

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Доморощин Сергій Вікторович



УДК 621.3.048.1

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКІВ
ПОРУШЕННЯ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬЧИХ ПРИСТРОЇВ ВИСОКОЇ
НАПРУГИ

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Галузь знань 14 – «Електрична інженерія»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



С. В. Доморощин

Науковий керівник –

к.т.н.,

Сахно Олександр Анатолійович

Запоріжжя – 2021

АНОТАЦІЯ

Доморошин С. В. Удосконалення методів прогнозування ризиків порушення роботи розподільчих пристроїв високої напруги. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» – Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, 2021 р.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню питань стосовно удосконалення існуючої системи розподілення фінансових активів на планово-попереджувальні ремонти відповідального обладнання розподільчих пристроїв високої напруги електроенергетичних підприємств.

Для досягнення цієї мети було поставлено задачі:

- визначити номенклатуру основного електрообладнання, від якого залежить функціонування розподільчих пристроїв високої напруги (РПВН);
- визначити основні параметри, які впливають на технічний стан (ТС) певного електрообладнання РПВН;
- удосконалити математичні моделі визначення ТС відповідального електрообладнання РПВН;
- розробити модель прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання РПВН;
- розробити модель визначення ризиків порушення роботи РПВН;
- експериментально підтвердити ефективність розроблених моделей і методу для прогнозування ризиків порушення роботи РПВН.

Об'єкт дослідження – експлуатація розподільчих пристроїв високої напруги об'єднаної електроенергетичної системи України.

Предмет дослідження – методи і моделі для прогнозування ризиків порушення роботи розподільчих пристроїв високої напруги.

Методи дослідження. Вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань досягнуто на базі теоретичних основ проектування апаратів високої

напруги, теорії ймовірності, теорії надійності, положень теорії нечіткої логіки, методу експертних систем, методу ймовірнісно-статистичного моделювання. Всі розрахунки в роботі виконано з використанням програмного продукту MATLAB Fuzzy Logic (License Number: 271828) та MATLAB Coder™ для інтегрування в систему безперервного контролю (СБК), а також оригінальним програмним забезпеченням СБК ТОВ «Енергоавтоматизація».

В роботі отримано такі наукові результати.

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу прогнозування ризиків порушення роботи РПВН, яка ґрунтується на даних СБК щодо поточного технічного стану відповідального електрообладнання.

Проведено аналіз існуючих методів прогнозу ризиків порушення роботи електроустановок електроенергетичних систем. Виявлено ряд недоліків щодо акцентів під час керування ризиками (економічні, екологічні, безпекові та ін.), пріоритетності досліджуваного обладнання, підходів у випадку визначення ймовірнісної складової ризику.

Визначено номенклатуру відповідального електрообладнання, яке забезпечує нормальну роботу РПВН. Встановлено чинники впливу на функціонування відповідального електрообладнання, за якими можливе прогнозування ризиків відмов елементів РПВН.

Розроблено узагальнену нечітку математичну модель оцінки ТС відповідального електрообладнання РПВН, в якій інтегровано основні діагностичні чинники впливу на залишковий ресурс електрообладнання. Узагальнену нечітку математичну модель інтегровано в СБК завдяки уніфікації основних контрольованих параметрів.

Розроблено нечіткі математичні моделі оцінення ТС таких елементів розподільчих пристроїв: апарата захисту від перенапруг, елегазового вимикача, трансформатора струму, роз'єднувача.

Проведено експериментально-модельні дослідження з використанням розроблених нечітких математичних моделей. За даними СБК щодо ТС визначено ймовірність відмови відповідального обладнання РПВН ЕЕС.

Запропоновано і реалізовано удосконалений експертно-статистичний метод прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання в режимі «on-line», обґрунтовано поєднання ймовірнісно-статистичного та евристичного методів прогнозування.

Запропоновано і реалізовано метод модифікації статистичної функції розподілу ймовірності відмови електрообладнання РПВН за даними поточного контролю ТС засобами СБК.

Розроблено і реалізовано ймовірнісно-топологічний метод визначення порушення роботи РПВН. На основі розробленого методу проведено розрахунки щодо управління ризиками експлуатації відповідального електрообладнання РПВН об'єкта ЕЕС.

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі електричних та електронних апаратів Національного університету «Запорізька політехніка» і на базі підприємства ТОВ «Енергоавтоматизація». Результати дисертації впроваджено в рамках дослідної експлуатації в процесі виробництві СБК (моніторингу) обладнання розподільчих пристроїв для ПС «Нура» (Республіка Казахстан).

Ключові слова: розподільчий пристрій, ризик, залишковий ресурс, технічний стан, нечітка модель, топологічний вплив, експертні системи.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Доморошин С. В. Визначення спрацьованого ресурсу елегазового вимикача типу HGF 100/2 В,С GEC ALSTOM за нечіткою моделлю / С. В. Доморошин, П. В. Махлін // Електротехніка та електроенергетика. – 2016. – № 2. – С. 72–81.

2. Доморошин С. В. Оцінювання ймовірності відмови елегазових вимикачів «ГЕС ALSTOM» на інтервалі часу / С. В. Доморошин, В. В. Літвінов // Гідроенергетика України. – 2018. – № 1–2. – С. 39–44.
3. Доморошин С. В. Нечітке моделювання ймовірності відмови апаратів захисту від перенапруг / С. В. Доморошин, О. А. Сахно // Електротехніка та електроенергетика. – 2018. – № 3. – С. 39–51.
4. Sakhno A. A. Improvement of the nonequilibrium-compensation method for state diagnostics of high-voltage apparatus with condenser insulation / A. A. Sakhno, L. S. Skrupskaya, S. V. Domoroshchyn // Electrical engineering and power engineering. – 2019. – № 4. – P. 56–64.
5. S. Domoroshchyn. Estimating the failure probability of an instrument transformer cell in the high voltage distributing device using an expert-statistical method / S. Domoroshchyn, O. Sakhno // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – № 4/2. – P. 70-81.
6. Доморошин С. В. Метод ризик-аналізу порушення функціонування розподільчих пристроїв високої напруги / С. В. Доморошин, О. А. Сахно // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2020. – № 3 (51). – С. 41-52.
7. A. Sakhno. Comparative analysis of methods for residual life of current transformers prediction / A. Sakhno, S. Domoroshchin. L. Skrupskaya // Innovative engineering, technology and industry. International scientific conference. Seattle, Washington, USA. Global science and education in the modern realities. August 26-27. – 2020. – P. 7–10.
8. A. Sakhno. Generalized mathematical model for determining technical condition of responsible electrical equipment of high-voltage switchgear / A. Sakhno, S. Domoroshchin // Innovative engineering, technology and industry. International scientific conference. Svishtov, Bulgaria. Search for scientific answers to the challenges of our time'2020. December 28-29. – 2020. – P. 5–8.
9. A. Sakhno. Probabilistic-topological method for determining risk of disruption of high-voltage switchgear / A. Sakhno, S. Domoroshchin // Innovative

engineering, technology and industry. International scientific conference. Karlsruhe, Germany. The current stage of development of scientific and technological progress'2021. No 15 on February 9. – 2021. – P. 5–7.

ABSTRACT

Domoroshchyn S. V. Improved methods for predicting the risk of high voltage switchgear disruption. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of Ph.D in specialty 141 “Electric Power, Electrical and Electromechanics” – National University “Zaporizhzhya Polytechnic”, Zaporizhzhya, 2021.

The dissertation work is devoted to the solution of issues on the improvement of the existing system of distribution of financial assets for planned preventive repairs of responsible equipment of high-voltage switchgears of electric power enterprises.

To achieve this goal, the following objectives were set:

- determine the nomenclature of the main electrical equipment on which the operation of high voltage switchgear (HVS) depends;
- determine the main parameters that affect the technical condition (TC) of certain electrical equipment of the HVS;
- improve mathematical models for determining the TC of responsible electrical equipment of the HVS;
- develop the model of forecasting the residual life of HVS electrical equipment;
- develop a model for determining the risks of disruption of the HVS;
- to experimentally confirm the effectiveness of the models developed and the method for predicting the risks of malfunctioning the HVS.

The object of the study is the operation of high voltage switchgears of the EPS.

The subject of the study is methods and models for predicting the risks of disruption of high-voltage switchgears.

Research methods. The solution of the problems set in the dissertation work was achieved on the basis of the theoretical foundations of designing high-

voltage devices, probability theory, reliability theory, the positions of the theory of fuzzy logic, the method of expert systems, and the method of probability-statistical modeling. All calculations in the work were made using the MATLAB Fuzzy Logic software product (License Number: 271828) and MATLAB Coder™ for integration into the continuous monitoring systems (CMS), as well as the original software of the enterprise "Energy Automation."

The following scientific results are obtained in the work.

The dissertation work solved the scientific and practical problem of predicting the risks of malfunction of the HVS, which is based on data from CMS regarding the current technical state of responsible electrical equipment.

Analysis of existing methods of forecasting the risks of disruption of electrical installations of electric power systems was carried out. A number of deficiencies were identified regarding the emphasis in risk management (economic, environmental, without pitch, etc.), the priority of the equipment under investigation, approaches in determining the probabilistic component of the risk.

The nomenclature of responsible electrical equipment has been determined, which ensures normal operation of the HVS. Factors of influence on the functioning of responsible electrical equipment have been established, according to which it is possible to predict the risks of failures of HVS elements.

A generalized fuzzy mathematical model of TC evaluation of responsible electrical equipment of HVS has been developed, in which the main diagnostic factors of impact on residual life of electrical equipment are integrated. The generalized fuzzy mathematical model is integrated into the CMS due to the unification of the main controlled parameters.

Fuzzy mathematical models have been developed for evaluating the TC of the following components of switchgear: overvoltage protection device, gas-insulated switch, current transformer, disconnecter.

Experimental model studies were carried out using developed fuzzy mathematical models. According to CMS data as per TC, the probability of failure of the responsible EPS HVS equipment is determined.

An improved expert-statistical method of predicting the residual life of electrical equipment in the "on-line" mode is proposed and implemented, a combination of probabilistic-statistical and heuristic prediction methods is justified.

Method of modification of statistical function of distribution of probability of failure of electrical equipment of HVS is proposed and implemented based on data of vehicle monitoring by means of CMS.

A probabilistic-topological method for determining a malfunction of the HVS has been developed and implemented. On the basis of the developed method, calculations were made to manage the risk of operation of the responsible electrical equipment of the EPS facility.

Dissertation work was carried out at the Department of Electrical and Electronic Devices of the National University "Zaporizhzhya Polytechnic" and on the basis of the enterprise "Energy Automation." The results of the dissertation were introduced, as part of pilot operation, in the production of SBC (monitoring) equipment of switchgears for PS "Nura" (Republic of Kazakhstan).

Keywords: switchgear, risk, residual resource, technical condition, fuzzy model, topological influence, expert systems.

LIST OF PUBLICATION OF THE APPLICANT

1. Domoroshchyn S. V. Vyznachennia spratsovanoho resursu elehazovoho vymykacha typu HGF 100/2 B,C GEC ALSTOM za nechitkoiu modelliu / S. V. Domoroshchyn, P. V. Makhlin // Elektrotehnika ta elektroenerhetyka. – 2016. – № 2. – S. 72-81.
2. Domoroshchyn S. V. Otsiniuvannia ymovirnosti vidmovy elehazovykh vymykachiv «GEC ALSTOM» na intervali chasu /

S. V. Domoroshchyn, V. V. Litvinov // *Hydroenerhetyka Ukrainy*. – 2018. – № 1-2. – S. 39-44.

3. Domoroshchyn S. V. Nechitke modeliuвання ymovirnosti vidmovy aparativ zakhystu vid perenapruh / S. V. Domoroshchyn, O. A. Sakhno // *Elektrotehnika ta elektroenerhetyka*. – 2018. – № 3. – S. 39–51.

