповідати наступним вимогам: бути сумісною з різними типами технічних засобів отримання діагностичної інформації; мати досить високу швидкість обробки діагностичних даних та постановки діагнозу; бути сумісною з існуючими системами АСУ ТП; мати досить високі показники безвідмовності; бути достатньо простою в експлуатації [133]-[136].

Виходячи з вищенаведених вимог була розроблена автоматизована система моніторингу фактичного технічного стану обладнання тягових підстанцій, а також програмний комплекс для організації даної системи в підрозділах господарства електрифікації.

#### **4.1.1. Алгоритм оперативного моніторингу технічного стану електрообладнання**

Використовуючи методику оцінки фактичного залишкового ресурсу енергетичного обладнання можна вирішити задачу оперативного моніторингу технічного стану ЕО. Алгоритм вирішення даної задачі представлений на рис. 4.1.

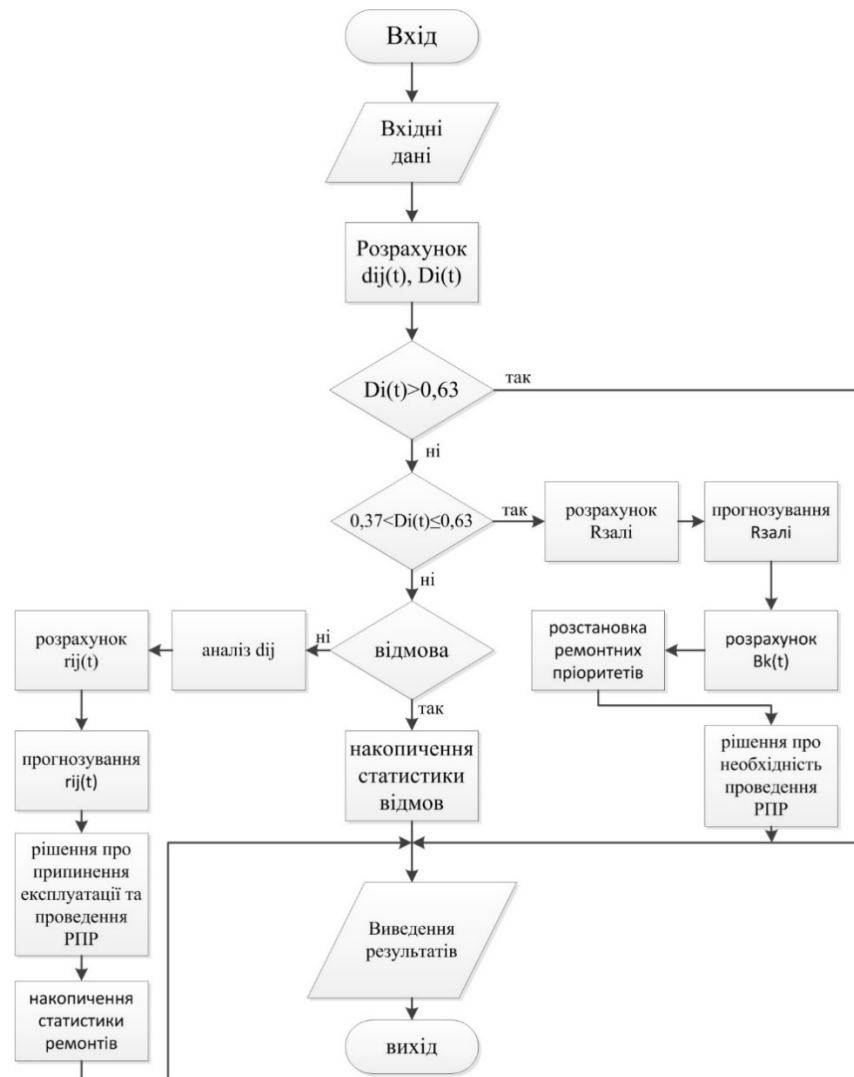


Рисунок 4.1. Алгоритм оперативного моніторингу технічного стану ЕО

Алгоритм реалізується наступним чином:

- введення початкових даних (нормативний ресурс ЕО; номінальне (робоче), поточне та граничне (аварійне) значення діагностичного параметру);
- розрахунок часткових та узагальнених показників технічного стану;
- співставлення значення розрахованих величин з пороговими рівнями:

- виконання умови  $Di(t) > 0,63$  свідчить про нормальний робочий стан обладнання;
- виконання умови  $0,37 < Di(t) \leq 0,63$  свідчить про передаварійний стан обладнання; розраховується та прогнозується фактичний залишковий ресурс обладнання, виробіток узагальненого залишкового ресурсу та виноситься рішення про проведення РПР;
- виконання умови  $Di(t) \leq 0,37$  свідчить про аварійний стан обладнання; проводиться аналіз часткових показників технічного стану, розраховується та прогнозується частковий залишковий ресурс обладнання, виноситься рішення про виведення обладнання із експлуатації та проведення РПР.

Даний алгоритм дає змогу попереджувати можливі відмови і аварійні ситуації на контрольованому обладнанні за рахунок моніторингу та прогнозуванню поточного технічного стану ЕО, що підвищує надійність і безвідмовність роботи обладнання тягових підстанцій.

#### 4.1.2. Структура автоматизованої системи моніторингу фактичного технічного стану обладнання тягових підстанцій

За допомогою алгоритму розроблена автоматизована система моніторингу фактичного технічного стану обладнання тягових підстанцій. Дана система призначена для моніторингу фактичного технічного стану енергетичного обладнання, а також для ведення інформаційної бази даних енергетичного устаткування. Структура системи зображена на рис. 4.2.

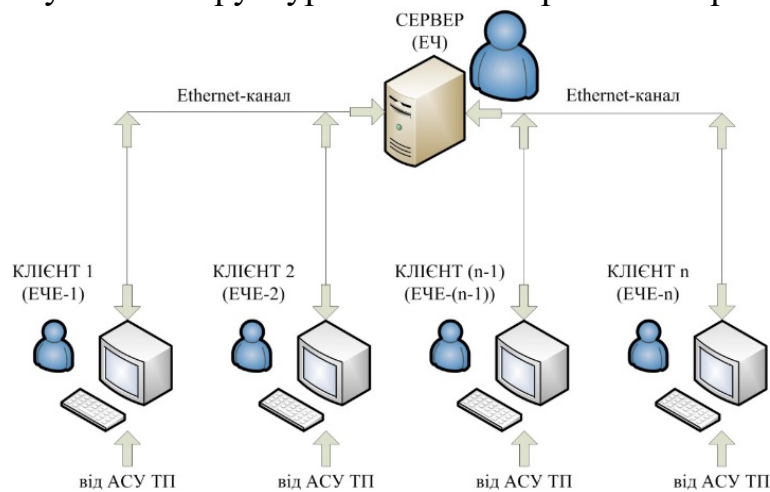


Рисунок 4.2. Структура автоматизованої системи моніторингу фактичного технічного стану обладнання тягових підстанцій

Автоматизована система забезпечує виконання наступних функцій:

- ведення інформаційної бази даних показників працездатності та ремонтної статистики обладнання;
- розрахунок і графічне відображення критичного і залишкового ресурсів обладнання;
- формування графіку ремонтних робіт обладнання на заданий інтервал часу;
- розрахунок і графічне відображення ремонтних пріоритетів обладнання.

Автоматизована система складається з наступних модулів: сервера з інформаційною базою даних (встановлюється на дистанції електропостачання), клієнта (встановлюється на тяговій підстанції), модуль вводу даних, модуля розрахунку фактичного залишкового та критичного ресурсів, програмного забезпечення (ПЗ) адміністрування (персонал дистанції електропостачання) та операторів виробничих відділів (персонал тягової підстанції).

В інформаційній базі даних зберігаються відомості про структуру тягових підстанцій, інформація про основні експлуатаційні характеристики агрегатів, параметри розрахунку узагальненого і критичного ресурсу. При кожному додаванні в базу даних нових записів про параметри експлуатаційних характеристик агрегату активізується модуль розрахунку фактичного та узагальненого залишкового ресурсу.

Модуль вводу даних дозволяє автоматично вводити поточні значення контрольованих діагностичних показників в електронну базу даних з існуючої АСУ ТП в автоматичному режимі. При відсутності АСУ ТП оператор має змогу здійснювати ручне введення в базу даних значень показників експлуатації.

Налаштування параметрів роботи системи здійснюється за допомогою програмного забезпечення адміністрування. Тут редагуються структурні елементи тягової підстанції, задаються граничні значення діагностичних показників контрольованого обладнання, вносяться відомості про аварії та ремонти. Також дане ПЗ забезпечує розрахунок і графічне відображення критичного і залишкового ресурсів обладнання, часткових ресурсів по окремим контрольованим показникам, а також графіків ремонтних пріоритетів.

ПЗ операторів виробничо-технічних відділів призначено для вводу у ручному режимі поточних значень експлуатаційних характеристик контрольованих агрегатів, отриманих в результаті міжремонтних випробувань. Разом з цим дане ПЗ забезпечує графічне відображення критичного і залишкового ресурсів обладнання, графічне відображення часткових ресурсів по окремим контрольованим показникам, а також відкоригованих графіків ремонтно-профілактичних робіт.

На рис. 4.3 показано принципову схему автоматизованої системи моніторингу технічного стану обладнання тягових підстанцій, де 1 – об'єкт діагностування; 2 – блок вводу даних; 3 – блок формування діагностичної моделі; 4 – блок розрахунку фактичного залишкового ресурсу, 5 – блок формування діагностичної моделі, 6 – блок розрахунку ремонтних пріоритетів, 7 – блок формування відкоригованих графіків ремонтно-профілактичних робіт, 8 – блок виведення діагностичної інформації, 9 – інформаційна база даних, 10 – блок розрахунку узагальнених показників технічного стану, 11 – блок редагування експлуатаційних характеристик електрообладнання та структури тягової підстанції, 12 – блок накопичення статистики відмов обладнання та проведення ремонтно-профілактичних робіт.

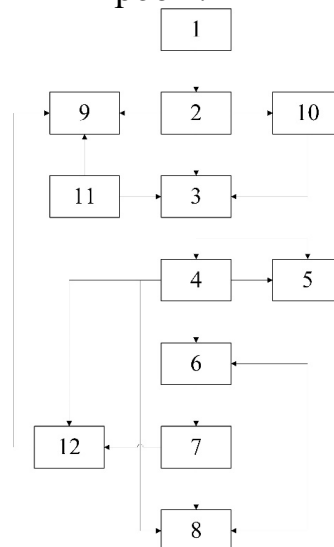


Рисунок 4.3 – Принципова схема автоматизованої системи моніторингу та прогнозування технічного стану обладнання тягових підстанцій

Значення діагностичних параметрів, отримані з об'єкта діагностування 1, по каналу зв'язку передаються до блоку вводу даних 2, який далі транслює їх до блоку формування діагностичної моделі 3, інформаційної бази даних 9 та блоку розрахунку узагальненого показника технічного стану 10. Інформація про структуру тягової підстанції та експлуатаційні характеристики електрообладнання передається з блоку 11 до інформаційної бази даних 9. Блок формування діагностичної моделі 3 на основі аналізу інформації, що надходить з блоку вводу даних 2 та блоку розрахунку узагальнених діагностичних показників 10, та в залежності від параметрів контрольованих агрегатів, заданих блоком 11, формує діагностичну модель. Інформація про діагностичну модель подається до блоку розрахунку фактичного залишкового ресурсу 4 та блоку формування діагностичної моделі 5. У разі наближення розрахованого значення залишкового ресурсу до свого критичного значення інформація про аварійний стан обладнання передається до блоку виведення діагностичної інформації 8 та блоку накопичення статистики відмов обладнання та проведення ремонтно-профілактичних робіт 12. Результати оцінки зміни технічного стану контрольованих агрегатів, отримані в блоці 5, подаються до блоку виведення діагностичної інформації 8. На основі результатів розрахунку фактичного залишкового ресурсу та зміни технічного стану контрольованих агрегатів блок розрахунку ремонтних пріоритетів 6 виконує розрахунок та розстановку ремонтних пріоритетів. На основі інформації, отриманої від блоку розрахунку ремонтних пріоритетів 6, блок формування відкоригованих графіків ремонтно-профілактичних робіт 7 формує відкориговані графіки ремонтно-профілактичних робіт, які далі подаються до блоку накопичення статистики відмов обладнання та проведення ремонтно-профілактичних робіт 12 та блоку виведення діагностичної інформації 8. Статистика про відмови обладнання та проведення ремонтно-профілактичних робіт надходить до інформаційної бази даних 9 з блоку накопичення статистики відмов обладнання та проведення ремонтно-профілактичних робіт 12. Результатом функціонування автоматизованої системи моніторингу стану обладнання тягових підстанцій є інформація про фактичний технічний стан контрольованого обладнання та відкориговані графіки проведення ремонтно-профілактичних робіт, що отримуються з блоку виведення діагностичної інформації 8. Дана інформація дозволяє оптимізувати матеріальні, фінансові і часові затрати на проведення ремонтно-профілактичних робіт та попередити можливі відмови електрообладнання тягових підстанцій.

#### **4.2. Програмний комплекс моніторингу технічного стану електричного обладнання тягових підстанцій**

Для реалізації взаємодії автоматизованої системи діагностування з користувачем було розроблено програмний комплекс. Функціональним призначенням розробки є:

- розрахунок узагальнених і часткових показників технічного стану по окремим контрольованим показникам, визначення залишкового ресурсу та ремонтних пріоритетів електрообладнання;

- відображення графіків ремонтних пріоритетів та графіків залишкових ресурсів електрообладнання дистанцій електропостачання;
- зберігання масиву даних результатів діагностики електрообладнання та його розрахункових показників технічного стану;
- можливість експорту графіків ремонтних пріоритетів та залишкових ресурсів електрообладнання у файл.