4. Sakhno A. A. Improvement of the nonequilibrium-compensation method for state diagnostics of high-voltage apparatus with condenser insulation / A. A. Sakhno, L. S. Skrupskaya, S. V. Domoroshchyn // *Electrical engineering and power engineering*. – 2019. – № 4. – P. 56-64.

5. S. Domoroshchyn. Estimating the failure probability of an instrument transformer cell in the high voltage distributing device using an expert-statistical method / S. Domoroshchyn, O. Sakhno // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – № 4/2. – P. 70-81.

6. Domoroshchyn S. V. Metod ryzyk-analizu porushennia funktsionuvannia rozpodilchych prystroiv vysokoi napruhy / S. V. Domoroshchyn, O. A. Sakhno // *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy*. – 2020. – № 3 (51). – S. 41–52.

7. A. Sakhno. Comparative analysis of methods for residual life of current transformers prediction / A. Sakhno, S. Domoroshchin. L. Skrupskaya // *Innovative engineering, technology and industry. International scientific conference. Seattle, Washington, USA. Global science and education in the modern realities. August 26-27*. – 2020. – P. 7–10.

8. A. Sakhno. Generalized mathematical model for determining technical condition of responsible electrical equipment of high-voltage switchgear / A. Sakhno, S. Domoroshchin // *Innovative engineering, technology and industry. International scientific conference. Svishtov, Bulgaria. Search for scientific answers to the challenges of our time'2020. December 28-29*. – 2020. – P. 5–8.

9. A. Sakhno. Probabilistic-topological method for determining risk of disruption of high-voltage switchgear / A. Sakhno, S. Domoroshchin // *Innovative engineering, technology and industry. International scientific conference*.

Karlsruhe, Germany. The current stage of development of scientific and technological progress'2021. No 15 on February 9. – 2021. – P. 5–7.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКІВ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ	25
1.1 Аналіз пошкоджуваності електрообладнання об'єднаної електроенергетичної системи України	25
1.2 Формалізація задачі визначення ризиків порушення роботи розподільчих пристроїв в електроенергетиці	33
1.3 Аналіз існуючих методів прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання РПВН	41
1.4 Висновки до розділу 1 та постановка задачі.....	49
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ РОЗПОДІЛЬЧИХ ПРИСТРОЇВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ	51
2.1 Визначення номенклатури основного відповідального обладнання розподільчих пристроїв високої напруги.....	51
2.2 Аналіз вимог нормативної документації до контролю ТС основного відповідального обладнання розподільчих пристроїв	52
2.3 Аналіз систем моніторингу основної номенклатури відповідального обладнання розподільчих пристроїв високої напруги	56
2.3.1 Системи моніторингу високовольтних вимикачів	56
2.3.2 Системи моніторингу апаратів для захисту від перенапруг	60
2.3.3 Системи моніторингу роз'єднувачів	62
2.3.4 Системи моніторингу трансформаторів струму	63
2.3.5 Аналіз досвіду експлуатації нерівноважно-компенсаційного (балансового) методу моніторингу основної ізоляції трансформаторів струму	65
2.4 Визначення чинників впливу на технічний стан відповідального обладнання розподільчого пристрою високої напруги.....	68
2.5 Висновки до розділу 2.....	73

	13
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ РПВН	75
3.1 Постановка задачі.....	75
3.2 Алгоритм нечіткого моделювання	77
3.3 Евристичний метод визначення ТС відповідального обладнання РПВН.....	82
3.4 Висновки до розділу 3.....	87
РОЗДІЛ 4 НЕЧІТКІ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ТС ОСНОВНОГО ВІДПОВІДАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ РПВН.....	88
4.1 Нечітка модель оцінення технічного стану засобів захисту від перенапруг експертним методом.....	88
4.2 Нечітка модель оцінення технічного стану обладнання комірки високовольтного вимикача	102
4.2.1 Оцінення ТС елегазового високовольтного вимикача	103
4.2.2 Оцінення ТС високовольтного трансформатора струму	106
4.2.3 Оцінення ТС високовольтного роз'єднувача.....	109
4.3 Висновки до розділу 4.....	111
РОЗДІЛ 5 УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ РПВН.....	112
5.1 Постановка задачі.....	112
5.2 Нечіткі відношення	113
5.3 Метод прогнозування залишкового ресурсу за ретроспективною інформацією про функціонування досліджуваного електрообладнання ...	114
5.4 Експертний метод прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання за певним ТС	117
5.5 Експертно-статистичний метод прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання за певним ТС	122
5.6 Висновки до розділу 5.....	128

РОЗДІЛ 6 ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ РПВН ЕКСПЕРТНО- СТАТИСТИЧНИМ МЕТОДОМ.....	129
6.1 Прогнозування ймовірності відмови апарата захисту від перенапруг на певному інтервалі часу	129
6.2 Прогнозування ймовірності відмови комірки високовольтного вимикача на інтервалі часу експертно-статистичним методом	135
6.2.1 Загальний спрацьований ресурс високовольтного елегазового вимикача	137
6.2.2 Загальний спрацьований ресурс трансформатора струму	139
6.2.3 Загальний спрацьований ресурс високовольтних роз'єднувачів комірки	145
6.3 Порівняльний аналіз методів оцінення спрацьованого ресурсу.....	152
6.4 Висновки до розділу 6.....	156
РОЗДІЛ 7. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ РИЗИКІВ ПОРУШЕННЯ РОБОТИ РПВН	157
7.1 Постановка задачі.....	157
7.2 Матрично-топологічний метод визначення ризиків порушення роботи електричної мережі	158
7.3 Ймовірнісно-топологічний метод визначення ризиків порушення роботи РПВН.....	161
7.4 Визначення ризиків порушення роботи РПВН на прикладі електроенергетичного об'єкта ЕЕС України	163
7.5 Висновки до розділу 7.....	170
ВИСНОВКИ	172
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	174
ДОДАТОК А – Побудова ФП термів вхідних лінгвістичних змінних нечіткої моделі для оцінення ТС елегазового вимикача	194
ДОДАТОК Б – Побудова ФП термів вхідних лінгвістичних змінних нечіткої моделі для оцінення ТС трансформатора струму.....	204

ДОДАТОК В – Побудова ФП термів вхідних лінгвістичних змінних нечіткої моделі для оцінення ТС роз'єднувача.....	214
ДОДАТОК Г – Розрахунок ймовірності відмови електрообладнання коміррки високовольтного вимикача	219
ДОДАТОК Д – Побудова причинно-наслідкових матриць для оцінення умовних ймовірностей $p(B/H_1)$ та $p(B/H_2)$	225
ДОДАТОК Е – Акт впровадження.....	230
ДОДАТОК Ж – Список публікацій здобувача	232

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АПВ – автоматичне повторне вмикання
ВРП – відкритий розподільчий пристрій
ЕЕС – електроенергетична система
ЙБР – ймовірність безперебійної роботи
КЗ – коротке замикання
ОЕС – об'єднана електроенергетична система
ОПН – обмежувач перенапруг
ПЛ – повітряна лінія
ППР – планово-попереджувальний ремонт
ПС – понижувальна станція
РЕМ – розподільчі електричні мережі
РП – розподільчий пристрій
РВ – розрядник вентильний
РПВН – розподільчий пристрій високої напруги
СБК – система безперервного контролю
ТН – трансформатор напруги
ТС – технічний стан
ТО – технічне обслуговування
ФН – функція належності

ВСТУП

Станом на кінець 2019 року більша частина генеруючих активів та магістральних і міждержавних мереж 220–750 кВ має дуже великий ступінь зносу: 83% енергоблоків теплових електростанцій (ТЕС) і теплових електроцентралей (ТЕЦ) відпрацювали свій призначений термін служби, 70% енергоблоків атомних електростанцій (АЕС) потребують продовження строку експлуатації, баланс потужності об'єднаної електроенергетичної системи (ОЕС) України має дефіцит маневрених потужностей гідроелектростанцій (ГЕС) і гідроакумулювальних електростанцій (ГАЕС), 90% ліній електропередачі та 55% основного устаткування підстанцій відпрацювало номінальний технічний ресурс.

Так, наприклад, на Дніпровській ГЕС в експлуатації знаходяться трансформатори власних потреб, які були уведені ще в 1949 році (виробництва General Electric, США), тобто напрацювання трансформаторів значно перевищило призначений термін служби. Зрозуміло, що ймовірність відмови такого електрообладнання значно зростає, а встановлення фактичного відпрацьованого ресурсу та недопущення аварійних випадків, що супроводжуються знеструмленням електроспоживачів різних категорій, становлять задачі діагностики.

Актуальність теми. Аналіз технологічних порушень в ОЕС України показав, що основним фактором ризику порушення нормальної роботи електроенергетичних систем (ЕЕС) є технічний стан (ТС) електрообладнання розподільчих пристроїв. Частка аварій, яка припадає на електрообладнання високовольтних розподільчих пристроїв, становить 58%. Стійкість роботи ОЕС (динамічна або статична) залежить від ТС електрообладнання розподільчих пристроїв високої напруги (РПВН).

Існуючі методи та моделі оцінювання залишкового ресурсу високовольтного електрообладнання потребують подальшого вдосконалення, моделі ТС РПВН відсутні та потребують розробки для підвищення

ефективності прогнозування ризиків порушення їхньої роботи. Для удосконалення оцінення залишкового ресурсу електрообладнання потрібні математичні моделі ТС електрообладнання, які інтегруються в системи безперервного контролю (СБК) інтелектуальних мереж SmartGrid, що базуються на експертних знаннях в умовах неповноти або відсутності інформації про функціонування електрообладнання ЕЕС, а це особливо актуально в умовах відсутності профільної організації зі збору та аналізування аварійних та передаварійних випадків роботи РПВН в Україні.

Тобто, існує наукова проблема, що потребує вирішення ряду наукових та науково-практичних задач:

- створення нового методу прогнозування ризиків порушення роботи РПВН, що базується на експертних знаннях, в умовах неповноти або відсутності інформації про функціонування електрообладнання ЕЕС;
- визначення основних факторів впливу на ТС РПВН параметрів відповідального електрообладнання, які можливо контролювати СБК;
- обґрунтування та оцінення ефективності застосування запропонованих методів та моделей.

Визначені положення обумовлюють актуальність науково-практичного завдання – удосконалення методів прогнозування ризиків порушення роботи ВРП ОЕС.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота відповідає науковим напрямам роботи кафедри «Електричні та електронні апарати» Національного університету «Запорізька політехніка» та виконана в рамках науково-дослідної роботи «Дослідження системи прогнозування енергоефективності та діагностики високовольтного обладнання» (№ 03418), збігається з напрямом науково-виробничої діяльності підприємства ТОВ «Енергоавтоматизація» (м. Запоріжжя) і відповідає діючій державній науково-технічній програмі «Ресурс», затвердженій Постановою КМУ від 08.10.2004 № 1334.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення нових моделей і методів прогнозування ризиків порушення роботи РПВН.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі наукові задачі:

- визначити номенклатуру відповідального електрообладнання, від якого залежить функціонування розподільчих пристроїв високої напруги (РПВН);
- визначити основні параметри, які впливають на ТС відповідального електрообладнання РПВН;
- розробити математичні моделі визначення ТС відповідального електрообладнання РПВН;
- визначити метод прогнозування ймовірності відмови електрообладнання РПВН;
- розробити метод прогнозування ризиків порушення роботи РПВН;
- експериментально підтвердити ефективність розроблених моделей і методів для прогнозування ризиків порушення роботи РПВН.

Об'єкт дослідження. Експлуатація розподільчих пристроїв високої напруги ОЕС.

Предмет дослідження. Методи і моделі для прогнозування ризиків порушення роботи розподільчих пристроїв високої напруги.