Розроблюваний програмний продукт призначений для:

- розрахунку узагальнених і часткових критеріїв по окремим контрольованим показникам, залишкових ресурсів та ремонтних пріоритетів електрообладнання дистанцій електропостачання;
- зменшення витрат часу на аналіз результатів діагностики та постановку діагнозу;
- надання альтернативи застарілим паперовим розрахункам параметрів електрообладнання дистанцій електропостачання.

Для представлення у графічному вигляді алгоритму роботи програми було спроектовано блок-схеми з використанням мови Unified Modeling Language (UML).

UML – уніфікована мова моделювання, яка являє собою загальноцільову мову візуального моделювання, яка розроблена для специфікації, візуалізації, проектування і документування компонентів програмного забезпечення, бізнес-процесів та інших систем [137]. Мова UML має широкий профіль, являє собою відкритий стандарт, що використовує графічні позначення для створення абстрактної моделі системи, яка отримала назву UML модель. Unified Modeling Language реалізує об'єктно-орієнтований підхід до моделювання.

Створення мови UML є результатом спільної роботи Г. Буча (G. Booch), Д. Рамбо (J. Rumbaugh) та І. Якобсона (I. Jacobson). Г. Буч розробив нотацію графічних символів для опису різноманітних аспектів моделі. Д. Рамбо створив нотацію технології об'єктного моделювання (Object Modeling Technology, OMT). І. Якобсон, в свою чергу, описав процес визначення і фіксації вимог до системи у вигляді сукупності транзакцій. Також І. Якобсон є автором методу проектування систем, що відомий під назвою «Об'єктно-орієнтоване проектування програмного забезпечення» (Object Oriented Software Engineering, OOSE) [138].

Процес послідовної декомпозиції об'єктно-орієнтованого аналізу і проектування за використання мови UML отримав назву раціональний уніфікований процес (Rational Unified Process, RUP).

RUP передбачає послідовне розбивання аналізу і проектування на окремі етапи з побудовою відповідних канонічних діаграм моделі системи. За допомогою цих графічних конструкцій фіксуються усі уявлення про модель складної системи.

В термінах UML визначені наступні види діаграм [138]:

- діаграма варіантів використання (Use Case Diagram);
- діаграма класів (Class Diagram);
- діаграма поведінки (Behavior Diagrams): діаграма станів (Statechart Diagram) та діаграма діяльності (Activity Diagram);

- діаграми взаємодії (Interaction Diagrams): діаграма послідовності (Sequence Diagram) та діаграма кооперації (Collaboration Diagram);
- діаграми реалізації (Implementation Diagrams): діаграма компонентів (Component Diagram) та діаграма розгортання (Deployment Diagram).

Діаграма варіантів використання (Use Case Diagram) – діаграма, на якій відображена взаємодія певної сутності (діючої особи, актора) і системи, що моделюється. Перелік всіх варіантів використання фактично визначає функціональні вимоги до системи.

Важливо зазначити, що Дж. Шмullер називає діаграму такого типу діаграмою прецедентів [139].

В ході розробки діаграми варіантів використання (прецедентів) мають бути знайдені відповіді на наступні питання [139]:

- які межі і контекст предметної області системи, що моделюється?
- які загальні вимоги до функціональної поведінки системи, що підлягає проектуванню?
- що являє собою вихідна концептуальна модель системи?

Діаграма варіантів використання є єдиним засобом, за допомогою якого стає можливим замовнику, кінцевому споживачу і розробнику разом обговорювати функціональність і поведінку системи.

Згідно з термінологією UML, діаграмою класів (Class Diagram) називається діаграма, яка демонструє набір класів і зв'язків між ними. Класом, з точки зору UML, називається категорія чи група об'єктів, яка має спільні атрибути, операції, зв'язки, семантику. Графічно клас зображується у вигляді прямокутника, який може бути розділеним горизонтальними лініями на секції, що містять у собі ім'я класу, атрибути (змінні) та операції (методи). Призначення діаграми класів – представлення статичної структури моделі системи. За допомогою діаграми класів зручніше за все описувати функціональні вимоги до системи – послуги, які система надає кінцевому споживачу.

На діаграмі діяльності (Activity Diagram) зображені переходи потоку керування від однієї діяльності до іншої. Діаграми діяльності відносяться до динамічного аспекту поведінки системи. За допомогою цих діаграм можна змодельовати послідовні і паралельні кроки обчислювального процесу, а також життєдіяльність об'єкту, коли він переходить з одного стану в інший в різних точках потоку керування. Графічна нотація діаграми діяльності багато у чому схожа на нотацію діаграми станів, оскільки в ній також присутні позначення станів і переходів. Діаграми діяльності використовуються при моделюванні бізнес-процесів, технологічних процесів, послідовних і паралельних обчислень [140].

Діаграмою взаємодії (Interaction Diagram) називається діаграма, на котрій представлена взаємодія, що складається із багатьох об'єктів і стосунків між ними, включаючи повідомлення, якими вони обмінюються. Діаграми взаємодії також відносяться до динамічного виду системи. Їх можна будувати упорядковуючи за часом повідомлення або структурно упорядковуючи об'єкти, що взаємодіють. Отримані будь-яким з цих способів діаграми семантично

еквівалентні і можуть бути перетворені одна в одну без втрати інформації.

Діаграма кооперації (Communication diagram) – діаграма, на якій основна увага приділяється структурній організації об'єктів, що приймають та відправляють повідомлення. На відміну від діаграми послідовності, на діаграмі кооперації явно визнаються відносини між елементами, а час як окрема одиниця вимірювання не використовується (беруться до уваги порядкові номери викликів/повідомлень).

Як було зазначено вище, останнім етапом побудови моделі є створення фізичних представлень моделі. При використанні мови UML для цього створюють діаграми реалізації (Interaction Diagrams), які в свою чергу ділять на діаграми компонентів і діаграми розгортання. Діаграма компонентів (Component diagram) – статична структурна діаграма, яка демонструє декомпозицію програмної системи на структурні компоненти і зв'язки (залежності) між компонентами. В якості фізичних компонентів можуть виступати файли, бібліотеки, модулі, виконувані файли, пакети тощо. Діаграма компонентів використовується для моделювання статичного виду системи з точки зору реалізації, тобто описують особливості фізичного представлення системи. Конфігурація обробляючих вузлів і розміщені на них компоненти представляються на діаграмі розгортання (Deployment Diagram). На діаграмах розгортання демонструється загальна конфігурація і топологія розподіленої програмної системи. Крім того, на діаграмі зображуються наявні фізичні поєднання – маршрути передачі інформації між апаратними пристроями, задіяними в реалізації системи. Діаграма розгортання містить графічне зображення процесорів, пристроїв і зв'язків між ними.

Моделі UML є артефактами, які можна зберігати і використовувати як електронні документи, або у вигляді твердої копії. UML не є мовою програмування, але в засобах виконання UML-моделей як інтерпретованого коду можлива кодогенерація.

UML, як і будь-який інший інструмент моделювання бізнес-процесів, має свої переваги та недоліки:

1. Мова UML відображає об'єктно-орієнтований підхід, внаслідок чого методи опису результатів аналізу та проектування семантично близькі до методів програмування на сучасних об'єктно-орієнтованих мовах.
2. UML дозволяє описати систему практично з усіх можливих точок зору, а також описати різні аспекти поведінки системи.
3. Методи розширення UML дозволяють вводити власні текстові та графічні стереотипи, що сприяє застосуванню цього методу у різних сферах діяльності.
4. Детальний розгляд саме всього комплексу діаграм UML дозволяє визначити ефективність і надійність процесу, що дуже важливо для усунення недоліків у роботі операторів, які негативно впливають на лояльність клієнтів.
5. Завдяки графічній наочності діаграм UML їх можна використовувати для навчання персоналу, знайомства з оргструктурою компанії оператора-зв'язку та безпосередніми посадовими обов'язками співробітників.

6. Детально розроблені діаграми активності і кооперації сприятимуть виявленню і знищенню «вузьких» місць виробництва та уникнення дублювання функцій.

Недоліками мови UML є:

1. UML часто критикують через її занадто великий обсяг та складність. UML містить багато надмірних або практично невикористовуваних діаграм та конструкцій.

2. В деяких випадках абстрактний синтаксис UML та англійська мова вступають у протиріччя одне одному, в інших випадках вони неповні. Неточність опису самої UML однаково відбивається на користувачах та постачальниках інструментів, призводячи до несумісності інструментів з приводу унікального трактування специфікацій.

3. Тривалість вивчення мови UML та напрацювання навичок проектування і використання діаграм може бути досить великою і потребувати значних зусиль.

3. Кумулятивне навантаження / Неузгодженість навантаження (Cumulative Impedance/Impedance mismatch). Неузгодженість навантаження – термін з теорії системного аналізу для позначення неспроможності входу системи прийняти вихід іншої системи.

4. UML – це мова моделювання загального призначення, яка намагається досягнути сумісності з усіма можливими мовами розробки, шляхи обмеження UML в конкретній області проходять крізь формалізм, який не повністю сформульований, та який і сам є об'єктом критики.

Саме представлення алгоритму програми у графічному вигляді дозволило виявити недоліки первинного проектування та покращити цей алгоритм.

Загальна блок-схема роботи програми відображає такі основні блоки (рис. 4.4):

- підключення бази даних;
- вибір типу обладнання;
- вибір обладнання;
- вибір інформації для відображення;
- виконання SQL запитів;
- побудова графіків;
- занесення записів до бази даних.

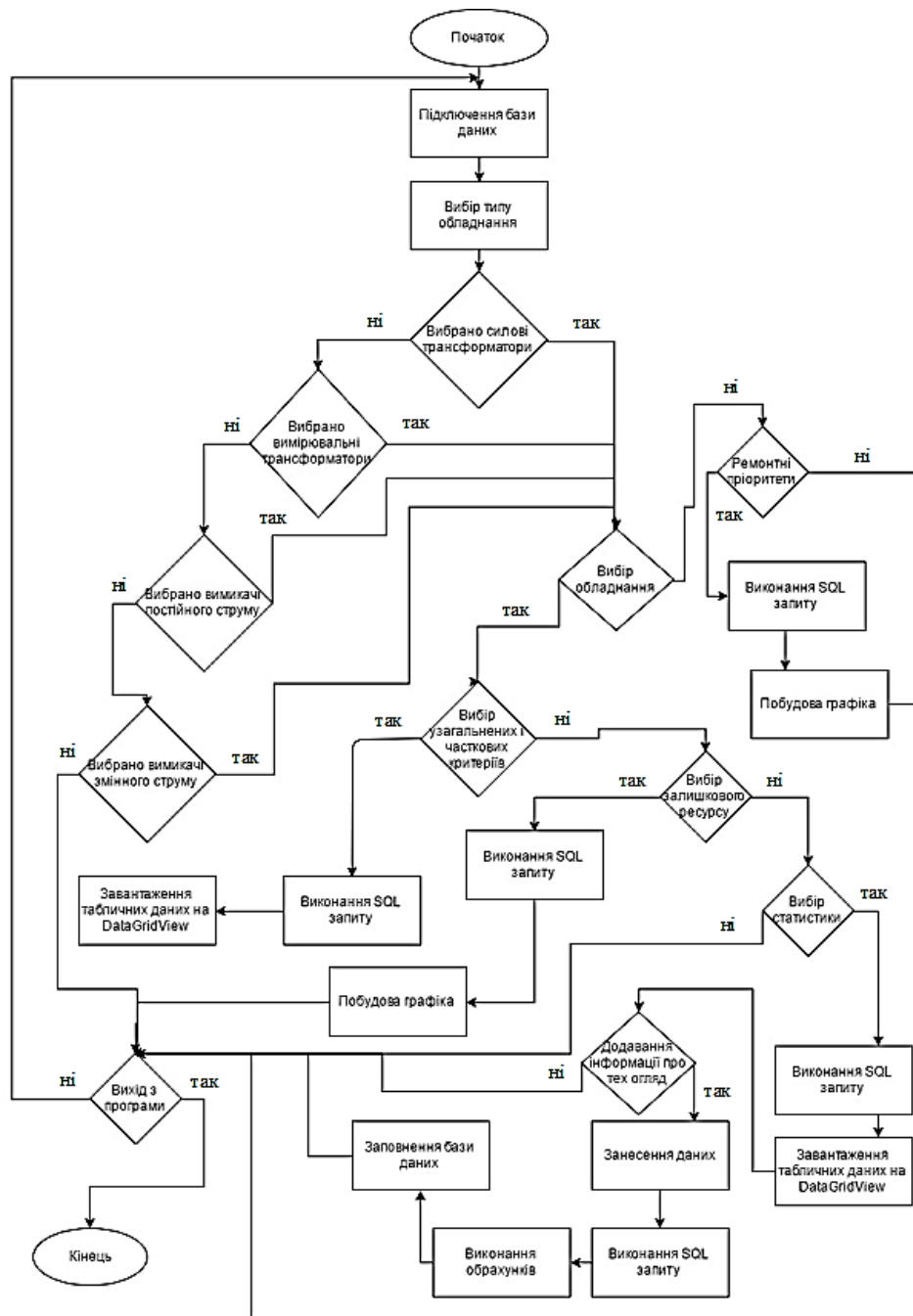


Рисунок 4.4 – Алгоритм загальної роботи програми

Користувача представлено у вигляді актора, що взаємодіє з системою за допомогою варіантів використання. Варіанти використання надають опис можливостей, які система надає акторам.