Методи дослідження. Вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань досягнуто на базі теоретичних основ проектування апаратів високої напруги, теорії ймовірності, теорії надійності, положень теорії нечіткої логіки, методу експертних систем, методу ймовірнісно-статистичного моделювання.

Всі розрахунки в роботі виконано з використанням програмного продукту MATLAB Fuzzy Logic (License Number: 271828) та MATLAB Coder™ для інтегрування в СБК, а також оригінальним програмним забезпеченням СБК ТОВ «Енергоавтоматизація».

Наукова новизна отриманих результатів:

– розроблено ймовірнісно-топологічний метод прогнозування ризиків порушення роботи РПВН, який, на відміну від відомих, враховує топологічний вплив ймовірнісних показників надійності кожного елемента схеми на ризики порушення роботи РПВН, що дозволило удосконалити визначення загального ризику порушення роботи електроустановки, який визначається як добуток матриці окремих ймовірнісних складових ризиків всієї номенклатури однотипного обладнання і матриці фінансових збитків та дозволяє розраховувати фінансові ризики для однотипного обладнання в цілому;

– запропоновано новий підхід прогнозування порушення роботи РПВН, за яким визначається ймовірність відмови комірки в цілому, як елемента РПВН, що дозволяє врахувати вплив технічного ресурсу всіх її складових на надійність роботи комірки;

– обґрунтовано необхідність застосування експертно-статистичного методу визначення ймовірності відмови елемента схеми РПВН на інтервалі часу; це дає можливість модифікувати статистичну функцію розподілу ймовірностей відмови, за даними поточного контролю СБК, із застосуванням нечітких моделей, що дозволяє корегувати прогноз порушення роботи ЕЕС у реальному часі;

– розроблено узагальнену нечітку математичну модель для уніфікації вхідних параметрів впливу на ТС відповідального обладнання РПВН, яка відрізняється від відомих моделей можливістю інтегрувати різні за своєю природою походження діагностичні параметри; на її базі розроблено нечіткі математичні моделі для визначення ТС: елегазового вимикача, роз'єднувача, трансформатора струму, апарата для захисту від перенапруг;

– набула подальшого розвитку теорія прогнозування порушення роботи ОЕС за рахунок обґрунтування застосування експертно-статистичного методу прогнозування ресурсу електрообладнання, ймовірнісно-топологічного методу визначення ризиків порушення роботи

РПВН та застосування нових нечітких моделей визначення ТС електрообладнання.

Практичне значення отриманих результатів:

– за розробленими нечіткими моделями визначення ТС експертно-статистичним методом розраховано ймовірність відмови елементів РПВН на інтервалі часу, що дало підвищення точності прогнозування ризиків порушення роботи РПВН, за даними поточного ТС елементів електроустановки, в умовах неповноти ретроспективної інформації щодо функціонування електрообладнання. За результатами впровадження точність досягає 90–95%, що перевищує існуючі методи на 15–20%;

– підвищення обґрунтованості рішень стосовно розподілення матеріально-фінансових активів підприємств ОЕС з урахуванням прогнозованого ресурсу елементів РПВН електроенергетичних об'єктів;

– можливість впровадження розроблених моделей оцінення поточного ТС в СБК інтелектуальних мереж SmartGrid для підвищення ефективності заходів, спрямованих на забезпечення сталого режиму роботи ОЕС.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, авторові належать такі наукові результати: в роботі [81] – розроблено нечітку модель визначення ТС елегазового вимикача; в роботі [82] – розроблено модель оцінення ймовірності відмови елегазового вимикача на інтервалі часу; в роботі [111] – розроблено нечітку модель визначення ТС апарата для захисту від перенапруг; в роботі [97] – удосконалено нерівновісно-компенсаційний метод контролю стану конденсаторної ізоляції високовольтних апаратів; в роботі [103] – розроблено нечіткі моделі визначення ТС трансформатора струму та роз'єднувача, запропоновано метод визначення ймовірності відмови комірки трансформатора струму; в роботі [128] – розроблено узагальнену нечітку математичну модель визначення ТС відповідального обладнання РПВН,

розроблено ймовірно-топологічний метод прогнозування ризиків порушення роботи РПВН.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи публікувались на Міжнародних науково-практичних конференціях:

– «Innovative engineering, technology and industry. International scientific conference» (Seattle, Washington, USA. Global science and education in the modern realities. August 26-27, 2020);

– «Search for scientific answers to the challenges of our time» (Svishtov, Bulgaria. Search for scientific answers to the challenges of our time'2020. December 28-29, 2020);

– «The current stage of development of scientific and technological progress» (Karlsruhe, Germany. The current stage of development of scientific and technological progress'2021. No 15 on February 9, 2021).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи викладено в 9 наукових працях, з них: 5 статей в наукових фахових виданнях України (серед них 1 – в наукометричній базі Scopus, 3 – у матеріалах конференцій).

Структура й обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається з анотації двома мовами, вступу, семи розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації 233 сторінки, основний текст – 154 сторінки, з них 43 рисунки по тексту; 45 таблиць по тексту; список використаних джерел інформації з 165 найменувань на 19 сторінках; 7 додатків на 39 сторінках.

Зміст роботи. У першому розділі проведено аналіз відмов високовольтного електрообладнання ОЕС України, проаналізовано моделі керування ризиками порушення роботи електроустановок, досліджено методи прогнозування спрацьованого ресурсу електрообладнання. Відповідно до аналізу сформульовано задачі та основні напрямки досліджень.

У другому розділі визначено номенклатуру відповідального обладнання розподільчих пристроїв високої напруги. Проаналізовано вимоги

нормативної документації до діагностичних параметрів, за якими визначається ступінь справного стану відповідального обладнання. Досліджено основну номенклатуру вітчизняних та зарубіжних систем моніторингу технічного стану відповідального обладнання. Розроблено узагальнену нечітку математична модель, для уніфікації вхідних параметрів впливу на ТС відповідального обладнання РПВН, з метою її інтегрування в систему СБК.

У третьому розділі розкрито суть нечіткого моделювання, показано спроможність теорії нечітких множин вирішувати складні задачі параметризації вхідних чинників впливу на ТС електрообладнання. Сформовано теоретичну базу для вирішення задач за допомогою нечіткої логіки.

У четвертому розділі розроблено нечіткі математичні моделі для оцінення ТС електрообладнання РПВН: апарата для захисту від перенапруг, елегазового вимикача, трансформатора струму, роз'єднувача. В моделях використовуються діагностичні параметри, що впливають на ТС, обумовлені нормативною документацією, доступні для вимірювання та спостереження системою моніторингу ТС. Під час налаштування ФН лінгвістичних змінних нечіткої моделі застосовано евристичний метод.

У п'ятому розділі запропоновано експертно-статистичний метод прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання РПВН, який враховує ТС досліджуваної одиниці обладнання і вплив зовнішніх збурень за ретроспективною інформацією. Сформовано загальний підхід до застосування евристичного методу визначення причинно-наслідкових зв'язків між ТС та спрацьованим ресурсом досліджуваної одиниці обладнання. Удосконалено метод модифікації статистичної функції ймовірності відмов певної одиниці обладнання РПВН за поточними діагностичними даними.

У шостому розділі розраховано експертно-статистичним методом ймовірність відмови на інтервалі 1 рік електрообладнання РПВН: апарата для

захисту від перенапруг, елегазового вимикача, трансформатора струму, роз'єднувача. Запропоновано метод визначення ймовірності відмови комірки в цілому для підвищення точності прогнозування порушення роботи РПВН.

У цьому розділі розроблено ймовірнісно-топологічний метод визначення порушення роботи, який поєднує матричний метод побудови топології мережі з ймовірнісним методом прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання. За розробленим методом виконаний прогнозування ризику порушення роботи РПВН підприємства ОЕС України.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКІВ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

1.1 Аналіз пошкоджуваності електрообладнання об'єднаної електроенергетичної системи України

Основним технологічним завданням електроенергетичної галузі України є безперебійне, якісне електропостачання споживачів електричної енергії усіх категорій. Для виконання цього завдання потрібно забезпечити статичну та динамічну стійкість енергосистеми. Згідно з [1], статична стійкість енергосистеми – це відновлення вихідного або близького до нього режиму в умовах малих збурень, тобто за відключення генераторів, трансформаторів, повітряних ліній, навантажень та інших елементів ОЕС України. Динамічна стійкість енергосистеми – це здатність збереження синхронної роботи всіх її елементів у разі сильного збурення в енергосистемі, тобто в екстремальних умовах (раптове відключення одної або двох паралельних ліній електропередачі, короткі замикання, раптове вимкнення потужних споживачів електричної енергії). Статична стійкість енергосистеми розраховується під планові виведення електрообладнання в ремонт, для розподілу потужностей вузлів генерації. Динамічна стійкість енергосистеми розраховується для визначення здатності збереження синхронної роботи вузлів генерації у випадках аварійних відключень значних потужностей для локалізації струмів короткого замикання. Причиною усіх цих процесів є ТС електрообладнання. Тому безперервний моніторинг ТС електрообладнання дозволить завчасно виявляти аварійні дефекти в ізоляції та виводити в ремонт обладнання за його фактичним ТС. Це дозволить значно підвищити статичну та динамічну стійкості енергосистеми і, як наслідок, якість забезпечення споживачів електричною енергією.

Основні вимоги до режимів ОЕС [2]:

- надійність режиму роботи енергосистеми;
- забезпечення безперебійного постачання споживачів електричною енергією;

- забезпечення високої якості електричної енергії.

Для забезпечення цих вимог необхідно [2]:

- підвищувати статичну та динамічну стійкість ОЕС;
- проводити заходи, які обмежують потужність та струм короткого замикання (КЗ);
- наявність системної автоматики, яка забезпечує надійність роботи енергосистеми;
- мобільний резерв активної та реактивної потужностей;
- належний вибір системи регулювання показників якості електричної енергії для підтримання їх величин в допустимих межах;
- автоматизація регулювання цих показників (частоти та напруги) в нормальних та післяаварійних режимах.

Сучасні розробки в електромашинобудуванні та електроапаратобудуванні значно підвищують термін експлуатації електрообладнання за рахунок покращення ізоляційних характеристик та впровадження нових видів ізоляційних матеріалів. Релейний захист, автоматика, вимірювання та облік електричної енергії покращують свою роботу за рахунок підвищення метрологічних характеристик вимірювальних апаратів. Однак, з моменту введення в експлуатацію електрообладнання постійно знаходиться під впливом різноманітних факторів, таких як: вплив зовнішнього середовища, відхилень від нормальних режимів експлуатації та ін. Ці фактори різною мірою скорочують термін експлуатації та погіршують технічний стан (ТС) електричного обладнання. Беручи до уваги зазначене вище, впевнюємось в необхідності впровадження нових методів досліджень, аналізу, розрахунку та прогнозування надійності роботи об'єктів електроенергетики та електрообладнання, яке входить до їхнього складу.

За означенням [3] лінії електропередачі та обладнання розподільчих пристроїв електричних станцій, підвищувальних та понижувальних підстанцій умовно класифікується як обладнання високої (3÷220 кВ) та надвисокої (≥ 330 кВ) напруги. Лінії електропередачі та обладнання розподільчих пристроїв є електрообладнанням міжсистемних зв'язків. Відкриті розподільчі пристрої (ВРП) високої напруги є вузловими точками в ОЕС, в яких відбуваються перетоки електричної енергії.

Обладнання, яке входить до ВРП:

- комутаційне (вимикачі, роз'єднувачі);
- опорна та підвісна ізоляція;
- вимірювальні високовольтні апарати (трансформатори струму, трансформатори напруги (ТН));
- струмопровідні частини (шини, проводи);
- апарати для захисту від перенапруг (розрядники, обмежувачі перенапруг);
- залізобетонні конструкції (портالي, опори, грозозахисні троси);
- заземлювальний пристрій.

Згідно з [4] електрообладнання розподільчих пристроїв всіх видів напруги за номінальними параметрами мають задовольняти умови роботи як в нормальних режимах, так і в аварійних режимах, у випадку перенапруг та нормованих перевантажень. В експлуатації підтримання технічного стану відбувається методом планово-попереджувальних ремонтів (ППР). Такий підхід дещо відтермінує зношення вузлів електрообладнання (механічних, комутаційних, несучих) та ймовірність їхньої дострокової відмови. Також згідно з вимогами [5] електрообладнання має періодично виводитись з роботи для вимірювання електричних характеристик та діагностування ізоляційних характеристик або контролюватись засобами інфрачервоної техніки [6–7]. Дані вимірювань та випробувань заносяться до баз даних або протоколів вимірювання для подальшого аналізування технічного стану та спостереження тенденцій змін стану.

Останнім часом спостерігається тенденція до побудови «інтелектуальних» електроенергетичних систем (концепція SmartGrid) та перехід до підстанцій без постійного обслуговуючого персоналу, невід'ємною частиною яких є системи безперервного контролю (СБК) технічного стану електрообладнання без виведення з роботи (під робочою напругою). До них відносяться: вимірювання струмів витoku ізоляції, контроль часткових розрядів, контроль за допомогою інфрачервоної техніки, ультразвукове діагностування, термоконтроль та вібродіагностика обертових електричних машин. Більшість цих методів є досить фінансово затратними та потребують комплекс технічних заходів для їхнього впровадження, досить високої кваліфікації обслуговуючого персоналу, тому в Україні вони набувають впровадження здебільш на новозбудованих енергооб'єктах.

Аналіз сучасних методів діагностування та прогнозування ТС електрообладнання розподільчих пристроїв високої напруги показує, що вирішення проблеми полягає у: визначенні найбільш відповідального обладнання, яке входить до його складу; визначенні основних факторів, які характеризують його ТС; побудові за заданими факторами математичних моделей для оцінення ТС обладнання, які інтегруються в інтелектуальні мережі SmartGrid. В умовах неповноти, відсутності або викривлення інформації про функціонування електрообладнання, що спричинено відсутністю профілактичної організації зі збору та аналізування даних про аварійні та предаварійні події в ОЕС України, для побудови математичних моделей доцільним є застосування евристичного методу.

Важливим завданням в сучасній діагностиці є поєднання методів комплексного аналізу технічного стану електричних машин та апаратів, як за даними періодичного випробування та результатами ППР (у разі виникнення необхідності в цих заходах), так і за даними, які можна отримати без виведення електрообладнання з роботи.

До них відносяться:

- діагностичні дані, отримані до та після ППР та капітальних ремонтів;

- дані, отримані за допомогою моделей, побудованих на експертній системі для визначення ТС електрообладнання;
- застосування ймовірнісного та статистичних методів для визначення ТС та прогнозування подальшого ресурсу електрообладнання.

Надійне та ефективне функціонування електрообладнання залежить від таких показників як: на першому етапі – якості його виготовлення; в подальшому – режимів роботи, умов експлуатації, ремонту, організації системи обслуговування, діагностування ТС обладнання з прогнозуванням його подальшого ресурсу. Проблемам експлуатації та технічного обслуговування, діагностування та прогнозування ТС, визначення спрацьованого ресурсу обладнання розподільчих пристроїв високої напруги присвячена велика кількість робіт вітчизняних і зарубіжних вчених: А. М. Абдурахманова, В. М. Кутіна, О. Є. Рубаненко, В. Г. Сиченко, О. М. Рассальского, П. Д. Андрієнко, А. В. Журахівського, Б. С. Стогнія, М. Ф. Сопеля, Є. М. Танкевича, Г. В. Шинкаренко, О. А. Сахно, А. Г. Мордковича, В. О. Русова, А. Н. Назаричева, О. І. Таджикибаєва, Д. А. Андреева, Т. Richard, P. Choonhapran, G. Balzer, M. Stanek, P. Verma, T. Stirl, T. W. Krieg, H. Borsi, O. Reyes, Y. Fei, C. Sun, C. Heinrich, V. Hinrichsen, T. Zhou, J. Ruan, Y. Liu, S. Peng, J. Shi, S. Yang, B. Li, X. Lin, Q. Cai, J.–Y. Xu, S. Li. Але питання технічного обслуговування електрообладнання за його фактичним технічним станом відображено в цих роботах недостатньо повно. Вирішення цієї проблеми полягає у виділенні основних параметрів, що характеризують ТС обладнання, та побудові математичних моделей, які б інтегрували ці параметри в загальний ТС, для прогнозування подальшого ресурсу. Принципово важливо визначити параметри, які встановлено нормативною документацією, з можливістю контролювання їх за допомогою СБК.

За результатами аналізу оглядів технологічних порушень в ОЕС України у 2010 – 2016 рр. за даними Державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укренерго» (ДП НЕК «Укренерго») [8 – 14]

визначено тенденцію до щорічного збереження кількості технологічних порушень у роботі електрообладнання (рис. 1.1, рис. 1.2).

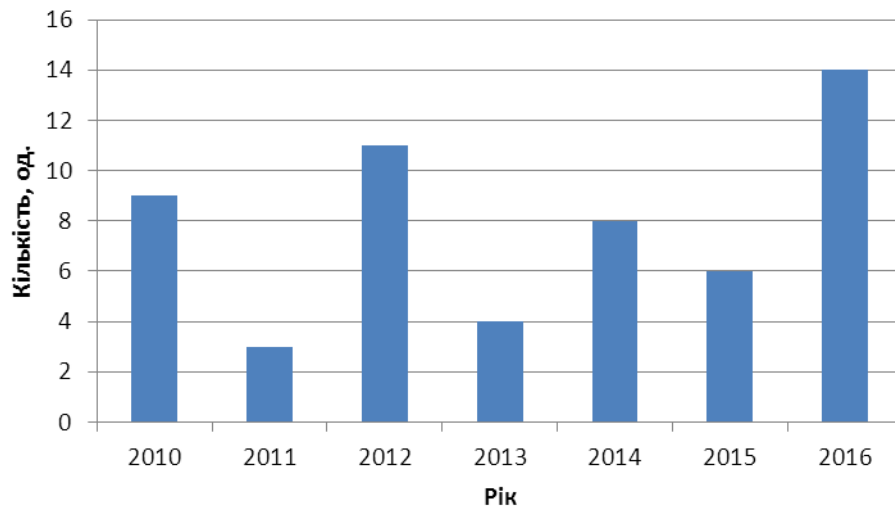


Рисунок 1.1 – Динаміка відмов 1 категорії в ОЕС України

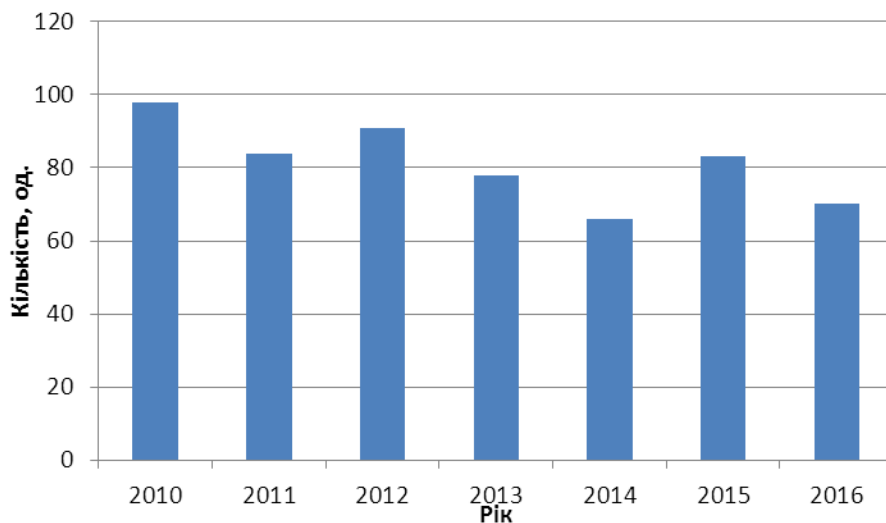


Рисунок 1.2 – Динаміка відмов 2 категорії в ОЕС України

Ці порушення призвели до недовідпуску електроенергії споживачам, під час відмов 1 категорії, сумарно становлячи за досліджуваний період 5904,04 МВт·год; у разі відмов 2 категорії – 1210,07 МВт·год. Динаміку недовідпуску за досліджуваний період подано на діаграмах (рис. 1.3, рис. 1.4).

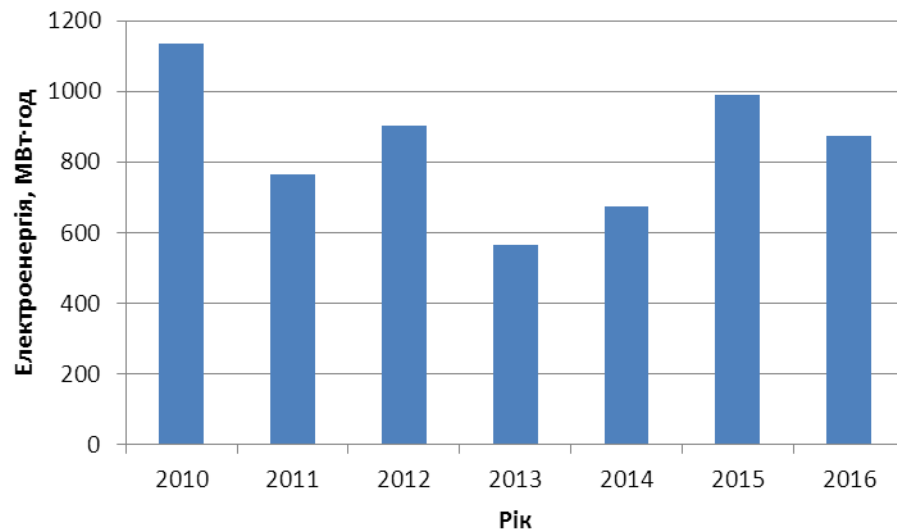


Рисунок 1.3 – Недовідпуск електроенергії у разі відмов 1 категорії в ОЕС України

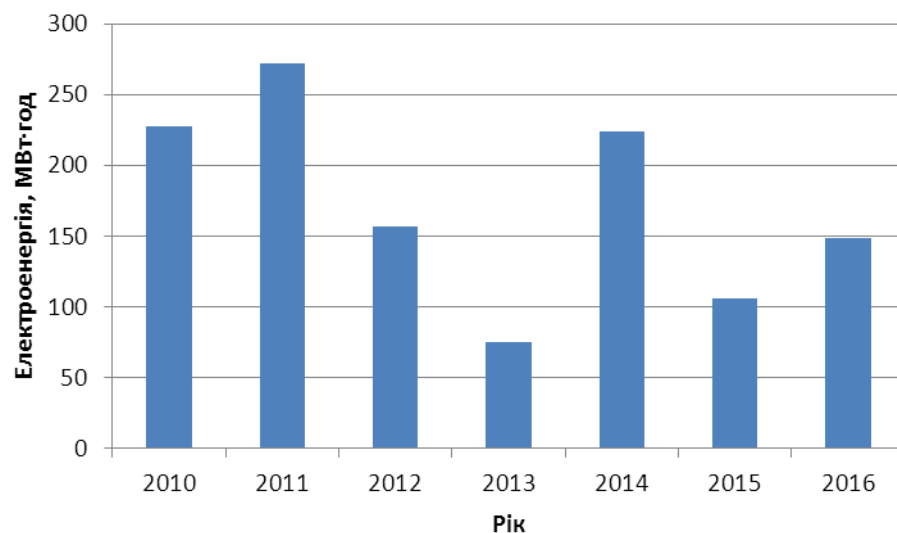


Рисунок 1.4 – Недовідпуск електроенергії у разі відмов 2 категорії в ОЕС України

Основні причини відмов електрообладнання, яке входить до складу електроенергетичної системи:

- спрацювання ресурсу;
- низька якість технічного обслуговування;
- невиконання періодичності та обсягу профілактичних випробувань;
- впливи природних явищ;
- дії сторонніх осіб;

- недостатній рівень використання діагностичних даних про ТС обладнання;

- низький рівень підготовки обслуговуючого персоналу;

- дефекти, обумовлені невідповідною якістю виготовлення та монтажу.