На діаграмі використані наступні типи відношень між варіантами використання та актором:

- відношення асоціації – відображає зв'язок між актором та варіантом використання. Відображається лінією зі стрілкою між актором і варіантом використання;
- відношення розширення – визначає взаємозв'язок базового варіанта використання з іншим варіантом використання, функціональна поведінка якого задіється базовим не завжди, а тільки при виконанні додаткових умов, позначається пунктирною стрілкою з поміткою «extend»;

- відношення включення – показує, що варіант використання включається в базову послідовність, позначається пунктирною стрілкою з поміткою «include»;
- узагальнення (Generalization) – це відношення, при якому об’єкт спеціалізованого елемента (нащадок) може бути підставлений замість об’єкта узагальненого елемента (предка). При цьому, відповідно до принципів об’єктно-орієнтованого програмування, нащадок (child) успадковує структуру і поведінку свого предка (parent).

Користувач інтерфейсу може виконати наступні варіанти взаємодії з програмою (рис. 4.5):

- додавання нового обладнання;
- виклик довідки;
- вибір типу обладнання;
  - вибір обладнання;
    - перегляд статистики;
      - занесення результатів техогляду;
    - залишковий ресурс;
      - збереження графіка;
    - узагальнені і часткові критерії;
  - перегляд ремонтних пріоритетів;
    - збереження графіка;

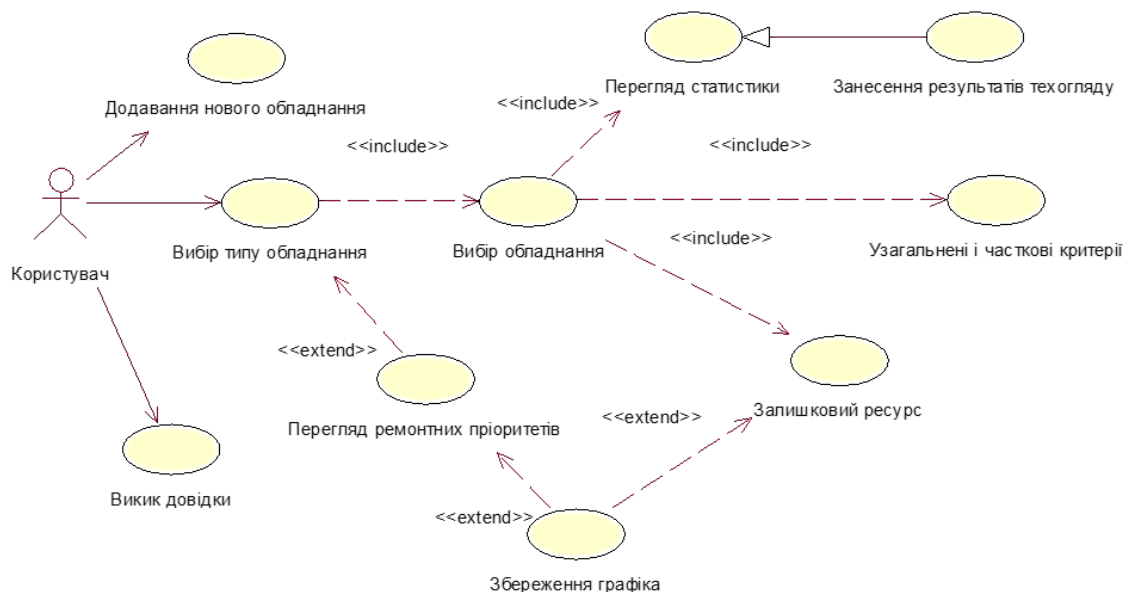


Рисунок 4.5 – Діаграма варіантів використання програми  
 Інтерфейс програми має наступний вигляд: на початку роботи користувач бачить на екрані головне вікно програми (рис. 4.6.)

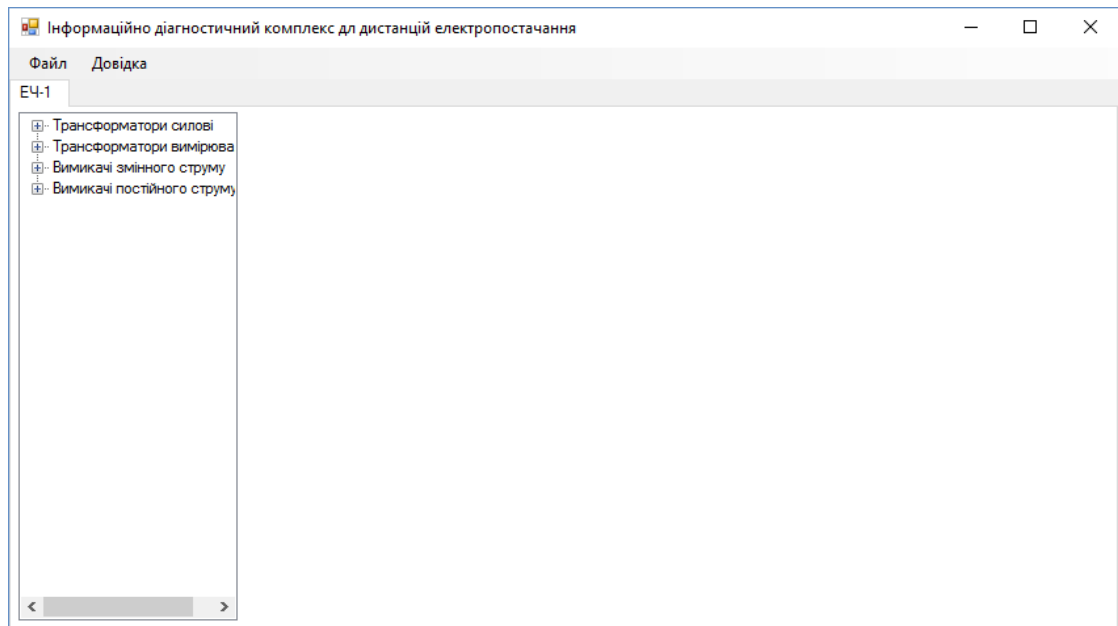


Рисунок 4.6 – Головне вікно програми

Для того, щоб почати виконання розрахунків показників обладнання, користувачу потрібно вибрати певний тип обладнання, після чого вибрати необхідну йому електроустановку(рис. 4.7).

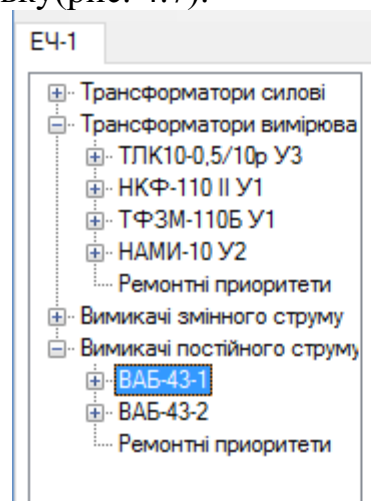


Рисунок 4.7 – Список типів обладнання та його найменувань

Вибравши необхідне обладнання, користувач може вибрати одне з трьох полей: «Статистика», «Узагальнені і часткові критерії», «Залишковий ресурс»(рис. 4.8).

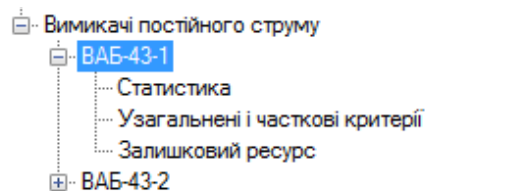


Рисунок 4.8 – Варіанти перегляду інформації обладнання

При виборі пункту «Статистика» відображається зліва відображається панель, на якій відображено дані попередніх техоглядів та поля для вводу нових результатів техогляду(рис. 4.9).

Інформаційно діагностичний комплекс дл дистанцій електропостачання

Файл Довідка

ЕЧ-1

- Трансформатори силові
- Трансформатори вимірювальні
  - ТЛК10-0,5/10р У3
  - НКФ-110 II У1
  - ТФЗМ-110Б У1
  - НАМИ-10 У2
  - Ремонтні пріоритети
- Вимикачі змінного струму
- Вимикачі постійного струму
  - ВАБ-43-1
    - Статистика
    - Узагальнені і часткові критерії
    - Залишковий ресурс
  - ВАБ-43-2
    - Ремонтні пріоритети

Найменування	Натискання головних контактів	Натяг пружин	К-ть відключень	Площа прилягання головних контактів	Провал головного контакту
ВАБ-43-1	27	32	20	76	0,735
ВАБ-43-1	30	35	26	80	1,125
ВАБ-43-1	29	33	40	79	1,04
ВАБ-43-1	31	34	30	77	0,8
ВАБ-43-1	27	32	31	78	0,755
ВАБ-43-1	28	35	45	82	1,2
*					

Натискання головних контактів  Площа прилягання головних контактів

Натяг пружин  Провал головного контакту

К-ть відключень

Рік  Місяць  День

**Додати показники**

Рисунок 4.9 – Панель статистики

Для додавання нових результатів техогляду користувач повинен заповнити всі відображені поля для вводу та натиснути кнопку «Додати показники». Після цього буде виконано всі розрахунки та додавання нових записів до бази даних про результати техогляду та отримані на основі них результати розрахунків(рис. 4.10).

Найменування	Натискання головних контактів	Натяг пружин	К-ть відключень	Площа прилягання головних контактів	Провал головного контакту
ВАБ-43-1	27	32	20	76	0,735
ВАБ-43-1	30	35	26	80	1,125
ВАБ-43-1	29	33	40	79	1,04
ВАБ-43-1	31	34	30	77	0,8
ВАБ-43-1	27	32	31	78	0,755
ВАБ-43-1	28	35	45	82	1,2
*					

Натискання головних контактів  Площа прилягання головних контактів

Натяг пружин  Провал головного контакту

К-ть відключень

Рік  Місяць  День

**Додати показники**

Рисунок 4.10 – Заповнення результатів техогляду

Якщо користувач вибирає пункт «Узагальнені і часткові критерії», то зліва на панелі відображається дві вкладки: таблиця зі значеннями часткових та узагальнених критеріїв, графік зміни узагальнених критеріїв(рис. 4.11).

Інформаційно діагностичний комплекс дл дистанцій електропостачання

Файл Довідка

ЕЧ-1

Критерії Графік зміни

Найменування	d1	d2	d3	d4	d5
▶ ВАБ-43-1	0,413326651	0,4211392	0,723013043	0,483417034	0,403526336
ВАБ-43-1	0,506284237	0,528961957	0,695699453	0,55149895	0,484824121
ВАБ-43-1	0,4708871	0,4525798	0,6241137	0,53492564	0,463804573
ВАБ-43-1	0,5480591	0,4881685	0,6763675	0,500861645	0,4148027
ВАБ-43-1	0,413326651	0,4211392	0,671393752	0,5180393	0,406921
ВАБ-43-1	0,4402524	0,528961957	0,5959329	0,5836332	0,5055535
ВАБ-43-1	0,664096236	0,528961957	0,650936842	0,567740262	0,689144254

Рисунок 4.11 – Панель «Узагальнені і часткові критерії»

На вкладці «Графік зміни» відображається графік узагальнених критеріїв від часу. Також на даній вкладці присутні елементи для вибору іншого обладнання того ж типу та вибір року для порівняння значень візуально(рис. 4.12).

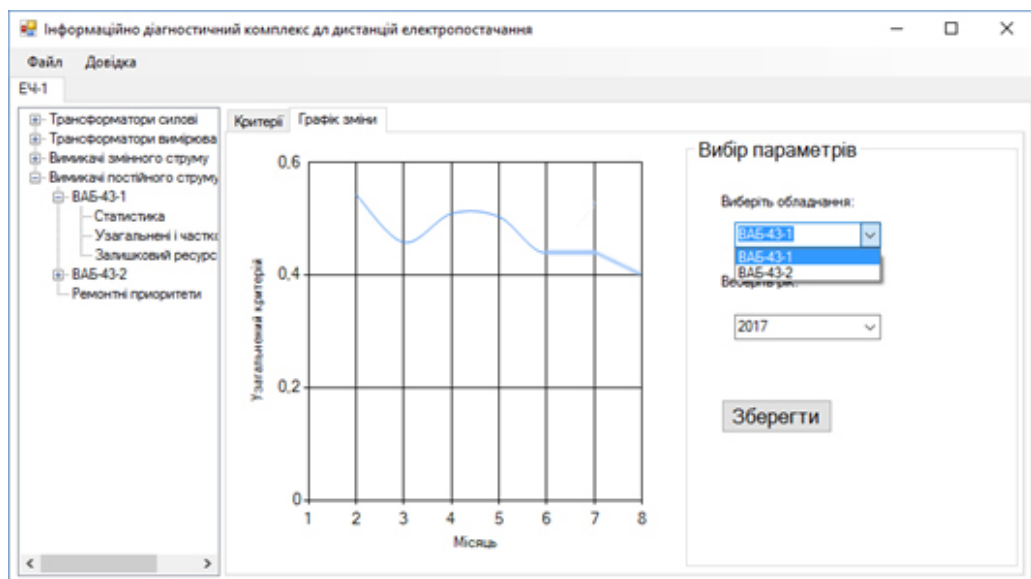


Рисунок 4.12 – Вкладка «Графік зміни»

На даній вкладці знаходиться кнопка «Зберегти» призначена для збереження графіку у файл. Після її натискання з'явиться діалогове вікно де вибравши місце, тип файлу та вписавши назву файлу в порожній рядок натискаємо кнопку «Сохранить»(рис. 4.13).

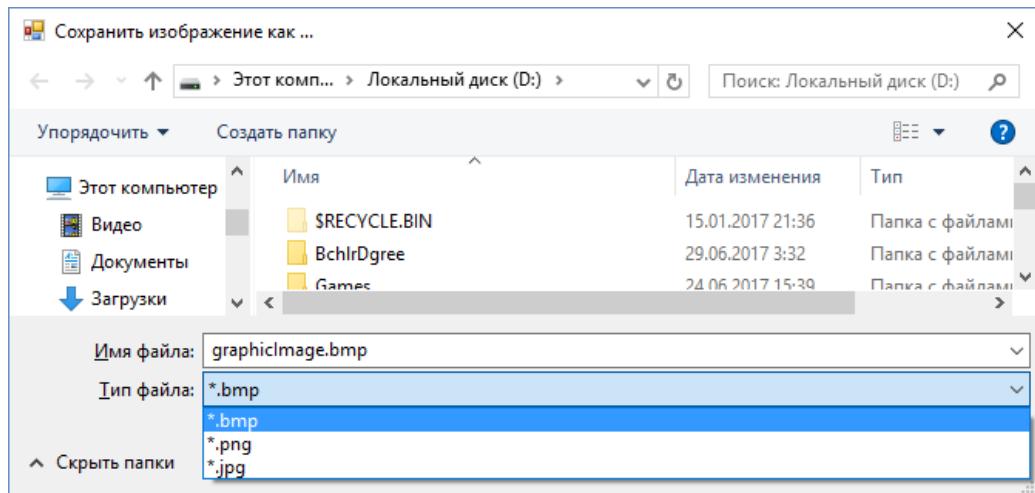


Рисунок 4.13 – Вікно завантаження файлу

#### Висновки до розділу 4

1. Розроблено алгоритм оперативного моніторингу технічного стану ЕО, який дозволяє безперервно вести оцінку поточного технічного стану ЕО і попереджувати аварійні ситуації та відмови контрольованого обладнання на основі аналізу узагальненого показника технічного стану електрообладнання.

2. На основі методики оцінки фактичного залишкового ресурсу електрообладнання розроблена автоматизована система для безперервного моніторингу та розрахунку фактичного залишкового ресурсу, що дозволяє оперативно реагувати на зміну технічного стану контрольованого обладнання і виділяти найбільш критичні одиниці технічного устаткування. Це дає змогу реалізувати систему технічного обслуговування обладнання тягових підстанцій за фактичним технічним станом.

3. Розроблено програмний комплекс моніторингу технічного стану електричного обладнання тягових підстанцій, який дає змогу оперативно оцінювати результати діагностичних вимірів та гнучко планувати графік ремонтних робіт, зменшуючи при цьому час на постановку аналізу та підвищуючи точність постановки діагнозу за рахунок усунення людського фактору та автоматизації процесу.

Основні положення розділу опубліковані в роботах [6, 9].

## 5 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ УЗАГАЛЬНЕНИХ ДІАГНОСТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

### 5.1. Визначення оптимального об'єму і вартості робіт з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій

Удосконалення процесу технічного обслуговування і порядку ведення господарської діяльності передбачають відмову від системи планово-попереджувального ремонту і усунення людського фактору шляхом впровадження систем, що виконують дистанційний автоматизований контроль і діагностування в режимі реального часу і дозволяють виконувати обслуговування об'єктів за їх поточним станом. Оцінка доцільності впровадження таких системи та фінансові витрати на їх впровадження є важливою задачею з точки зору підвищення економічної ефективності системи технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць.

Потребу обладнання у відновленні протягом всього періоду його експлуатації можна забезпечити періодичним виконанням профілактичних оглядів, ремонтів і перевірок, що виконуються у межах послідовних періодично повторюваних ремонтних циклів [141]- [143]. Ремонтний цикл – це час роботи обладнання між черговими капітальними ремонтами. Він містить декілька технічних оглядів, поточних ремонтів, а також перевірки, обслуговування і ревізії [144]. Кількість оглядів, ремонтів і перевірок, що входять у ремонтний цикл, а також послідовність їх виконання становлять структуру ремонтного циклу. Структура ремонтного циклу на прикладі швидкодіючого вимикача постійного струму ВАБ-43 представлена на рис. 5.1.

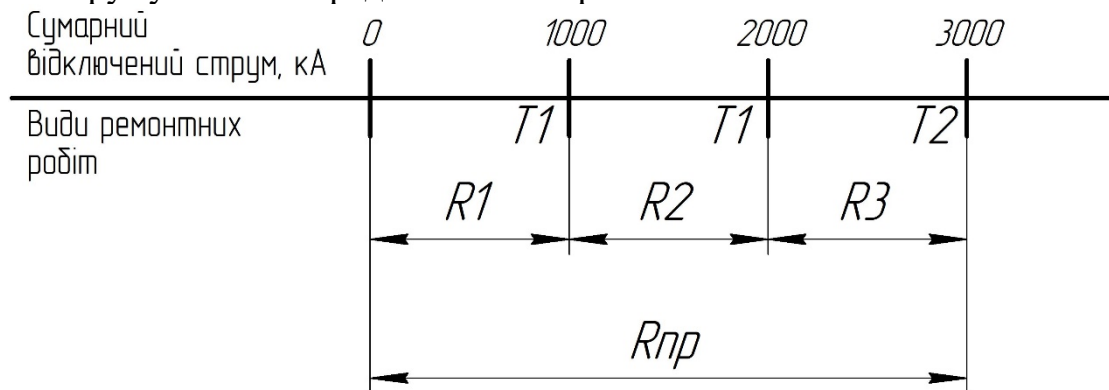


Рисунок 5.1 – Структура ремонтного циклу швидкодіючого вимикача постійного струму ВАБ-43:

$R_1, R_2, R_3$  – міжремонтний ресурс між ремонтами за технічним станом;  
 $R_{пр}$  – міжремонтний ресурс між поточними ремонтами

До структури ремонтного циклу входять наступні роботи [145]:

- огляди вимикачів. На тягових підстанціях з постійним обслуговуючим персоналом проводяться щоденно при зміні чергових, а без такого персоналу – в терміни, встановлені головним інженером ЕЧ, але не рідше, ніж раз на 10 днів;

- $T1$  – ремонт вимикача за технічним станом. Виконується через 1000 кА сумарного відключеного струму, який визначається за показаннями фіксатора-суматора струму;
- $T2$  – поточний ремонт. Виконується через 3000 кА сумарного відключеного струму, який визначається за показаннями фіксатора-суматора струму.

Етап експлуатації обладнання – це один з найважливіших етапів його існування. Від організації технічного обслуговування на цьому етапі і, зокрема, від періодичності проведення технічного обслуговування і ремонтів залежить ефективність його використання. На сьогодні не існує єдиного науково обґрунтованого підходу до цієї проблеми. Виникає нагальна необхідність розробки критеріїв оцінки ефективності ремонтно-діагностичних заходів для електрообладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць. Як критерії оптимізації використовують показники, що їх можна умовно поділити на дві групи: критерії, що прямо не враховують економічні фактори; критерії, що враховують економічні фактори [142]. До першої групи відносять: коефіцієнт готовності; коефіцієнт технічного використання; імовірність безвідмовної роботи на заданому інтервалі; сума простоїв у відмовах і планових ремонтах; випуск продукції за рік. До другої групи критеріїв входять: витрати на експлуатацію; прибуток від експлуатації; витрати на одиницю часу роботи обладнання; витрати на ремонт і технічне обслуговування, віднесені до одиниці продукції. Вибір того чи іншого критерію оптимальності визначається ситуацією на підприємстві, завданнями, що поставлені перед його керівництвом у даний момент [146], [147]. Очевидно, що раціональною буде така організація технічного обслуговування, для якої від кожної одиниці витрат буде отриманий максимальний ефект. В даній роботі в якості критеріїв оцінки ефективності ремонтно-діагностичних заходів вибрані критерії, які належать до двох груп: критерії, що враховують економічні фактори, та коефіцієнт технічного використання обладнання. Розрахунок критеріїв ефективності проведений для швидкодіючих вимикачів постійного струму ВАБ-43 ЕЧ-2 «НД-Вузол».

Кожному типу електрообладнання відповідає свій перелік ремонтно-діагностичних робіт. Тому, знаючи конкретну одиницю електрообладнання, яка потребує проведення технічного обслуговування або ремонту, легко визначити кількісний та якісний склад робіт. Кожний вид ремонтно-профілактичних робіт характеризується часом, кількістю обслуговуючого персоналу та витратами на матеріали, деталі та вузли, а також іншими витратами. Об'єм ремонтних робіт характеризується витратами, які зручно виражати в грошовому еквіваленті та трудомісткістю, виміряною в людино-годинах.

Трудомісткість робіт по технічному обслуговуванню і ремонту та діагностуванню електрообладнання для однієї одиниці устаткування визначається за формулою [141]:

де  $n_j$  - кількість осіб, що проводять даний вид робіт над  $j$ -ою одиницею обладнання;

$t_j$  - час, необхідний для проведення даного виду робіт.

Час, необхідний для проведення ремонтно-профілактичних робіт, в свою чергу можна представити у наступному вигляді:

(5.2)

де  $t_{dj}$  - витрати часу на проведення діагностування одиниці обладнання ;

$t_{zr}$  - витрати часу на проведення збірно-розбірних робіт;

$t_{us}$  - витрати часу на усунення несправності устаткування;

$t_{of}$  - витрати часу на оформлення технічної документації за результатами проведених діагностичних і ремонтних робіт.

Роботи по діагностуванню та технічному обслуговуванню електроустаткування проводяться персоналом тягової підстанції згідно графіка ремонтно-профілактичних робіт.

Час на проведення збірно-розбірних робіт  $t_{zr}$  при ремонтах за технічним станом і поточних ремонтах згідно з [148] складає відповідно 1,85 год та 6,18 год. При цьому ремонти за технічним станом проводяться не рідше 4 разів на рік, а поточний ремонт – не рідше 2 разів на рік. Складовими даних часових витрат є, власне, витрати на проведення збірно-розбірних робіт, витрати на підготовчо-заклучні дії (8,3% від оперативного часу), витрати на обслуговування робочого місця (5,4% від оперативного часу) та витрати на відпочинок і власні потреби (3,8% від оперативного часу). Час на усунення несправності устаткування згідно з технічними умовами на швидкодіючий вимикач постійного струму складає від 6,25 год до 8 год. Ці складові загального часу проведення ремонтно-профілактичних робіт  $t_{dj}$  будуть однакові при існуючій системі технічного обслуговування електроустаткування та при використанні автоматизованої системи моніторингу технічного стану обладнання тягових підстанцій.

Час на проведення діагностування  $t_{of}$  швидкодіючого вимикача ВАБ-43 складає 30 хв та включає наступні роботи: вимір діагностичних показників (15 хв), заповнення протоколу проведення робіт (1 хв) та постановка діагнозу і визначення об'єму робіт (14 хв). З використанням автоматизованої системи витрати часу на проведення даних робіт будуть наступними: вимір діагностичних показників - 15 хв (при наявності датчиків виміру параметрів електрообладнання з передачею інформації в АСУ ТП цей час можна значно скоротити, так як програмний комплекс дає змогу автоматично отримувати результати вимірювань з АСУ ТП), заповнення протоколу проведення робіт шляхом введення їх в електронну форму автоматизованого комплексу - 0,5 хв, постановка діагнозу і визначення об'єму робіт автоматизованим комплексом з виведенням результатів на екран – 0,03 хв. Таким чином, увесь час проведення діагностування  $t_{dj}$  з використанням автоматизованої системи складе 15,53 хв

Витрати часу на оформлення технічної документації за результатами проведених діагностичних і ремонтних робіт при існуючій системі технічного обслуговування електроустаткування складає 75 хв і включає наступні види робіт [22]:

- заповнення протоколів випробувань і ремонтів;
- коригування графіка ремонтно-профілактичних робіт;
- заповнення книги виконаних робіт, форма ЕУ-83а;
- заповнення книги оглядів і несправностей, форма ЕУ-83;
- заповнення актів про пошкодження на тяговій підстанції, форма ЕУ-92;
- заповнення бланків нарядів на роботи в електроустановках, форма ЕУ-44;
- заповнення журналу заявок на виведення у ремонт електрообладнання;
- заповнення журналу обліку робіт за нарядами і розпорядженнями.

Автоматизована система моніторингу технічного стану обладнання тягових підстанцій дозволяє скоротити час до 30 хв за рахунок автоматизованого формування частини технічної документації.

Загальний час, необхідний для проведення ремонтно-профілактичних робіт за один рік, для двох варіантів виконання складе:

- при існуючій системі технічного обслуговування електроустаткування:
- з використанням автоматизованої системи моніторингу технічного стану електрообладнання:

Таким чином, використання автоматизованої системи моніторингу технічного стану електрообладнання в процесі технічного обслуговування електрообладнання дозволяє скоротити час на проведення робіт для одного швидкодіючого вимикача ВАБ-43 за рік на 6 год. В межах однієї дистанції електропостачання розташовуються приблизно 20 тягових підстанцій постійного струму з середнім числом швидкодіючих вимикачів біля 120. При цьому загальний час, який витрачається на виконання ремонтно-профілактичних робіт в рік, скоротиться з 3631,2 год до 2917,56 год.

Розрахуємо значення коефіцієнта технічного використання для швидкодіючих вимикачів ВАБ-43. В якості вихідних даних для розрахунку та подальшої оцінки динаміки зміни коефіцієнта для варіанту технічного обслуговування з використанням автоматизованого комплексу та за існуючої системи технічного обслуговування були використані дані експлуатації швидкодіючих вимикачів тягової підстанції «НД-Вузол» (табл. 5.1, табл. 5.2).