Експлуатаційну надійність основного електротехнічного обладнання, яке входить до складу ОЕС України, можна визначити у відсотковому відношенні до загальної кількості відмов в період з 2010 по 2016 роки. Ці дані відображено на круговій діаграмі (рис. 1.5).

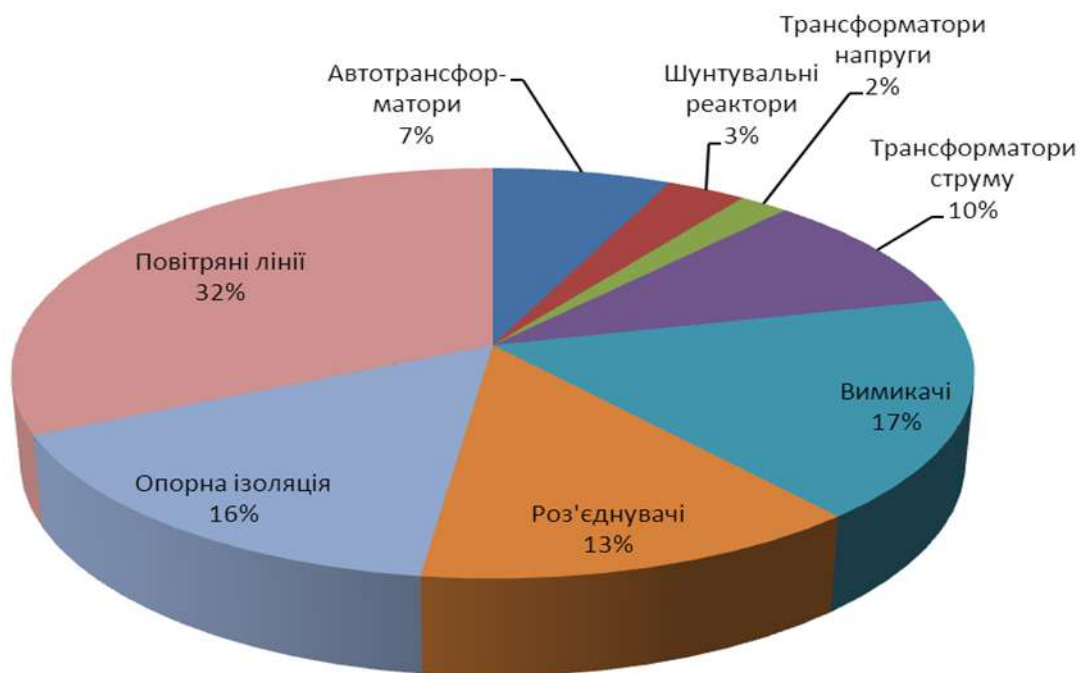


Рисунок 1.5 – Діаграма відмов обладнання ОЕС України в період з 2010 по 2016 рр.

Кількість відмов лінійного обладнання:

- повітряні лінії – 32%;
- шунтувальні реактори – 3%.

Кількість відмов силового обладнання:

- автотрансформатори – 7%.

Кількість відмов обладнання, що належить до розподільчих пристроїв:

- трансформатори струму – 10%;
- трансформатори напруги – 2%;

- вимикачі – 17%;
- роз'єднувачі – 13%;
- опорна ізоляція – 16%.

З цієї діаграми можливо зробити висновок, що найбільший сумарний відсоток відмов припадає на обладнання розподільчих пристроїв – 58%, на інше обладнання припадає – 42%. Тому діагностування обладнання розподільчих пристроїв високої напруги з визначенням поточного ТС для запобігання відмов та прогнозування подальшого ресурсу є актуальною проблемою в ОЕС України.

1.2 Формалізація задачі визначення ризиків порушення роботи розподільчих пристроїв в електроенергетиці

Аналіз, проведений у попередній главі, показав, що основним фактором ризику порушення нормальної роботи ЕЕС є ТС електрообладнання розподільчих пристроїв. Клас робочої напруги електрообладнання розподільчих пристроїв системоутворювальних енергопідприємств визначається як «високий» або «надвисокий». Тому ризик порушення стійкості роботи ЕЕС (динамічної або статичної) залежить від спрацьованого ресурсу елементів мережі, зокрема ТС електрообладнання РПВН. Дослідженню питань оцінення ризиків порушення роботи енергосистем, розподільчих мереж, електропостачання споживачів та засобів для їхнього зниження присвячено праці Костерева М. В., Бардика Є. І., Літвінова В. В., Шушпанова І. М., Воропая М. І., Сулова К. В., Черкасової Н. І., Нікольського О. К., Рассказчикова О. В., Шульпіна А. О., Kwok S., Billinton R., Janjic A., Popovic D., Bertling L., Sankarakrishnan A., Allan R., Wallnerström C. J., Bertling L., Nordgård D. E., Sand K., Wangensteen I., Shmuel S., Shiwen Yu, Wenyuan Li. E. Handschin, Jurgens I., Neumann C., Zicker U.

Вивчення та розробку нових методів дослідження надійності в енергосистемі переважно зосереджено на генерації та передаванні

електричної енергії [15]. В деяких міжнародних дослідженнях [16, 17], засоби аналізу надійності були запропоновані як основний інструмент аналізування ризиків, пов'язаних з генерацією, передаванням та розподіленням електричної енергії. Але частина досліджень [18 – 20] показують, що більшість ризиків простою або недовідпуску електричної енергії великою мірою залежать від розподільчих електроустановок ЕЕС. Значне дослідження класифікації та ефективного керування ризиками проведено в роботах [21, 22]. Але в цих роботах увага більш акцентована на економічній складовій проблеми в разі виникнення надзвичайних подій, які зачіпають інтереси кінцевих споживачів. В роботі [23] керування ризиками розглядається з погляду керування активами електроенергетичних підприємств. В роботі [24] розглядаються заходи щодо запобігання ризиків, прийняття рішень в умовах невизначеності, керування ризиками шляхом пом'якшення небажаних фінансових та управлінських помилок. Дослідження проводиться відповідно до мандата FERC північноамериканської ради з надійності електропостачання (NERC), який визначає надійність як «розмір, в якому оцінюється продуктивність елементів електричної системи виконувати поставку електричної енергії споживачам в межах прийнятих стандартів та в бажаному обсязі». Вивченню оцінювання ризиків за класифікацією по категоріях, ієрархії, моделях оцінення, статусу енергосистеми, часу та алгоритму моделювання присвячено роботи [25, 26]. Також в [26] обговорюється концепція технічного обслуговування з орієнтацією на надійність (Reliability-Centered Maintenance) в енергосистемах, суть якої полягає у важливості впливу елемента енергосистеми на системний ризик. Аналізуючи наведені матеріали, можна зробити висновок, що надійність (стабільна робота) енергосистем значною мірою залежить від розподільчих електроустановок [18 – 20]. Ризик порушення роботи електроустановки визначається як ймовірність фінансових втрат від надзвичайних подій [21, 22], а також впливу ТС елемента схеми на ризик порушення роботи системи

в цілому [26]. Керування ризиками розглядається як керування фінансовими активами [23].

В розвинених зарубіжних країнах (Японія, Німеччина, Франція, США) [27 – 29] для комплексного аналізу причинно-наслідкових зв'язків між ТС електрообладнання та ефективним рішенням щодо розподілу фінансових активів електроенергетичних підприємств застосовується стратегія ризик-орієнтованого управління (Risk-Oriented Asset Management). Перспективні дослідження стосовно ризику порушення роботи електрообладнання підсистем ЕЕС проведено в роботах [30 – 36], в яких розглядається ТС окремої одиниці обладнання підсистеми ЕЕС як чинник впливу на ймовірність виникнення порушень нормальної роботи підсистем. Під час визначення ризиків в підсистемах в цих роботах не береться до уваги топологічний вплив кожного елемента на порушення функціонування підсистеми в цілому. Застосовуючи математичний апарат нечіткої логіки [32], в цих роботах вирішується проблема інтегрування, в процесі визначення ТС електрообладнання, різних за своєю природою чинників впливу на залишковий ресурс електрообладнання. Як об'єкти, ТС яких впливає на ризик зниження надійності роботи енергосистеми, розглядаються тягові підстанції [31], силові трансформатори [30], асинхронні двигуни [35]. Обладнання, яке входить до складу розподільчих пристроїв високої напруги, розглядається на прикладі високовольтних повітряних вимикачів [36]. Але на надійність роботи розподільчої електроустановки впливає також ТС трансформаторів струму, роз'єднувачів, апаратів захисту від перенапруг. Взагалі, в багатьох дослідженнях експлуатаційної надійності електрообладнання ЕЕС це обладнання підпадає під категорію «інше обладнання».

В роботах [37 – 39] досліджено питання надійності роботи розподільчої мережі різної складності конфігурації та заходи щодо її підвищення. Особливу зацікавленість викликає розроблений автором метод [37, 38], в основу якого покладено формування послідовності топологічних

матриць, що відображають стадії роботи електричної мережі. Запропонований метод ґрунтується на методі, розробленому Р. Біллінтоном та Н. Аланом [40]. Суть цього методу полягає в переході від структури мережі до матриці, що є необхідним для зручності моделювання мереж будь-якої конфігурації. Матриця мережі характеризує топологію мережі і топологічний вплив елементів мережі на надійність її роботи. Підсумовуючи огляд літератури щодо визначення ризику порушення роботи електрообладнання, можна зробити висновки:

- ризик визначається ймовірністю відмови конкретної одиниці електрообладнання;
- ймовірність відмови залежить від залишкового ресурсу;
- залишковий ресурс залежить від ТС електрообладнання;
- наслідки ризику залежать від топології електричної мережі.

Відповідно до діючого стандарту [41], означення ризику – «Сукупність ймовірності події та її наслідків». Під подією та наслідком розуміється виникнення певного набору обставин та результат цих обставин. Узагальнене визначення величини ризику, наведене в [21], записується рівнянням

$$Risk\ value = P \cdot C, \quad (1.1)$$

де *Risk value* – величина ризику;

P – розрахункова ймовірність ризику;

C – розрахункове число, пов'язане з категорією наслідків.

Введемо означення поняття ризику порушення нормальної роботи електроустановки $R_{\Sigma el}$, [42], під яким умовно будемо розуміти міру небезпечності, яка кількісно характеризує можливість відмови – аварії на об'єкті, наслідки цієї аварії, ймовірність припинення енергопостачання, технологічні простої електрообладнання. Оцінювання ризику порушення роботи – це аналіз передумов, які призводять до виникнення того чи іншого сценарію розвитку подій, та їхніх наслідків. Такими передумовами насамперед є ТС електрообладнання, відхилення від сталого режиму роботи

енергосистеми (порушення статичної або динамічної стійкості ЕЕС), вплив зовнішніх факторів (природний, людський). Поняття ризику – це комплексне поняття, тому залежно від поставленої задачі, може мати різні похідні цього поняття.

В узагальненому вигляді інтегрований ризик [42] порушення роботи електроустановки можна подати як

$$R_{\Sigma el} = R(Y_E) + R(Y_C) + R(Y_{EKOЛ}), \quad (1.2)$$

де $R(Y_E)$, $R(Y_C)$, $R(Y_{EKOЛ})$ – відповідні складові економічного, соціального та екологічного збитку інтегрованого ризику R_{Σ} .

Ризик відмови є ймовірнісною величиною, тому визначення цього ризику відбувається в умовах невизначеності. Найкращим методом для визначення ризику відмови є методи нечіткого моделювання та нечіткої логіки. Ризик відмови [43] визначається за формулою

$$P_{EO} = Q(t) \cdot B_{vid}, \quad (1.3)$$

де P_{EO} – ризик відмови електрообладнання;

$Q(t)$ – ймовірність відмови електрообладнання;

B_{vid} – важливість відмови електрообладнання.

Формула для розрахунку коефіцієнта важливості для i -го елемента обладнання має вигляд

$$B_{vid(i)} = K_{MЗ(i)} \cdot K_{EЗ(i)} \cdot K_{ТЛ(i)} \cdot K_{К(i)}, \quad (1.4)$$

де $K_{MЗ}$ – коефіцієнт матеріального збитку, в.о.;

$K_{EЗ}$ – коефіцієнт екологічного збитку, в.о.;

$K_{ТЛ}$ – коефіцієнт травмування людей, в.о.;

$K_{К}$ – коефіцієнт категорійності об'єкта, в.о.

Коефіцієнт матеріального збитку вираховується залежно від терміну відновлення від наслідків відмови та впливу на технологічний процес. Коефіцієнт $K_{MЗ}$ визначається як відношення збитку у разі відмови

обладнання, яке розглядається, до максимального збитку, який виникає за повної відмови електроустановки. Величина коефіцієнта екологічного збитку K_{EZ} визначається залежно від наслідків для навколишнього середовища, до яких може призвести аварійна ситуація. Найбільш тяжкими наслідками є пожежі маслоснаповненого обладнання, витік електричного газу з обладнання з газовмісним ізоляційним середовищем. Величина коефіцієнта травмування людей K_{TL} залежить від ступеня небезпечності для обслуговуючого персоналу у випадку пошкодження електрообладнання. Коефіцієнт категорійності K_K залежить від категорії об'єкта, визначеної за важливістю безперебійного електропостачання споживачів. Дані щодо коефіцієнтів категорійності наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Коефіцієнт категорійності об'єкта енергосистеми для споживачів електричної енергії

Ч.ч.	Категорія	K_K , в.о.
1	0	1,00
2	1	0,95
3	2	0,9
4	3	0,85

Аналізуючи (1.2) та (1.3) можна зробити висновок, що інтегральний ризик порушення роботи електроустановки – це ймовірність відмови та наслідки цієї відмови. Кількісну оцінку небезпечності ризику визначимо як добуток ймовірності P негативної події (аварії, пошкодження тощо) та очікуваного збитку Y внаслідок цієї події [44]. Інтегральний ризик являє собою комплексний показник потенційної небезпеки об'єкта, виражений у вигляді узагальненої функції

$$F_R = [P, Y] = \sum (P_j, Y_j), \quad (1.5)$$

де P_j – ймовірність виникнення j -ї небезпечної події;

Y_j – максимальний збиток j -ї небезпечної події.

Також інтегрований ризик можна подати у вигляді арифметичного вектора, який складається з ризику аварійних збитків та збиткової складової ризику, яка залежить від часу відновлення обладнання

$$\bar{R}_\Sigma = (R_p, R_t) \quad (1.6)$$

де R_p – ризик аварійних збитків;

R_t – ризик збитків часу відновлення.

Так само збиткову складову ризику R_t можна розбити на складові, які визначають збитки від недовідпуску електричної енергії W_{EE} та затрати на відновлення обладнання $T_{від}$. Тоді (1.5 1.6) можна записати у вигляді

$$\bar{R}_\Sigma = (R_p, R_w, R_T), \quad (1.7)$$

де R_w – ризик втрат від недовідпуску електричної енергії;

R_T – ризик затрат на відновлення обладнання.

В загальному вигляді [45] сумарний вектор інтегрованого ризику порушення роботи розподільчої електроустановки можна подати у вигляді матриці небезпечності системи, яка розглядається

$$\bar{R}_\Sigma = \begin{bmatrix} R_{p1} & R_{w1} & R_{T1} \\ \dots & \dots & \dots \\ R_{pi} & R_{wi} & R_{Ti} \\ \dots & \dots & \dots \\ R_{pn} & R_{wn} & R_{Tn} \end{bmatrix}, \quad (1.8)$$

де (R_{pi}, R_{wi}, R_{Ti}) – вектор стану небезпечності i -го елемента розподільчої електроустановки.

Стовпці матриці характеризують окремі компоненти вектора R_Σ для кожного окремого виду можливої небезпеки (наслідки аварії, матеріальні втрати від простою та відновлення електрообладнання).

Ризик відмови електрообладнання в ЕЕС згідно з [35] визначається за таким виразом

$$Z = \sum_{i=1}^n P_i \cdot V_i, \quad (1.9)$$

де P – ймовірнісна складова відмови електрообладнання в ЕЕС;

V – фінансові збитки внаслідок відмови одиниці обладнання в ЕЕС.

Для визначення загального ризику відмови електрообладнання ЕЕС скористаємось припущенням, що середньостатистичні фінансові збитки для однотипного обладнання є однаковими. Поєднуючи (1.8) та (1.9), можна визначити загальний ризик порушення роботи РПВН як добуток матриці окремих ймовірнісних складових ризиків всієї номенклатури однотипного обладнання і матриці фінансових збитків

$$Z = \begin{bmatrix} P_{P1} & P_{W1} & P_{T1} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{Pi} & P_{Wi} & P_{Ti} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{Pn} & P_{Wn} & P_{Tn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_p \\ V_w \\ V_T \end{bmatrix}, \quad (1.10)$$

де P_{Pi} – ймовірнісна складова наслідків аварії i -ї одиниці обладнання;

P_{Wi} – ймовірнісна складова недовідпуску електричної енергії i -ї одиниці обладнання;

P_{Ti} – ймовірнісна складова часу відновлення i -ї одиниці обладнання;

V_p – фінансові збитки від наслідків аварії i -ї одиниці обладнання РПВН;

V_w – фінансові збитки від недовідпуску електричної енергії i -ю одиницею обладнання РПВН;

V_T – фінансові затрати на відновлення функціонального стану i -ї одиниці обладнання РПВН.

Згідно з (1.10) можливим є управління фінансовими активами електроенергетичних підприємств ЕЕС. Управління ґрунтується на контролі ТС кожної одиниці обладнання РПВН, який також обумовлює ймовірнісну складову ризику порушення роботи (ймовірності відмови) електрообладнання РПВН.

Ефективне ризик-управління мінімізує сумарні витрати на експлуатацію розподільчих мереж, до яких входять витрати від наслідків пошкодження елементів розподільчої установки, втрати від порушення електропостачання споживачів електричної енергії та витрати на відновлення нормальної роботи. На практиці потрібно проводити аналіз ризиків порушення роботи РПВН для кожного електроенергетичного об'єкта окремо.

1.3 Аналіз існуючих методів прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання РПВН

Методи прогнозування залишкового ресурсу, які існують на сьогодні, мають як переваги, так і деякі недоліки. Наприклад, в роботах [46 – 48] автори використовують експоненціальні моделі прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання. Основний недолік цих моделей полягає в тому, що в процесі визначення ймовірності відмови електрообладнання беруться до уваги події тільки певного періоду часу. Події, що мали вплив на залишковий ресурс в попередньому періоді роботи, не розглядаються. Цей недолік в своїх дослідженнях [49] був усунутий американськими вченими, які запропонували використовувати метод пропорційних інтенсивностей Кокса в прогнозі надійної роботи електрообладнання. Запропонована модель використовує ряд ідентифікаторів відмови, яка характеризує послідовність подій (які відбулись на досить великому інтервалі часу). Такий підхід дозволяє врахувати ряд чинників, внаслідок яких було здійснено вплив на спрацьований ресурс, а також отримати кількісну оцінку його величини. В роботах [50, 51, 52] авторами запропоновано розраховувати залишковий ресурс на основі закону розподілення відмов Вейбула. В своїх моделях під час прогнозування ймовірності відмови в конкретний проміжок часу вони враховували тільки період роботи конкретного електрообладнання. Але в цих моделях не враховується вплив експлуатаційних факторів, які б дозволили більш комплексно оцінити ризики порушення роботи електроустановки. Проблему впливу експлуатаційних факторів на залишковий ресурс

електрообладнання досліджено в роботах [32, 53, 54]. В роботі [53] російського вченого Д. А. Андрєєва, запропоновано модель розрахунку залишкового ресурсу за діагностичними даними поточного контролю. Такий метод потребує СБК, яка має контролювати ТС електрообладнання від самого початку експлуатації.

Методи, які ґрунтуються на статистичних даних функціонування конкретного типу обладнання, запропоновано в роботах [55, 56]. Ймовірно-статистичний метод оснований на даних тривалого періоду спостереження експлуатації певного типу обладнання. Статистична інформація щодо поведінки електрообладнання відображає всі фактори впливу на залишковий ресурс. Недоліком цього методу є відсутність, неповнота або викривлення статистичної інформації стосовно функціонування конкретного типу обладнання.

Також в роботі [55] запропоновано евристичний (експертний) метод оцінення ТС електрообладнання і прогнозування його подальшого ресурсу. Перевагою цього методу є простота та швидкість отримання вихідної інформації. Недоліком є суб'єктивність думки експертів, фактор добору експертів відповідної кваліфікації та досвіду роботи у відповідній галузі.

Метод нечіткого моделювання у разі визначення поточного ТС досліджуваного електрообладнання запропоновано в роботах [32, 33, 57 – 60]. Перевага нечіткого моделювання полягає в можливості інтегрувати різні за природою походження чинники впливу (електричні, теплові, механічні, хімічні та ін.). Також в роботах [57 – 60] враховано вплив поточного ТС електрообладнання на залишковий ресурс поєднанням нечіткого моделювання з ймовірно-статистичним методом прогнозування поведінки досліджуваної одиниці обладнання. В роботі [60] для побудови нечітких моделей запропоновано метод експертного опитування щодо параметризації вхідних функцій, які описують чинники впливу. Також в цій роботі евристичний метод застосовано для встановлення причинного-наслідкових зв'язків між ТС та ймовірністю подальшої поведінки електрообладнання. Але

в зазначених дослідженнях недостатньо приділяється уваги інтеграції цього методу в СБК за параметрами контролю, визначеними нормативною документацією та заводськими інструкціями. Також у випадку визначення ризиків порушення роботи ЕЕС, за запропонованим методом [32], не враховується топологія мережі, яка безпосередньо впливає на величину ризику (ієрархія структури).

Існують різні методи і підходи до визначення ТС електрообладнання РПВН. Відповідальним елементом розподільчої електроустановки є високовольтний вимикач, від роботи якого залежить надійна робота енергосистеми. За відмови вимикача аварія може поширитись на навколишнє та електрично пов'язане з ним електрообладнання, що призведе до великих матеріальних втрат [61]. Перспективним нині є впровадження в електроустановках високої напруги елегазових високовольтних вимикачів, які замінюють більш дорогі в експлуатації повітряні вимикачі.

Основною вимогою для будь-якого вимикача є забезпечення відключення аварійної ділянки за мінімально можливий час [62]. Спрацьований ресурс високовольтного вимикача залежить від двох основних чинників: стану дугогасильного середовища з головною контактною системою та механічних характеристик привода [63, 64]. Існують різні методи діагностики технічного стану елегазових вимикачів, але в них є ряд недоліків: невирішена проблема завад електромагнітних полів для тестувальних систем [65, 66], не враховується тип газозмісного середовища вимикача [67]. Вагоме вдосконалення існуючих методів діагностики ТС елегазових вимикачів запропоновано в [68 – 71]. Суть запропонованих методів полягає в тестуванні головної контактної системи струмом різної частоти та в контролі цього струму під час виконання вимикачем комутаційних операцій. Цей метод дозволяє уникнути завад, пов'язаних з електромагнітним полем навколишніх електроустановок. Застосування цього методу дозволяє оцінити інтегральний стан елегазового вимикача, але на виведеному з роботи обладнанні.