**Таблиця 5.1 - Вихідні дані для розрахунку при існуючій системі технічного обслуговування і ремонту**

Показник	ФА-5А	ФА-7	ФА-3А	ФА-9
Термін експлуатації, год	43800	43800	43800	43800
Кількість відмов	1	2	3	5

Термін відновлення , нормо-годин	8	8	8	8
Термін виконання планового ремонту ( враховано час на ПР і міжремонтні випробування) , нормо-годин	30,26	30,26	30,26	30,26

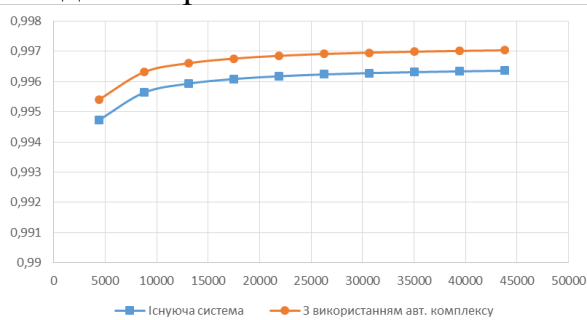
**Таблиця 5.2 - Вихідні дані для розрахунку з використанням автоматизованого комплексу моніторингу технічного стану обладнання**

Показник	ФА-5А	ФА-7	ФА-3А	ФА-9
Термін експлуатації, год	43800	43800	43800	43800
Кількість відмов	1	2	3	5
Термін відновлення , нормо-годин	8	8	8	8
Термін виконання планового ремонту ( враховано час на ПР і міжремонтні випробування) , нормо-годин	24,313	24,313	24,313	24,313

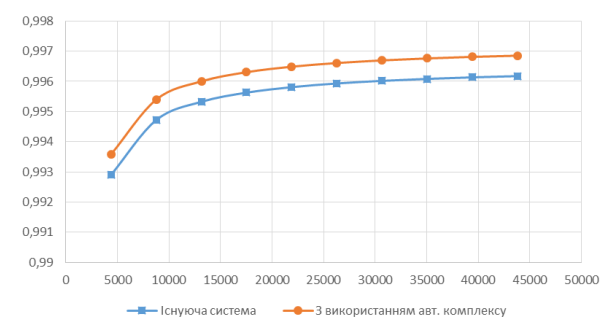
Розрахуємо значення для швидкодіючих вимикачів для обох випадків за наступним виразом:

де – термін збереження працездатності в  $i$ -му циклі функціонування,  
 , – термін відновлення об'єкта, – термін виконання планового ремонту і міжремонтних випробувань.

За результатами розрахунку побудуємо суміщені графіки коефіцієнтів технічного використання швидкодіючих вимикачів для існуючої системи технічного обслуговування обладнання і для системи з використанням автоматизованого комплексу. Графіки коефіцієнтів технічного використання наведені на рис. 5.2 – 5.5.



**Рисунок 5.2 – Графік для швидкодіючого вимикача ВАБ-43 ФА-5А**



**Рисунок 5.3 – Графік для швидкодіючого вимикача ВАБ-43 ФА-7**

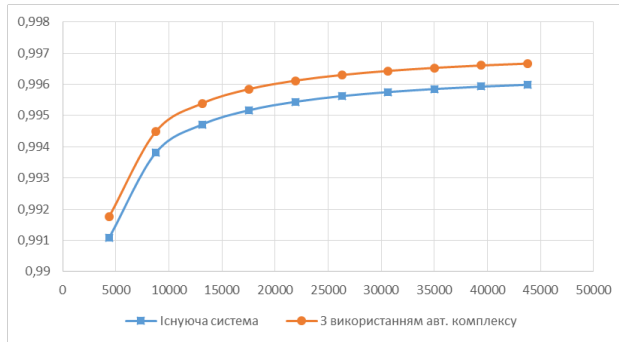


Рисунок 5.4 – Графік для швидкодіючого вимикача ВАБ-43 ФА-3А

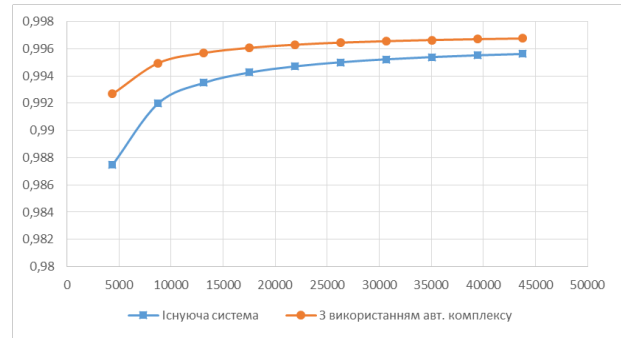


Рисунок 5.5 – Графік для швидкодіючого вимикача ВАБ-43 ФА-9

Результати розрахунків комплексних показників експлуатаційної надійності силового обладнання ТП (рис. 5.2 – 5.5) вказують на їх збільшення за рахунок використання автоматизованого комплексу в системі технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій.

Визначимо трудомісткість робіт по технічному обслуговуванню і ремонту для одного швидкодіючого вимикача за виразом (5.1), прийнявши до уваги, що кількість осіб, що виконує роботу, згідно [148] складає 2 людини (електромеханік та електромонтер 4 розряду тягової підстанції):

- при існуючій системі технічного обслуговування електроустаткування:
- з використанням автоматизованої системи моніторингу технічного стану електрообладнання:

Сумарна трудомісткість робіт по технічному обслуговуванню і ремонту електрообладнання для декількох одиниць електроустаткування залежить від їх кількості [149]:

(5.3)

де  $T_j$  - трудомісткість робіт по технічному обслуговуванню і ремонту та діагностуванню електрообладнання для  $j$ -ої одиниці устаткування.

Визначимо сумарну трудомісткість робіт по технічному обслуговуванню і ремонту для швидкодіючих вимикачів дистанції електропостачання в цілому за виразом (5.3):

- при існуючій системі технічного обслуговування електроустаткування:
- з використанням автоматизованої системи моніторингу технічного стану електрообладнання:

Для визначення загальної вартості робіт по технічному обслуговуванню і ремонту електрообладнання необхідно виразити трудомісткість, розраховану за виразом (5.1), в грошовому еквіваленті. Це можна зробити наступним чином:

(5.4)

де - питома вартість однієї години робіт;  
 - сумарна трудомісткість робіт по технічному обслуговуванню і ремонту електрообладнання.

Визначимо загальну вартість робіт по технічному обслуговуванню і ремонту для швидкодіючих вимикачів дистанції електропостачання в цілому за виразом (5.4), прийнявши питому вартість робіт в розмірі 33,53 грн/год (з розрахунку ставки електромеханіка 5600 грн за 167 годинний робочий місяць):

- при існуючій системі технічного обслуговування електроустаткування:
- з використанням автоматизованої системи моніторингу технічного стану електрообладнання:

Таким чином, використання автоматизованої системи моніторингу технічного стану електрообладнання в процесі технічного обслуговування електрообладнання дистанції електропостачання дозволяє зменшити фінансові витрати на 47878 грн/рік.

5.2. Економічний ефект від впровадження автоматизованої системи моніторингу технічного стану обладнання тягових підстанцій

Оцінка економічної доцільності проводиться за трьома показниками: експлуатаційні витрати за рік, річний економічний ефект та строк окупності [150]. Даними для розрахунку капітальних вкладень і експлуатаційних витрат служать конструктивні параметри та експлуатаційні показники порівнюваних варіантів техніки. Експлуатаційні витрати складаються з витрат на утримання, витрати на матеріали та запасні частини, електроенергію, а також витрати на амортизацію. Отже, експлуатаційні витрати на систему технічного обслуговування і ремонту можна визначити за формулою [151]:

(5.5)

де - загальна вартість робіт по технічному обслуговуванню і ремонту електрообладнання;

- соціальні нарахування на основний фонд заробітної плати;
- витрати на матеріали і запасні частини;
- витрати на електроенергію;
- амортизаційні відрахування.

Нарахування на заробітну плату становить 37,83 % від заробітної плати основного фонду, з яких 32 % – пенсійний збір, 2,9 % – соціальне страхування, 1,9 % – відрахування до фонду безробіття і страхування нещасних випадків 1,03 %. Нарахування на заробітну обчислюється за формулою:

(5.6)

де

Тоді нарахування на заробітну плату складають для існуючої системи ТО і Р 92127,24 грн.; з використанням автоматизованої системи моніторингу технічного стану електрообладнання – 74015 грн.

Витрати на матеріали й запасні частини складає 2% від вартості автоматизованої системи. Автоматизована система конструктивно складається

з персональних комп'ютерів – робочих клієнтів, які встановлюються на тягових підстанціях, та сервера, встановленого на дистанції електропостачання.

Між собою робочі клієнти та сервер з'єднуються за допомогою локальної мережі. Капіталовкладення на впровадження даної системи складаються з витрат на персональні комп'ютери у розмірі 2500 грн. за одиницю та витрат на створення локальної мережі у розмірі 10000 грн., тому

для існуючої системи ТО і Р становлять 0 грн.

До експлуатаційних витрат відносяться амортизаційні нарахування і вартість електричної енергії. Норми амортизаційних нарахувань визначаються на основі вартості устаткування і складаються з відрахувань на відновлення, заміну й капітальний ремонт. Щорічні амортизаційні відрахування становлять 5% від вартості комплексу. Таким чином, амортизаційні витрати на

експлуатацію автоматизованої системи складуть 3150 грн. для існуючої системи ТО і Р становлять 0 грн.

Витрати на електроенергію визначаються за формулою:

(5.7)

- де
- потужність персонального комп'ютера (300 Вт);
  - вартість 1 кВт/год електроенергії (1,57 грн.);
  - час, витрачений на проведення робіт з ТО і Р.

Таким чином, витрати на електроенергію для експлуатації автоматизованої системи моніторингу технічного стану електрообладнання складуть:

для існуючої системи ТО і Р становлять 0 грн.

Тепер визначимо експлуатаційні витрати за виразом (5):

- при існуючій системі технічного обслуговування електроустаткування:
- з використанням автоматизованої системи моніторингу технічного стану електрообладнання:

**Таблиця 5.1 – Експлуатаційні витрати на систему ТО і Р обладнання тягових підстанцій**

Стаття витрат	Існуюча система ТО і Р	Система ТО і Р з використанням автоматизованого комплексу
загальна вартість робіт по технічному обслуговуванню і ремонту електрообладнання, грн.	243529,58	195651,57
соціальні нарахування на основний фонд заробітної плати, грн.	92127,24	74015
витрати на матеріали і запасні частини, грн.	0	1260

витрати на електроенергію, грн.	0	45,03
амортизаційні відрахування, грн.	0	3150
експлуатаційні витрати, грн.	335656,82	274121,60

Річний економічний ефект від впровадження нової техніки розраховується з урахуванням сумарної економії всіх видів продуктивних ресурсів одержаної в результаті виробництва й експлуатації впроваджуваного пристрою, спрямованого на автоматизацію виробництва [151], [152], що забезпечує економію виробничих ресурсів, визначається як різниця витрат по базовій і новій техніці:

(5.8)

де

- експлуатаційні витрати на існуючу систему ТО і Р;
- експлуатаційні витрати на систему ТО і Р з використанням автоматизованого комплексу;
- капітальні витрати на впровадження автоматизованої системи;
- коефіцієнт ефективності капітальних витрат ( для обчислювальної техніки).

Таким чином, річний економічний ефект від впровадження автоматизованої системи моніторингу технічного стану електрообладнання буде рівним:

Строк окупності автоматизованої системи моніторингу технічного стану електрообладнання визначимо за формулою:

(5.9)

Підставивши відповідні значення у формулу (9) отримаємо:

При наявності на тягових підстанціях персональних комп'ютерів капіталовкладення на впровадження даної системи складаються з витрат на створення локальної мережі для даної системи у розмірі 10000 грн., тому

Річний економічний ефект від впровадження автоматизованої системи моніторингу технічного стану електрообладнання та строк її окупності в цьому випадку буде дорівнювати:

Таким чином, річний економічний ефект від впровадження автоматизованої системи моніторингу технічного стану електрообладнання та строк її окупності для двох варіантів виконання автоматизованого комплексу відповідають вимогам нормативних значень для електронно-обчислювальної техніки.

### **Висновки до розділу 5**

1. Визначено, що застосування автоматизованої системи моніторингу технічного стану електрообладнання в процесі технічного обслуговування і ремонту устаткування тягових підстанцій дає змогу значно скоротити оперативний час на проведення ремонтно-профілактичних робіт шляхом зменшення часу на проведення діагностичних вимірювань (при наявності датчиків контролю діагностичних параметрів електрообладнання), обробку їх результатів та постановку діагнозу з подальшим плануванням об'єму робіт до 700 год на рік в межах однієї дистанції електропостачання.

2. Встановлено, що використання автоматизованої системи моніторингу технічного стану електрообладнання в процесі технічного обслуговування електрообладнання дистанції електропостачання дозволяє зменшити фінансові витрати на 47878 грн/рік в межах однієї дистанції електропостачання.

3. Визначено, що строк окупності автоматизованого комплексу при його впровадженні лише для одного типу обладнання для дистанції електропостачання в цілому складає 6,3 роки при відсутності персональних комп'ютерів та 4,35 роки при їх наявності. При впровадженні комплексу для всіх типів електрообладнання ТП витрати на проведення ремонтно-профілактичних робіт та строк окупності можна значно скоротити.

Основні положення розділу опубліковані в роботі [10].

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних і експериментальних досліджень вирішена актуальна науково-технічна задача підвищення ефективності системи технічного обслуговування і ремонту електрообладнання тягових підстанцій. Основні наукові результати та висновки полягають в такому.

1. Проведене дослідження показує що існуюча система ППР стала неадекватною економічним умовам функціонування системи тягового електропостачання та експлуатації силового обладнання ТП електрифікованих залізниць і увійшла до протиріччя з ринковими механізмами виробничо-господарської діяльності об'єктів господарства електропостачання Укрзалізниця. На сучасному етапі розвитку залізниць України удосконалення системи ТО і Р електроустаткування ТП стає однією з основних задач підвищення надійності тягового електропостачання та вирішення проблеми скорочення витрат на ТО і ремонт.

2. Виконано структурно-функціональний аналіз процесу ТО і Р електрообладнання і розроблена структурно-функціональна модель процесу. Встановлено, що увагу необхідно приділити підпроцесу непланових аварійних ремонтів електрообладнання ТП, так як він вимагає додаткових фінансових і матеріальних затрат та включає в себе найбільший об'єм ремонтно-профілактичних робіт і, відповідно, найбільшу кількість підпроцесів для виконання.

3. Визначено, що аналітичний вираз зміни узагальненого показника технічного стану має вигляд нелінійного поліному другого порядку. Доведено, що використання математичних методів теорії планування експерименту дозволяє побудувати математичну модель зміни узагальненого показника технічного стану з досить високою точністю отримання вихідного результату (значення середньоквадратичного відхилення для різних типів силового обладнання тягових підстанцій коливається в межах від 0,002254 до 0,002978).

4. Запропоновано підхід до пріоритетного планування ремонтно-профілактичних робіт на основі оцінки фактичного залишкового ресурсу електрообладнання з використанням узагальнених показників технічного стану, що дозволяє обґрунтовано встановити черговість проведення ремонтно-профілактичних робіт для парку однотипного обладнання.

5. Розроблено методику оцінки узагальненого залишкового ресурсу електрообладнання, яка передбачає введення додаткової оцінки залишкового ресурсу агрегату на основі використання узагальненого показника технічного стану електрообладнання. Це дає змогу отримання узагальненої оцінки залишкового ресурсу електрообладнання з урахуванням максимально можливого спектру експлуатаційних показників електроустаткування.

6. На основі методики оцінки фактичного залишкового ресурсу електрообладнання розроблена автоматизована система для безперервного моніторингу та розрахунку фактичного залишкового ресурсу, що дозволяє

оперативно реагувати на зміну технічного стану контрольованого обладнання і виділяти найбільш критичні одиниці технічного устаткування.

7. Розроблено програмний комплекс моніторингу технічного стану електричного обладнання тягових підстанцій, який дає змогу оперативно оцінювати результати діагностичних вимірів та гнучко планувати графік ремонтних робіт, зменшуючи при цьому час на аналіз результатів діагностування та постановку діагнозу на 700 год на рік в межах однієї дистанції електропостачання та підвищуючи точність постановки діагнозу за рахунок усунення людського фактору та автоматизації процесу.

8. Встановлено, що використання автоматизованої системи моніторингу технічного стану електрообладнання в процесі технічного обслуговування електрообладнання дистанції електропостачання дозволяє зменшити фінансові витрати на 47878 грн/рік в межах однієї дистанції електропостачання.

9. Визначено, що строк окупності автоматизованого комплексу при його впровадженні лише для одного типу обладнання для дистанції електропостачання в цілому складає 6,3 роки при відсутності персональних комп'ютерів та 4,35 роки при їх наявності. При впровадженні комплексу для всіх типів електрообладнання ТП витрати на проведення ремонтно-профілактичних робіт та строк окупності можна значно скоротити.

## БІБЛІОГРАФІЯ

1. *Аналіз роботи господарства електрифікації в 2014 році. Департамент електрифікації.* Київ: ТОВ ВД "Мануфактура", 2015.
2. *Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2015 році. Департамент електропостачання.* Київ: ТОВ «ВД «Мануфактура», 2016.
3. О.О. Матусевич, Д. В. Міронов, «Дослідження експлуатації силового обладнання системи тягового електропостачання залізниць», *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*, № 6(54), с. 78-86, 2015
4. О.О. Матусевич, Д. В. Міронов, «Математична модель ризик – аналізу технічного стану силового обладнання тягових підстанцій», *Гірнича електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб.*, № 93, с. 48-50, 2014.
5. О.О. Матусевич, Д. В. Міронов, «Методика проведення ризик-аналізу технічного стану обладнання тягових мереж», *Електрифікація транспорту*, № 9, с. 115-123, 2015.
6. Д. В. Міронов, В. Г. Сиченко, О. О. Матусевич, «Автоматизована система моніторингу та прогнозування фактичного залишкового ресурсу обладнання тягових підстанцій», *Електротехніка і електромеханіка*, № 4, с. 51-63, 2016
7. Viktor Sychenko, Dmytro Mironov, Andrzej Białoń, «Structural – functional model of maintenance and repair of the traction substations equipment», *Technika transportu szhinowego*, No.11, pp. 49-52, 2017.
8. Viktor Sychenko, Dmytro Mironov, «Development of a mathematical model of the generalized diagnostic indicator on the basis of full factorial experiment» *Archives of Transport*, Volume 43, No. 3, Pp. 125-133, 2017.
9. Д. В. Міронов, В. Г. Сиченко, О. О. Матусевич, «Автоматизована система моніторингу та прогнозування технічного стану обладнання тягових підстанцій», Патент на корисну модель №114608, 2017.
10. В. Г. Сиченко, Д. В. Міронов, «Оцінка ефективності автоматизованої системи моніторингу технічного стану обладнання тягових підстанцій», *Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"*, Вып. 27 (1249), с. 440-444, 2017.
11. Д. В. Міронов, «Удосконалення технічного обслуговування обладнання тягових мереж на основі процесного підходу», *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*, № 6(54), с. 78-86, 2014.
12. Д. В. Міронов, «Удосконалення системи ТО і Р обладнання тягових підстанцій з використанням узагальнених критеріїв», *ЕНЕРГЕТИКА: економіка, технології, екологія*, № 3 (41), с. 107-116, 2015.
13. О. О. Матусевич, *Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій*, Дніпропетровськ: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015.
14. Г. В. Дружинин, *Надежность автоматизированных систем*, Москва: «Энергия», 1977.

15. И. А. Бабенко, «Внедрение системы технического обслуживания по фактическому состоянию машинного парка завода», *Материалы научно-технических проектов молодых специалистов НК ЮКОС*, 2001.
16. В.М. Гуменюк, *Надежность и диагностика электротехнических систем: Учеб. пособие для вузов*, Владивосток: Изд-во Дальневост. гос. техн. ун-та, 2010.
17. Ю.В. Малышенко, Л.Ф. Стыцюра, Ю.Л. Саяпин, *Техническая диагностика*, Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2010.
18. Э. К. Николаева, *Семь инструментов качества в японской экономике*, М.: Издательство стандартов, 1990.
19. В. А. Савельев, «Проблемы и пути повышения надежности электротехнического оборудования», *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики*, вып. 39, с. 140–172, 1992.
20. ГОСТ 18322-78 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения», Москва : Стандартинформ, 2007.
21. «Правила технічної експлуатації залізниць України [Текст]. Затв.: Наказ Міністерства транспорту України від 20.12.96 № 411, зареєстр. у Міністерстві юстиції України 25.02.97 за № 50/1854», Київ, 1996.
22. «Інструкція з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць», Київ, 2007.
23. А.Б. Алексеев, «Оптимизация профилактического обслуживания оборудования ВН», *Энергоэксперт*, № 1, 2010.
24. Н. Н. Синягин, *Система планово-предупредительного ремонта оборудования и сетей промышленной энергетики*, М. : Энергоатомиздат, 1984.
25. Н. А. Афанасьев, *Система технического обслуживания и ремонта оборудования энергохозяйств промышленных предприятий (система ТОР ЭО)*, М. : Энергоатомиздат, 1989.
26. М. Кутин, О.И. Кульматицкий, *Диагностика электрических распределительных сетей*, Киев: Техника – 1993.
27. Я.Д. Баркан, *Эксплуатация электрических систем*, М.: Высш.шк., 1990.
28. П.М. Сви, *Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения*, М.: Энергоатомиздат. 1992.
29. Л.Е. Басовский, В.Б. Протасьев *Управление качеством*, М1: ИНФРА-М, 2000.
30. О.П. Глудкин и др., *Всеобщее управление качеством*, М.: Радио и связь, 1999.
31. А.В. Гличев, *Основы управления качеством продукции*, М.: Изд-во АМН; 1998.
32. В.Г. Григорович и др., *Информационные методы в управлении качеством*, М: Стандарты и качество, 2001.

33. В.И. Гиссин, *Управление качеством продукции*, Ростов н/Д: Феникс, 2000.
34. М.З. Свиткин и др., *Менеджмент качества продукции на основе международных стандартов ИСО*, СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 1999.
35. ГОСТ 28.001-83 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Основные положения».
36. ГОСТ 21623-76 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Показатели для оценки ремонтпригодности. Термины и определения»
37. ГОСТ 23660-79 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Обеспечение ремонтпригодности при разработке изделий»
38. ГОСТ 20831 – 75 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Порядок проведения работ по оценке качества отремонтированных изделий»
39. А.В. Владимирцев и др., «Внедрение процессной модели на предприятиях», *Методы менеджмента качества*, -№8, с. 15-21, 2002.
40. В.Г. Елиферов, «Внедрение и сертификация системы менеджмента качества по стандарту ИСО 9001:2000», *Методы менеджмента качества*, №12, С. 17-20, 2002.
41. В.В. Репин, «Два понимания процессного подхода к управлению предприятием», *Методы менеджмента качества*, № 4, С. 4-9, 2003.
42. М.З. Свиткин, «Процессный подход при внедрении систем менеджмента качества в организации», *Стандарты и качество*, № 3, С. 74-77, 2002.
43. ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения», Москва : Изд-во стандартов, 1989.
44. В. Г. Кузнецов и др., *Надійність і діагностика пристроїв тягового електропостачання*, Дніпропетровськ : Вид-во Маковецький О. В., 2009.
45. А. В. Мозгалевский, Д. В. Гаскаров *Техническая диагностика (Непрерывные объекты)*, Москва : Высшая шк., 1975.
46. П. П. Пархоменко, *Основы технической диагностики (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства)*, Москва: Энергия, 1981.
47. Н.И. Новицкий, *Организация производства на предприятиях*, М. : Финансы и статистика, 2002.
48. З.Н. Нейман, *Внутризаводское технико-экономическое планирование на машиностроительном предприятии*, Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982.
49. В. Blachard, *Logistical Engineering and Management*, Prentice Hall, 1985.
50. П.Н. Шуляк, *Финансы предприятия*, М.: Издательский Дом " Дашков и К0", 2000.

51. А.В.Мозгалеvский, А.Н.Койда, *Вопросы проектирования систем диагностирования*, Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985.
52. Ю.П. Липунцов, *Управление процессами. Методы управления предприятием с использованием информационных технологий*, М.: ДМК Пресс; М.: Компания АйТи, 2003.
53. С. А. Митрофанов, «Методика статистического анализа для выявления индикативных показателей производственно-финансовой деятельности электроснабжающих предприятий», *Вестник Самарского муниципального института управления*, № 11, с. 20–26, 2009.
54. С. А. Митрофанов, «Процессный анализ структуры и управления производственно-экономической деятельностью предприятий энергетического хозяйства железнодорожного транспорта», *Вестник Самарского муниципального института управления : теор. и науч.-метод. Журнал*, № 10, с. 89–100, 2009.
55. С. В. Кирисов, *Теория и практика применения процессного подхода к управлению качеством деятельности организации*, Тамбов : Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2009.
56. R. J. Mayer, P. S. de Witte, «Delivering results: Evolving BPR from art to engineering», *IDEF: Integrated DEFinition Methods*, 54 p.
57. А. Г. Галкин, А. Н. Митрофанов, С. А. Митрофанов, *Математическое моделирование и информационные технологии в задачах диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог*, Екатеринбург:УрГУПС, 2012.
58. O. Matuskevych, V. Sychenko, A. Bialon, «Continuous improvement of technical servicing and repair system of railway substation on the basis of FMEA methodology», *Technika Transportu Szynowego*, № 1-2, pp. 75—79, 2016.
59. «Державний стандарт України ДСТУ ISO 9001:2009. Системи управління якістю. Вимоги», К. : Держспоживстандарт України, 2009.
60. Л.Н. Драгун, *Совершенствование управления экономикой ремонтного производства (теория и практика)*, Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1985.
61. А.М. Касимов, *Совершенствование ремонтного производства на предприятии*, М.: Экономика, 1985.
62. В. В. Пшенников и др., «Качество через ТРМ, или О предельной эффективности промышленного оборудования», *Методы менеджмента качества*, № 10, С. 5–11, 2001.
63. James Champy, *Reengineering Management*, NY : HarperCollins Publishers, 1995.
64. М. Робсон, Ф. Уллах, *Практическое руководство по реинжинирингу бизнес-процессов*, М.: Аудит, ЮНИТИ, 1997.
65. Ю. М. Быков, *Процессный подход при внедрении систем менеджмента качества в соответствии со стандартами ИСО серии 9000*, Волгоград : РПК "Политехник", 2004.