В роботах [72 – 75] оцінюються інтенсивності відмов різних типів вимикачів за певними термінами експлуатації, тобто наведено узагальнені дані щодо історії функціонування високовольтних вимикачів. Провести ймовірнісне оцінення спрацьованого ресурсу конкретної одиниці обладнання за цим методом є не можливим, тому що він базується на генеральній сукупності подій досліджуваного типу обладнання. В [76, 77] запропоновано оцінювати залишковий ресурс вимикача за його «історією життя», тобто за інформацією, яка в вітчизняних умовах може бути неповною або викривленою. В [78, 79] пропонується застосування ймовірнісного підходу до визначення ТС електрообладнання, який базується на репрезентативній статистичній вибірці. Оцінення ТС високовольтного вимикача тільки за спрацьованим комутаційним ресурсом пропонується в роботах [45, 46, 80] без врахування спрацювання механічного ресурсу. Перевагою такого методу є врахування характеристик конкретної одиниці обладнання, недоліком – визначення ТС вимикача за одним чинником впливу та наявністю достовірної ретроспективної інформації щодо кількості відключень струмів КЗ. В роботах [81, 82] запропоновано поєднання евристичного та ймовірнісно-статистичного методів для прогнозування ймовірності відмови елегазового вимикача на інтервалі часу. В роботі [81] побудовано нечітку модель визначення ТС елегазового вимикача, параметризацію якої виконано експертним опитуванням. В роботі [82] за статистичними даними функціонування елегазових вимикачів та з урахуванням поточного ТС елегазового вимикача розраховано ймовірність відмови на інтервалі 1 рік.

Не менш важливим елементом РПВН є трансформатор струму, від роботи якого залежить надійність роботи пристроїв релейного захисту і автоматики (РЗА), пристроїв обліку електричної енергії. Зміна тангенса кута діелектричних втрат, зміна ємності та середньоквадратичне значення струму комплексної провідності є основними діагностичними параметрами стану основної ізоляції [83 – 86]. Суттєві дослідження контролю трансформаторів струму під робочою напругою було проведено в роботах [87 – 90]. Так в

роботі [87] розроблено методику перехресного вимірювання тангенса кута діелектричних втрат ($\text{tg}\delta_1$). Суть методики полягає у використанні кожного об'єкта однойменної фази як еталонного, так і як контрольованого об'єкта. Цей метод базується на припущенні, що неможливим є розвинення дефекту на 50% всіх контрольованих об'єктів однойменної фази. В [88] проведено аналіз методів контролю характеристик основної ізоляції трансформаторів струму 330–750 кВ, за якого відмічено основні негативні фактори, що впливають на точність вимірювання. Зроблено висновок щодо методів, які з необхідною точністю забезпечують вимірювання стану головної ізоляції. В роботі [89] запропоновано удосконалений метод прогнозування залишкового ресурсу трансформаторів струму РПВН та застосування розробленого методу прогнозування в системах СБК. В [90] оцінено ефективність впровадження СБК на ПС «Днепр-Донбасс 330 кВ», в якій використано модель і метод, описані в [87, 89]. Дослідження недоліків існуючих методів контролю трансформаторів струму та пропозиції щодо удосконалення цих методів наведено в роботах [91 – 97]. Так, в [91 – 96] проведено аналіз негативного досвіду впровадження нерівноважно-компенсаційного методу, який має досить широке впровадження в ЕЕС.

Істотні дослідження щодо прогнозування залишкового ресурсу трансформаторів струму проведено закордонними вченими [98 – 102]. В роботах [98, 99] досліджуються технології, методики, алгоритми оцінення стану основної ізоляції (ТрС) під робочою напругою для визначення спрацьованого ресурсу, але залишилось невирішеним питання комплексного оцінення ТС вимірювальних трансформаторів, що робить дослідження не достатньо об'єктивними. В дослідженнях [100] було ідентифіковано та класифіковано електричні вимірювальні апарати з високим рівнем відмови, але не було виявлено функціональної залежності ймовірності відмови від календарного ресурсу. В роботах [101, 102] приділяється увага методу оцінення лише за визначенням метрологічних характеристик вимірювальних трансформаторів, а також проблемам модернізації конструктивних елементів

ТРС для роботи в електромережі випрямленого струму. На жаль високовольтні електромережі постійного струму нині не знайшли широкого впровадження в ЕЕС України.

В роботі [103] поставлено питання визначення ймовірності відмови комірки трансформатора струму в цілому, тобто враховано вплив ТС трансформаторів струму і роз'єднувачів на загальні ймовірнісні показники надійної роботи комірки РПВН. В процесі визначення ТС обладнання враховано основні чинники впливу на спрацьований ресурс обладнання комірки. Оцінювання технічного стану здійснювалось методом нечіткого моделювання з параметризацією вхідних чинників впливу евристичним методом.

Відповідальними елементами, які виконують захисні функції від пошкодження головної ізоляції електрообладнання РПВН, а також силового маслонаповненого обладнання грозовими або комутаційними перенапругами є вентиляльні розрядники (ВР) та обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН). Вентиляльні розрядники призначені для захисту ізоляції від грозових та короткочасних комутаційних перенапруг. Обмежувачі перенапруг нелінійні призначені для захисту ізоляції електрообладнання напругою 6–750 кВ змінного струму промислової частоти 50 Гц від комутаційних та грозових перенапруг і мають досить стабільні захисні характеристики протягом усього строку служби [4, 104]. Стан ВР та ОПН ефективно контролюється засобами інфрачервоної техніки без вимкнення апаратів з експлуатації. Але ці методи не дають можливості для комплексного, інтегрованого оцінення ТС апаратів захисту від перенапруги, а здебільшого аналіз зводиться до інтуїтивного (експертного) оцінення технічного спеціаліста.

Методи оцінювання надійності та ймовірності відмови апаратів захисту від перенапруг, які існують на сьогодні, різноманітні. У [105] для вибору ОПН побудовано модель, яка враховує властивості та характеристики мереж (схеми, режими та засоби заземлення нейтралі, конфігурацію та склад обладнання тощо), але ця модель є більш корисною для проектувальних

цілей, ніж для оцінювання технічного стану ОПН в поточній експлуатації. В статті [106] побудовано модель для дослідження роботи засобів захисту від перенапруг в енергосистемах за наявності в них вищих гармонік, які призводять до зниження терміну експлуатації. Згідно з [107] надійна експлуатація засобів захисту від перенапруг залежить від правильного вибору характеристик засобів захисту залежно від місця їхнього розташування. Але ці методи корисні лише на стадії проектування. Також в [107] пропонується для контролю стану ОПН проводити статистичний аналіз та узагальнення досвіду експлуатації на основі використання датчиків спрацювання ОПН у разі захисту обладнання.

Оцінювання ТС апаратів захисту від перенапруг присвячено роботи іноземних авторів [108 – 110]. В [108] виконується порівняльний аналіз систем «on-line» контролю ОПН з метал-оксидними нелінійними елементами. В [109, 110] розглядаються методи діагностування ТС апаратів під робочою напругою. Але ці методи базуються на контролі струму витоку третьої гармоніки і не виконують комплексного оцінення ТС апарата захисту від перенапруг, зокрема оцінювання теплового стану апарата. Розглянуті вище моделі базуються на рекомендаціях до вибору апаратів захисту (за основними характеристиками) на стадії проектування електроустановки, що є запорукою їхньої нормальної експлуатації, або досліджують ТС апаратів захисту за однією характеристикою, що не є досить об'єктивно. Вирішення проблеми комплексного оцінення за основними чинниками впливу, обумовленими нормативними документами, наведено в роботі [111].

Важливими елементами РПВН є роз'єднувачі та опорно-стрижнева та підвісна ізоляція. Опорна та підвісна ізоляція виконують функцію відокремлення струмопровідних частин РПВН високої напруги від заземлених елементів. Основним засобами контролю ізоляції є акустичне обстеження та обстеження методом інфрачервоної термографії відповідними підрозділами електроенергетичних підприємств [3 – 6]. Особливий інтерес становить контроль ТС роз'єднувачів. За наявності в роз'єднувачах рухомих

контактних з'єднань до вищеперелічених методів додається контроль механічної та головної струмопровідної систем.

Дослідженню ТС роз'єднувачів присвячено дещо менше уваги ніж комутаційному, вимірювальному та захисному обладнанню РПВН, але існують роботи із визначення ступеня спрацювання окремих вузлів роз'єднувача [112 – 117]. Наприклад, в роботах [112, 113] запропоновано моніторинг стану привода роз'єднувача контролем струмів двигуна під час механічних операцій з апаратом. Також в [112] додатково пропонується контролювати тепловий стан контактних з'єднань. Але апаратна база для застосування цього методу є досить дорогою. Враховуючи велику кількість роз'єднувачів, порівняно із загальною кількістю обладнання РПВН, цей метод не є фінансово виправданим. В роботах [114 – 117] розглянуто методи діагностування за струмом двигуна привода методом акустичної вібрації, ультразвукового діагностування, вимірювання напруги-деформації, вимірювання електромагнітних полів.

Застосування таких методів контролю ТС роз'єднувачів є досить дорогим, враховуючи значну кількість роз'єднувачів, і не є фінансово виправданим відносно вартості апарата. Або ці методи можуть бути застосовані під час діагностування ТС у випадку виведення електрообладнання в ремонт персоналом технічного діагностування. В роботі [103] було запропоновано контролювати ТС роз'єднувача за двома параметрами – контролем кількості механічних циклів, здійснених роз'єднувачем, та за даними теплового стану об'єкта. Дані теплового стану отримуються зі стаціонарних тепловізорів, які останнім часом знаходять широке застосування в електроенергетиці. Дані, що стосуються здійснених механічних операцій, отримуються з блок-контактів привода роз'єднувача. Інтегрування цих параметрів під час визначення ТС здійснюється за допомогою математичного апарата нечіткої логіки.

1.4 Висновки до розділу 1 та постановка задачі

Проведений огляд літературних джерел з теми дисертаційної роботи дозволяє зробити висновки:

1. Стан електроенергетичної галузі України характеризується виробленням номінального календарного ресурсу ліній електропередач, генераторів, силових трансформаторів, обладнання розподільчих мереж. Сумарна частка відмов, в загальній кількості обладнання ЕЕС, припадає на електрообладнання розподільчих пристроїв, яка досягає 58%.

2. Аналіз підходів до визначення ризиків порушення роботи електрообладнання показав, що визначення ризиків проводиться в таких умовах:

– без врахування поточного технічного стану елементів, базуючись на узагальнених експлуатаційних показниках;

– досліджуються лише економічні, екологічні та безпекові аспекти ризику без врахування технічно-експлуатаційної складової;

– під час прогнозування ризиків в енергосистемі не враховується топологія мережі;

– не достатньо уваги приділено відповідальному електрообладнанню РПВН.

3. Аналіз існуючих методів прогнозу показав:

– більшість існуючих методів є непридатними до інтегрування в СБК внаслідок відсутності уніфікації чинників впливу на загальний ТС;

– недостатня інформативність, діагностування за окремими чинниками впливу без інтегрального оцінення ТС;

– важкість технічної реалізації в умовах експлуатації потребує для діагностування ТС виведення обладнання з роботи і є досить дорогим.