66. К.В. Балдин, С.Н. Воробьев, *Управленческие решения: Теория и практика принятия*, М.: Проект, 2004.
67. ГОСТ Р 50.1.028—2001, «*Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методологиям функционального моделирования*», М: ИПК Издательство стандартов, 2001.
68. А.Н. Калашян, Г.Н. Калянов, *Структурные модели бизнеса: DFD-технологии*, М.: Финансы и статистика, 2003.
69. Д. Марка, К. МакГоуэн, *Методология структурного анализа и проектирования*, М.: МетаТехнология, 1993.
70. С.В. Черемных, И.О.Семенов, В.С. Ручкин, *Моделирование и анализ систем: IDEF-технологии: практикум*, М.: Финансы и статистика, 2002.
71. С.В. Черемных, И.О.Семенов, В.С. Ручкин, *Структурный анализ систем: IDEF-технологии*, М.: Финансы и статистика, 2001.
72. А.В. Мозгалеvский, Д. В. Гаскаров, *Техническая диагностика (непрерывные объекты)*, М.: Высш. школа, 1975.
73. Б.И. Доценко, *Диагностирование динамических систем*, К.: Техника, 1983.
74. И.А. Биргер, *Техническая диагностика*, М.: Машиностроение, 1978.
75. А.С. Сердаков, *Автоматический контроль и техническая диагностика*, К.: Тэхника, 1971.
76. Рассальский А.Н., Сахно А.А., Конограй С.П., Спица А.Г., Гук А.А., «Основные принципы непрерывного контроля высоковольтного маслонаполненного электрооборудования с изоляцией конденсаторного типа под рабочим напряжением», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, № 2, с. 53-55, 2009.
77. В. А. Савельев, «Проблемы и пути повышения надежности электротехнического оборудования», *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики*, Вып. 39, с. 140–172, 1992.
78. П. П. Пархоменко, *Основы технической диагностики*, Москва : Энергия, 1976.
79. В. В.Сапожников, Вл. В. Сапожников, *Основы технической диагностики*, Москва : Маршрут, 2004.
80. В. В. Ключев, *Технические средства диагностирования*, Москва : Машиностроение, 1989.
81. В. Ф. Склярв, Р. А. Гуляев, *Диагностическое обеспечение энергетического производства*, Киев : Техника, 1985.
82. Gh. Balan, Al. Curelaru, V. Onu, «A decade of experience on service behavior of reliability and maintenance of circuit-breakers», *CIGRE. Int. Conf. Large High Voltage Elec. Syst.*, Pap. N 13-07, 1986.
83. А. И. Таджибаев, *Теория и практика распознавания аномальных состояний электрооборудования*, Санкт-Петербург, ПЭИПК, 1995.

84. Д.А. Поспелов, *Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта*, М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.
85. D. Dubois, *Fundamentals of Fuzzy Sets*, Springer Science & Business Media, 2012.
86. T.L. Saaty, «Exploring the interface between hierarchies, multiple objectives and fuzzy sets», *Fuzzy Sets and Systems*, Vol 1 (1), P. 57-68, 1978.
87. R.R. Yager, «Level sets for membership evaluation of fuzzy subset», *Fuzzy Sets and Possibility Theory: Recent Developments*, P. 90-97, 1982.
88. E. C. Harrington, «The desirability function», *Industrial Quality Control*, no. 21(10), p. 124, 1965.
89. М.Базара, К. Шетти, *Нелинейное программирование. Теория и алгоритмы*, М.:Мир, 1982.
90. Дж.Голуб, Ч. Ван Лоун, *Матричные вычисления*, М.: Мир, 1999.
91. А. Г. Тутьгин, В. Б. Коробов, «Преимущества и недостатки метода анализа иерархий», *ЭКОНОМИКА*, с.108-115, 2012.
92. И. М. Сеченов, *Элементы мысли*, СПб.: Питер, 2001.
93. K.Bauters, W.Liu, L. Godo, «Anytime algorithms for solving possibilistic MDPs and hybrid MDPs», *Foundations of Information and Knowledge Systems*, P. 24-41, 2016.
94. D.Dubois, H.Prade, P.Smets, «A definition of subjective possibility», *International Journal of Approximate Reasoning*, Vol. 48 (2), P. 352-364, 2008.
95. В.А. Андриященко, «Метод моделирования непрерывных нечетких величин по экспериментальным данным», *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*, №24, С. 146-149, 2008.
96. Д.В. Ерохин, Д.Г. Лагереv, Е.А. Ларичева, А.Г. Подвесовский, *Стратегическое управление инновационной деятельностью предприятия: монография*, Брянск: БГТУ, 2010.
97. Р.А.Исаев, А.Г. Подвесовский, «Оценка согласованности суждений эксперта при построении функции принадлежности нечеткого множества методом множеств уровня», *Современные информационные технологии и ИТ-образование*, Том 13, № 3, С. 9-15, 2017.
98. Ю. Жарков, О. Цицилиано, «Система управління якістю: моніторинг роботи органів з оцінки відповідності з використанням методу Харінгтона», *Стандартизація, сертифікація, якість*, №1, С.24-27, 2005.
99. Ю. Жарков, О. Цицилиано, «Оптимізація критеріїв роботи органів з оцінки відповідності з використанням методу Харінгтона», *Стандартизація, сертифікація, якість*, №4, С. 36-38, 2004.
100. С. Л. Ахназарова, Л. С. Гордеев, *Использование функции желательности Харрингтона при решении оптимизационных задач химической технологии*, М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2003.
101. А. В. Пичкалев, «Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств», *Исследования наукограда*, №1 (1), с. 25-28, 2012.

102. І. Федулова, «Підходи до оцінки рівня готовності підприємства щодо інноваційного розвитку», *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*, № 124/125, с. 36-40, 2011.
103. Т. Ю. Чайка, «Проблемы формирования интегрального показателя конкурентоспособности товаров (услуг)», *БізнесІнформ*, №8, с. 198 – 204, 2014.
104. С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров, *Статистические методы обработки и планирования экспериментов*, М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1972.
105. А. М. Анохин, В. А. Глотов, В. В. Павельев, А. М. Черкашин, «Методы определения коэффициентов важности критериев», *Автоматика и телемеханика*, № 8, с. 3-35, 1977.
106. Ч.Лоусон, Р. Хенсон, *Численное решение задач метода наименьших квадратов*, М.: Наука, 1986.
107. Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский, *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*, М.: Наука, 1976.
108. M. Gard, S. J. Levinson, S. B. Ferraro, and J. A. Jimenez «A Factorial Experiment to Characterize the Small-Caliber Launcher», *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, vol. 40, no. 1, pp. 118-123, 2012.
109. Ю.П. Адлер, *Введение в планирование эксперимента*, М.: Металлургия, 1968.
110. K. L. Mills, J. J. Filliben, and A. L. Haines, «Determining Relative Importance and Effective Settings for Genetic Algorithm Control Parameters», *Evolutionary Computation*, Volume 23, Issue 2, pp. 309 – 342, 2015.
111. В. В. Налимов, Н. А. Чернова, *Статистические методы планирования экстремальных экспериментов*. М.: Наука, 1965.
112. В. В. Налимов, Т. И. Голикова, *Логические основания планирования эксперимента*, М.: Металлургия, 1980.
113. В. А. Вознесенский, А. Ф. Ковальчук, *Принятие решений по статистическим моделям*, М.: Статистика, 1978.
114. Е. Ю. Барзилович, *Модели технического обслуживания сложных систем*, М.: Высшая школа, 1982.
115. В. А. Савельев, А. Н. Назарычев, «Принципы новой технологии управления техническим состоянием электрооборудования станций и подстанций», *РНСЭ : материалы докладов*, Т. 2, С. 42–45, 2001.
116. Henryk Maciejewski, George Anders, «Problem of model selection for Estimation of Equipment Remaining Life», *Proc. of 2nd International Conference on Dependability of Computer Systems*, 2007.
117. А.В.Журахівський, Б.М.Кінаш, О.Р. Пастух, *Надійність електричних мереж і систем*, Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012.
118. J.F.Lawless, *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*, Wiley, 1982.
119. Henryk Maciejewski, George Anders, John Endrenyi, «On the use of statistical methods for predicting the end of life of electric power equipment»,

*Proc. of the 2001 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drive*, 2011.

120. Henryk Maciejewski, «Reliability Centered Maintenance of Repairable Equipment», *Proc. of the 4th International Conference on Dependability of Computer Systems*, 2009.

121. Н. Н. Смирнов, Ю. М. Чинючин, *Эксплуатационная технологичность летательных аппаратов*, Москва : Транспорт, 1994.

122. Д. А. Андреев , И. А. Назарычев, «Анализ методов оценки коммутационного ресурса высоковольтных выключателей», *Вестн. ИГЭУ*, № 2, с. 1–15, 2008.

123. В.В.Грабко, Б.И. Мокин, «Об одном способе построения ресурсных характеристик высоковольтных выключателей», *Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений)*, № 11, с.39-42, 1989.

124. В.В.Грабко, Б.И. Мокин, «Синтез устройств для измерения отключающего ресурса высоковольтных выключателей», *Устройства преобразования информации для контроля и управления в энергетике. Тез. докл. третьей Респ. конф. Харьков*, с. 209, 1988.

125. Н. С. Райбман, В. М. Чадеев, *Построение моделей процессов производства*, Москва : Энергия, 1975.

126. О. О. Матусевич, «Удосконалення системи діагностування силових трансформаторів тягових підстанцій електрифікованих залізниць», *Гірнична електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник*, № 92, С. 31–36, 2014.

127. В. И. Колпачков, А. И. Ящура, *Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования промышленных предприятий*, М.: ГИГХС, 1994.

128. В. И. Колпачков, А. И. Ящура, *Производственная эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт энергетического оборудования*, М.: Энергосервис, 1999.

129. В. В. Ключев и др., *Технические средства диагностирования*, М.: Машиностроение, 1989.

130. А. Н. Рассальский и др., «Система мониторинга и управления для силовых трансформаторов», *Новое в российской энергетике*, № 6, С. 24–30, 2004.

131. В.И. Бервинов, Е.Ю. Доронин, И.П. Зенин, *Техническое диагностирование и неразрушающий контроль деталей и узлов локомотивов*, М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008.

132. М. П. Цапенко, *Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование*, Москва : Энергоатомиздат, 1985.

133. Ю.П.Иванов, В.Г.Никитин, В.Ю. Чернов, *Контроль и диагностика измерительно-вычислительных комплексов*, СПбГУАП. СПб.,

2004.

134. Д.В.Зуев, С.В. Бочкарев, В.В. Дмитриев, «Анализ диагностической информации», *Автоматика, связь, информатика*, №9, с. 16-17, 2013.
135. Н.Я. Говорущенко, В.Н. Варфоломеев, *Техническая кибернетика транспорта*, Харьков: ХГАДТУ, 2001.
136. Г.Н. Новопащенко, *Информационно- измерительные системы*, М.: Высш. школа, 1977.
137. І. В.Станкевич, В. А. Тігарєва, «Переваги та недоліки застосування уніфікованої мови UML під час моделювання бізнес-процесів складних організацій», *Наука й економіка*, № 4 (36), с.207-217, 2014.
138. G.Booch, J.Rumbaugh, I. Jacobson, *The Unified Modeling Language User Guide. Second Edition*, Addison-Wesley, 2005.
139. J.Schmuller, *Sams Teach Yourself UML in 24 Hours 3rd Edition*, Sams Publishing, 2004.
140. Д.С. Кулябов, А.В. Королькова, *Введение в формальные методы описания бизнес-процессов*, М. : РУДН, 2008.
141. Л. И. Дубровин, «К вопросу определения экономически оптимальной периодичности ремонтов сложных восстанавливаемых устройств», *Надежность и контроль качества*, №4, С. 91-94, 1974.
142. В. В. Шостак, «Критерії оптимальності структури ремонтного циклу обладнання для виробництва деревностружкових плит», *Науковий вісник Українського державного лісотехнічного університету*, вип. 11.2, С. 18-21, 2001.
143. С. Е. Романенко, Е. В. Кондратьев, *Прозрачность и обоснованность затрат на ТО и Р*, ПААК, 2013.
144. В.А.Гуляев, Г.Г. Костанди, *Техническая диагностика. Методы определения периодичности диагностирования электроэнергетических систем*, Киев: Техника, 1987.
145. Б. Г. Южаков, *Монтаж, наладка, обслуживание и ремонт электрических установок*, Москва: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008.
146. Ю. А. Азовцев, Н. А. Баркова, В. А. Доронин, «Диагностика и прогноз технического состояния оборудования целлюлозно-бумажной промышленности в рыночных условиях», *Журнал "Бумага, картон, целлюлоза"*, 1999.
147. Paul D. Sonkin, Paul Johnson, *Pitch the Perfect Investment: The Essential Guide to Winning on Wall Street*, Wiley Finance, 2017.
148. «Нормы времени и нормативы численности на текущие ремонты и межремонтные испытания оборудования тяговых и трансформаторных подстанций железных дорог», Москва, 2007.
149. А. Н.Назарычев, А.И. Таджикибаев, Д.А. Андреев, *Совершенствование системы проведения ремонтов электрооборудования*

*электростанций и подстанций*, СПб.: ПЭИПК, 2004.

150. John Moschella, *Financial Modeling For Equity Research: A Step-by-Step Guide to Earnings Modeling*, Amazon Digital Services LLC, 2017.

151. Philip Kotler, Hermawan Kartajaya, S. David Young, *Attracting Investors: A Marketing Approach to Finding Funds for Your Business*, Wiley, 2008.

152. Aswath Damodaran, *Investment valuation. Tools and techniques for determining the value of any asset*, Wiley, 2012.

**ДОДАТОК А**

**Протоколи міжремонтних випробувань швидкодіючого вимикача  
постійного струму ВАБ-43**

**ПРОТОКОЛ №15101315**  
**Проверки быстродействующих выключателей типа ВАБ-43,**  
**установленного на тяговой подстанции НД-Узел**  
**Зав. №ФА-9**

№	Наименование параметров	Номера параметров	Результаты	
			Зав.№21184	Зав.№21185
1	Провал гл. контактов &1	2=2,4	2	2
2	Провал дугогасительных контактов &2	2,8=3,0	2,85	2,85
3	Суммарный в рычаге якоря &3	1=8	5	5
4	Между контактом и рогом в предвыключ. положении &6	4,0=4,5	4,3	4,3
5	Между главными контактами &7	18=20	20	20
6	Между подвижн. контактом и упором &8	1=4	2	2
7	Между рогом камеры и дугогас. контактом в откл. положении &9	3=10	10	10
8	Свободного хода тяга блокконтактов &10	1,5=2,5	2,5	2,5
9	Нажатие дугогасительного контакта	12=14	14	14
10	Нажатие гл. контакта	32=36	35	35
11	Нажат отключающих пружин	30=50	40	40
12	Длина отключающих пружин левая	195=205	205	205
13	-«- правая	195=205	205	205
14	Спротивление включающей катушки	1,67±0,17	1,67	1,67
15	Спротивление держателю катушки	140±7	140	140
16	Токи держателю катушек	0,42±0,5	0,5/0,35	0,5/0,35
17	Падение напряжения при токе 2000 А не более на главных контактах	20	20	20
18	На всем выключателе	75	75	75
19	Выключатели настроены на токи (уст.)	расчет	3350/2300	3350/2300
20	Токи калиброванных катушек	-	-	-
21	Сжатие вспомогательных пружин	-	-	-

Произведены в/в испытания между:

	норма	испыт
1	Включающей, держателю катушки и быстродействующим приводом, кВ	10,5 10,5кв
2	Разомкнутыми главными контактами при открытой камере, кВ	10,5 10,5кв
3	Тоже при закрытой камере, кВ	8,4 8,4кв
4	Быстродействующим приводом и «землей», кВ	10,5 10,5кв
5	Блок-контактами и быстродействующим приводом, кВ	10,5 10,5кв
6	Разомкнутыми блок-контактами, кВ	2,1 2,1кв
7	Опорными изоляторами и «землей», кВ	25 25кв

Приборы: ММВ №109933, динамометр №14, мегомметр ЭСО203№96421  
 АИИ-70№ 395474, амперметр № 136014

БВ\_ФА-9\_ВАБ-43 испытан в полном объеме, отклонений не выявлено. Выключатель к вводу в эксплуатацию готов.

**ПРОТОКОЛ №17111315**  
**Проверки быстродействующих выключателей типа ВАБ-43,**  
**установленного на тяговой подстанции НД-Узел**  
**Зав. №ФА-5А**

№	Наименование параметров	Номера параметров	Результаты	
			Зав.№21184	Зав.№21185
1	Провал гл. контактов &1	2=2,4	2,5	2,5
2	Провал дугогасительных контактов &2	2,8=3,0	2,78	2,78
3	Суммарный в рычаге якоря &3	1=8	9	9
4	Между контактом и рогом в предвыключ. положении &6	4,0=4,5	4,5	4,5
5	Между главными контактами &7	18=20	22	22
6	Между подвижн. контактом и упором &8	1=4	3	3
7	Между рогом камеры и дугогас. контактом в откл. положении &9	3=10	13	13
8	Свободного хода тяга блокконтактов &10	1,5=2,5	2,5	2,5
9	Нажатие дугогасительного контакта	12=14	14	14
10	Нажатие гл. контакта	32=36	30	30
11	Нажат отключающих пружин	30=50	28	28
12	Длина отключающих пружин левая	195=205	207	207
13	-«- правая	195=205	207	207
14	Спротивление включающей катушки	1,67±0,17	1,67	1,67
15	Спротивление держателю катушки	140±7	140	140
16	Токи держателю катушек	0,42±0,5	0,5/0,35	0,5/0,35
17	Падение напряжения при токе 2000 А не более на главных контактах	20	20	20
18	На всем выключателе	75	75	75
19	Выключатели настроены на токи (уст.)	расчет	3350/2300	3350/2300
20	Токи калиброванных катушек	-	-	-
21	Сжатие вспомогательных пружин	-	-	-

Произведены в/в испытания между:

	норма	испыт
1	Включающей, держателю катушки и быстродействующим приводом, кВ	10,5 10,5кв
2	Разомкнутыми главными контактами при открытой камере, кВ	10,5 10,5кв
3	Тоже при закрытой камере, кВ	8,4 8,4кв
4	Быстродействующим приводом и «землей», кВ	10,5 10,5кв
5	Блок-контактами и быстродействующим приводом, кВ	10,5 10,5кв
6	Разомкнутыми блок-контактами, кВ	2,1 2,1кв
7	Опорными изоляторами и «землей», кВ	25 25кв

Приборы: ММВ №109933, динамометр №14, мегомметр ЭСО203№96421  
 АИИ-70№ 395474, амперметр № 136014

Заключение: БВ\_ФА-5А\_ВАБ-43 испытан в полном объеме, выявлены несоответствия по пунктам 1, 3, 5, 7, 10, 11, 12, 13. Выключатель к вводу в эксплуатацию не готов, необходимо выполнить наладку и устранить причины.

**ПРОТОКОЛ №17091315**  
**Проверки быстродействующих выключателей типа ВАБ-43,**  
**установленного на тяговой подстанции НД-Узел**  
**Зав. №ФА-3А**

№	Наименование параметров	Номера параметров	Результаты	
			Зав.№21184	Зав.№21185
1	Провал гл. контактов &1	2=2,4	2	2
2	Провал дугогасительных контактов &2	2,8=3,0	2,85	2,85
3	Суммарный в рычаге якоря &3	1=8	6	6
4	Между контактом и рогом в предвыключ. положении &6	4,0=4,5	4,3	4,3
5	Между главными контактами &7	18=20	20	20
6	Между подвижн. контактом и упором &8	1=4	2	2
7	Между рогом камеры и дугогас. контактом в откл. положении &9	3=10	10	10
8	Свободного хода тяга блокконтактов &10	1,5=2,5	2,5	2,5
9	Нажатие дугогасительного контакта	12=14	12	12
10	Нажатие гл. контакта	32=36	34	34
11	Нажат отключающих пружин	30=50	40	40
12	Длина отключающих пружин левая	195=205	197	197
13	-«- правая	195=205	197	197
14	Спротивление включающей катушки	1,67±0,17	1,67	1,67
15	Спротивление держателю катушки	140±7	140	140
16	Токи держателю катушек	0,42±0,5	0,5/0,38	0,5/0,35
17	Падение напряжения при токе 2000 А не более на главных контактах	20	20	20
18	На всем выключателе	75	75	75
19	Выключатели настроены на токи (уст.)	расчет	3600/2300	3600/2300
20	Токи калиброванных катушек	-	-	-
21	Сжатие вспомогательных пружин	-	-	-

Произведены в/в испытания между:

	норма	испыт
1	Включающей, держателю катушки и быстродействующим приводом, кВ	10,5 10,5кв
2	Разомкнутыми главными контактами при открытой камере, кВ	10,5 10,5кв
3	Тоже при закрытой камере, кВ	8,4 8,4кв
4	Быстродействующим приводом и «землей», кВ	10,5 10,5кв
5	Блок-контактами и быстродействующим приводом, кВ	10,5 10,5кв
6	Разомкнутыми блок-контактами, кВ	2,1 2,1кв
7	Опорными изоляторами и «землей», кВ	25 25кв

Приборы: ММВ №109933, динамометр №14, мегомметр ЭСО203№96421  
 АИИ-70№ 395474, амперметр № 136014

БВ\_ФА-3А\_ВАБ-43 испытан в полном объеме, отклонений не выявлено. Выключатель к вводу в эксплуатацию готов.

**ПРОТОКОЛ №17101315**  
**Проверки быстродействующих выключателей типа ВАБ-43,**  
**установленного на тяговой подстанции НД-Узел**  
**Зав. №ФА-7**

№	Наименование параметров	Номера параметров	Результаты	
			Зав.№21184	Зав.№21185
1	Провал гл. контактов &1	2=2,4	2	2
2	Провал дугогасительных контактов &2	2,8=3,0	2,88	2,88
3	Суммарный в рычаге якоря &3	1=8	8	8
4	Между контактом и рогом в предвыключ. положении &6	4,0=4,5	4,5	4,5
5	Между главными контактами &7	18=20	20	20
6	Между подвижн. контактом и упором &8	1=4	3	3
7	Между рогом камеры и дугогас. контактом в откл. положении &9	3=10	10	10
8	Свободного хода тяга блокконтактов &10	1,5=2,5	2,5	2,5
9	Нажатие дугогасительного контакта	12=14	14	14
10	Нажатие гл. контакта	32=36	35	35
11	Нажат отключающих пружин	30=50	40	40
12	Длина отключающих пружин левая	195=205	203	203
13	-«- правая	195=205	203	203
14	Спротивление включающей катушки	1,67±0,17	1,67	1,67
15	Спротивление держателю катушки	140±7	140	140
16	Токи держателю катушек	0,42±0,5	0,5/0,35	0,5/0,35
17	Падение напряжения при токе 2000 А не более на главных контактах	20	20	20
18	На всем выключателе	75	75	75
19	Выключатели настроены на токи (уст.)	расчет	3350/2300	3350/2300
20	Токи калиброванных катушек	-	-	-
21	Сжатие вспомогательных пружин	-	-	-

Произведены в/в испытания между:

	норма	испыт
1	Включающей, держателю катушки и быстродействующим приводом, кВ	10,5 10,5кв
2	Разомкнутыми главными контактами при открытой камере, кВ	10,5 10,5кв
3	Тоже при закрытой камере, кВ	8,4 8,4кв
4	Быстродействующим приводом и «землей», кВ	10,5 10,5кв
5	Блок-контактами и быстродействующим приводом, кВ	10,5 10,5кв
6	Разомкнутыми блок-контактами, кВ	2,1 2,1кв
7	Опорными изоляторами и «землей», кВ	25 25кв

Приборы: ММВ №109933, динамометр №14, мегомметр ЭСО203№96421  
 АИИ-70№ 395474, амперметр № 136014

Заключение: БВ\_ФА-7\_ВАБ-43 испытан в полном объеме, выявлены граничные значения по пунктам 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9. Выключатель к вводу в эксплуатацию готов, необходимо сократить время межремонтных испытаний.

**ДОДАТОК Б**

**Фрагмент кодованої матриці планування ортогонального центрально-композиційного плану другого порядку**



1	$\bar{1}$	1	1	1	$\bar{1}$	0 · 1 3 7	0 · 1 3 7	0 · 1 3 7	0 · 1 3 7	0 · 1 3 7	$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{1}$	1	1	1	$\bar{1}$	1	$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{1}$	1	1	1	$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{1}$	1	1	1	$\bar{1}$	1	0 · 5 3 8 5 1
1	$\bar{1}$	$\bar{1}$	1	1	$\bar{1}$	0 · 1 3 7	0 · 1 3 7	0 · 1 3 7	0 · 1 3 7	0 · 1 3 7	1	$\bar{1}$	$\bar{1}$	1	$\bar{1}$	$\bar{1}$	1	1	$\bar{1}$	$\bar{1}$	1	1	$\bar{1}$	1	1	$\bar{1}$	1	$\bar{1}$	$\bar{1}$	1	1	$\bar{1}$	1	0 · 4 8 5 8 9

**ДОДАТОК В**  
**Акти впровадження**



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник служби електропостачання

РФ «Львівська залізниця»

ПІАТ «Укрзалізниця»

М. М. Пулін

2018 р.

**АКТ**

використання результатів дисертаційної роботи  
Міронова Дмитра Вікторовича

Цим підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Міронова Д. В. прийняті до виконання службою електропостачання РФ «Львівська залізниця» при розробці заходів з підвищення ефективності робіт з технічного обслуговування обладнання тягових підстанцій постійного струму.

Особливо важливими як в теоретичному, так і в практичному плані вважаємо такі результати:

1. Аналітичний вираз розрахунку узагальненого показника технічного стану електрообладнання тягових підстанцій постійного струму.
2. Методика розрахунку залишкового ресурсу електрообладнання тягових підстанцій постійного струму з використанням узагальненого показника технічного стану електрообладнання.
3. Автоматизована система оцінки технічного стану електрообладнання тягових підстанцій постійного струму та програмний засіб.

Головний інженер служби  
електропостачання  
РФ «Львівська залізниця»

О.І.Шалко

Начальник дорожньої  
електротехнічної лабораторії  
РФ «Львівська залізниця»

А.І.Барна

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з науково-педагогічної роботи  
Дніпропетровського національного  
університету залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна,  
д.т.н., професор



О. О. Матусевич

20 03 2018 р.

**АКТ**

використання результатів дисертаційної роботи

Міронова Дмитра Вікторовича

на тему: **«Підвищення ефективності експлуатації обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць постійного струму»**

Цим підтверджуємо, що у навчальному процесі, який ведеться в університеті, прийняті до використання наукові та практичні результати, викладені в кандидатській дисертації Міронова Д. В.:

1. Методика оцінки залишкового ресурсу обладнання тягових підстанцій постійного струму на основі узагальненого показника технічного стану (практичні заняття з дисципліни «Математичні задачі енергетики та надійність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка, електротехнології» ОС «Бакалавр»).

2. Автоматизований комплекс оцінки технічного стану обладнання тягових підстанцій постійного струму (практичні заняття з дисципліни «Електрична частина станцій та підстанцій» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка, електротехнології» ОС «Бакалавр»).

Декан факультету  
«Управління енергетичними  
процесами»,  
д.т.н., професор

А. М. Афанасов

Професор кафедри  
«Інтелектуальні системи  
електропостачання»,  
д.т.н.

В. Г. Кузнецов