З урахуванням вищезгаданого в дисертаційній роботі поставлено задачі:

– визначити номенклатуру відповідального електрообладнання РПВН, від якого значною мірою залежить його нормальне функціонування;

- проаналізувати основні чинники впливу на ризики порушення нормального функціонування РПВН, визначити відповідно до нормативної документації найбільш інформативні параметри, які можна контролювати в режимі безперервного контролю;
- проаналізувати системи моніторингу ресурсних показників електрообладнання РПВН та діагностичні параметри, за якими визначається ТС цими системами;
- розробити, згідно з проведеним аналізом систем моніторингу та діагностичних параметрів, узагальнену (уніфіковану) нечітку математичну модель визначення ТС відповідального електрообладнання РПВН з метою інтегрування в СБК;
- розробити, на базі узагальненої нечіткої моделі, математичні моделі визначення ТС для кожного типу певного відповідального обладнання РПВН;
- удосконалити метод прогнозування ресурсних показників відповідального обладнання РПВН за даними «on-line» моніторингу системами СБК;
- провести експериментальне прогнозування ймовірності відмови відповідального обладнання РПВН за розробленими нечіткими моделями визначення ТС;
- розробити новий метод прогнозування ризику порушення роботи РПВН, який враховує ТС відповідального обладнання РПВН та його вплив на ресурсні показники кожного елемента, а також топологічний вплив кожного елемента, на порушення нормального функціонування електроустановки в цілому;
- провести експериментально-модельне визначення ризику порушення роботи РПВН на прикладі електроустановки ОЕС України.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ РОЗПОДІЛЬЧИХ ПРИСТРОЇВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

2.1 Визначення номенклатури основного відповідального обладнання розподільчих пристроїв високої напруги

За означенням [63] розподільчим пристроєм називається електроустановка, яка слугує для прийняття та розподілення електричної енергії і містить комутаційні апарати, збірні та з'єднувальні шини, допоміжні пристрої (компресорні, акумуляторні та ін.), пристрої релейного захисту, автоматики та вимірювальні прилади. Однією з найважливіших функцій обладнання розподільчих пристроїв є визначення та локалізація місць виникнення аварійної ситуації, яка може призвести до порушення статичної або динамічної стійкості енергосистеми. Функцію локалізації аварійних ситуацій, у разі пошкодження високовольтного обладнання, виконують високовольтні вимикачі. Функцію визначення наявності та місця аварій виконує вимірювальний трансформатор струму, який входить до складу комірки. Функцію відокремлення аварійних ділянок після знеструмлення виконують високовольтні роз'єднувачі, які також входять до складу комірки високовольтного вимикача.

Інша не менш важливіша функція обладнання, яке входить до складу розподільчого пристрою – це захист електрообладнання від перенапруг (комутаційних або грозових), які можуть призвести до пошкодження ізоляції електрообладнання та виходу його з ладу. Це може призвести до обмеження або припинення енергопостачання споживачів.

Структурну схему відповідального обладнання РПВН зображено на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Структурна схема відповідального обладнання РПВН

Виходячи з певної номенклатури основного відповідального обладнання, можна скласти перелік електрообладнання, яке потребує діагностування параметрів ТС для надійної роботи як самого розподільчого пристрою, так і енергосистеми в цілому. Визначення параметрів, які найбільш впливають на ТС апаратів та контроль цих параметрів в режимі «on-line» СБК може запобігти виникненню непередбачуваних аварійних ситуацій та запобігти порушенням в роботі енергосистеми.

2.2 Аналіз вимог нормативної документації до контролю ТС основного відповідального обладнання розподільчих пристроїв

Документом, який регламентує діагностичні випробування електрообладнання в Україні є СОУ – Н ЕЕ 20.302:2007 «Норми випробування електрообладнання», затверджений указом міністерства палива та енергетики України № 13 від 15.01.2007 р. [4]. Технічне діагностування електрообладнання засобами інфрачервоної техніки регламентується СОУ – Н ЕЕ 20.577:2007 «Техническое диагностирование электрооборудования и контактных соединений электроустановок и воздушных линий электропередачи средствами инфракрасной техники», який затверджений указом міністерства палива та енергетики України № 89 від 15.02.2007 р. [5]. Впровадження СБК (Smart Grid) може виключити випробування типу «Т» або «М» і частково скоротити кількість випробувань

типу «К», але випробування типу «П» і «К» виключити неможливо. Випробування типу «П» виявляють заводські і монтажні дефекти, а випробування типу «К» характеризують ТС обладнання для продовження його ресурсу.

Періодичність, обсяг вимірювань і випробувань елегазових вимикачів відповідають:

- під час першого увімкнення – (П);
- під час капітального ремонту – (К);
- під час поточного ремонту – (Т) та місцевим інструкціям.

В таблиці 2.1 подано вимоги до проведення ремонтів елегазових вимикачів та можливість їхнього корегування.

Таблиця 2.1 – Зведена інформація стосовно вимог до проведення випробувань елегазових вимикачів

№ пункту СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007	Можливість відміни за використання СБК або зміни періодичності
14.1 Вимірювання опору ізоляції	Під час «П» і «К»
14.2 Вимірювання опору постійному струму	Під час «П», «К». «Т» (тільки за наявності прогнозованого дефекту СБК)
14.3 Випробування ізоляції підвищеною напругою промислової частоти	Під час «П» і «К»
14.4 Вимірювання опору обмоток електромагнітів керування і додаткових резисторів у їх колі	Під час «П» і «К»
14.5 Перевірка мінімальної напруги спрацювання вимикачів	Під час «П» і «К»
14.6 Випробування конденсаторів дільників напруги	Під час «П» і «К»
14.7 Перевірка характеристик вимикача	Під час «П», «К». «Т» (тільки за наявності прогнозованого дефекту СБК)
14.8 Перевірка характеристик приводів вимикачів	Під час «П» і «К»
14.9 Випробування вимикачів багаторазовим вмиканням і вимиканням	Під час «П», «К». «Т» (тільки за наявності прогнозованого дефекту СБК)
14.10 Перевірка герметичності	Під час «П», «К». «Т» (тільки за наявності прогнозованого дефекту СБК)
14.11 Перевірка чистоти і вологості елегазу	Під час «П» і «К»
14.12 Перевірка давача густини елегазу	Під час «П» і «К»
14.13 Випробування вбудованих трансформаторів струму	Під час «П» і «К»

Періодичність, обсяг вимірювань і випробувань роз'єднувачів відповідають:

- під час першого увімкнення – (П);
- під час капітального ремонту – (К);
- під час поточного ремонту – (Т) та місцевим інструкціям.

В таблиці 2.2 подано вимоги до проведення ремонтів роз'єднувачів та можливість їхнього корегування.

Таблиця 2.2 – Зведена інформація стосовно вимог до проведення випробувань роз'єднувачів

№ пункту СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007	Можливість відміни за використання СБК або зміни періодичності
15.1 Вимірювання опору ізоляції	Під час «П» і «К»
15.2 Випробування ізоляції підвищеною напругою промислової частоти	Під час «П» і «К»
15.3 Контроль багатоеlementних ізоляторів за допомогою штанги	Під час «Т» (тільки за наявності прогнозованого дефекту СБК)
15.4 Вимірювання опору постійному струму	Під час «П», «К». «Т» (тільки за наявності прогнозованого дефекту СБК)
15.5 Вимірювання витягувальних зусиль рухомих контактів з нерухомих	Під час «П», «К». «Т» (тільки за наявності прогнозованого дефекту СБК)
15.6 Перевірка роботи роз'єднувача	Під час «П», «К». «Т» (тільки за наявності прогнозованого дефекту СБК)
15.7 Визначання часових характеристик	Проводиться для короткозамикачів
15.8 Механічні випробування опорно-стрижневих ізоляторів	Під час «П», «К». «Т» (тільки за наявності прогнозованого дефекту СБК)

Періодичність, обсяг вимірювань і випробувань розрядників та обмежувачів перенапруг відповідають:

- до монтажу – (П);
- після монтажу, до увімкнення під робочою напругою – (П);
- під час експлуатації – (М) та місцевим інструкціям.

В таблиці 2.3 подано вимоги до проведення ремонтів вентиляльних розрядників та можливість їхнього корегування.

Таблиця 2.3 – Зведена інформація стосовно вимог до проведення випробувань вентильних розрядників

№ пункту СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007	Можливість відміни за використання СБК або зміни періодичності
21.1.1 Вимірювання опору розрядників і елементів розрядників	Під час «П», «М» (тільки за наявності прогнозованого дефекту СБК)
21.1.2 Вимірювання струму провідності розрядників за випрямленою напругою	Під час «П», «М» (тільки за наявності прогнозованого дефекту СБК)
21.1.3 Вимірювання струму провідності розрядників під робочою напругою	Періодичний контроль замінюється на автоматизований безперервний
21.1.4 Вимірювання пробивної напруги розрядників	Цей пункт не застосовується для вентильних розрядників розподільчих пристроїв високої напруги
21.1.5 Контроль стану елементів розрядників за допомогою інфрачервоної техніки	Періодичний контроль замінюється на автоматизований безперервний
21.1.6 Випробування вентильних розрядників під час капітального ремонту з розкриттям	Під час «К» (тільки за наявності прогнозованого дефекту СБК)

В таблиці 2.4 подано вимоги до проведення ремонтів обмежувачів перенапруг та можливість їхнього корегування.

Таблиця 2.4 – Зведена інформація стосовно вимог до проведення випробувань обмежувачів перенапруг

№ пункту СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007	Можливість відміни за використання СБК або зміни періодичності
21.2.1 Вимірювання опору обмежувача перенапруг мегаомметром	Під час «П»
21.2.2 Вимірювання опору ізоляції ізольованої основи або ізольованого виводу обмежувача перенапруг	Під час «П», «М» (тільки за наявності прогнозованого дефекту СБК)
21.2.3 Перевірка пристрою для вимірювання струму провідності під робочою напругою	Під час «П», «М» (тільки за наявності прогнозованого дефекту СБК)
21.2.4 Випробування ізольованого виводу обмежувача перенапруг	Під час «П», «М» (тільки за наявності прогнозованого дефекту СБК)
21.2.5 Вимірювання струму провідності обмежувача перенапруг	Періодичний контроль замінюється на автоматизований безперервний
21.1.6 Контроль стану обмежувачів перенапруг за допомогою інфрачервоної техніки	Періодичний контроль замінюється на автоматизований безперервний

Періодичність, обсяг вимірювань і випробувань розрядників та обмежувачів перенапруг відповідають:

- до монтажу – (П);
- під час капітального ремонту – (К);
- під час поточного ремонту – (Т) та місцевим інструкціям;
- під час експлуатації – (М) та місцевим інструкціям.

В таблиці 2.5 подано вимоги до проведення ремонтів вимірювальних трансформаторів та можливість їхнього корегування.

Таблиця 2.5 – Зведена інформація стосовно вимог до проведення випробувань вимірювальних трансформаторів

№ пункту СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007	Можливість відміни за використання СБК або зміни періодичності
9.1 Вимірювання опору ізоляції	Міжремонтний контроль тільки за наявності прогнозованого дефекту за п. 9.13
9.2 Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат і ємності ізоляції обмоток трансформаторів струму	Міжремонтний контроль тільки за наявності прогнозованого дефекту за п. 9.13
9.3 Випробування підвищеною напругою промислової частоти	Цей пункт не застосовується для вимірювальних трансформаторів розподільчих пристроїв високої напруги
9.9 Перевірка струму і втрат неробочого ходу трансформаторів напруги	Міжремонтний контроль тільки за наявності прогнозованого дефекту за п. 9.13
9.10 Випробування трансформаторного масла	Міжремонтний контроль тільки за наявності прогнозованого дефекту за п. 9.13
9.11 Випробування конденсаторів ємнісних трансформаторів напруги	Міжремонтний контроль тільки за наявності прогнозованого дефекту за п. 9.13
9.13 Контроль ізоляції під робочою напругою	Періодичний контроль замінюється на автоматизований безперервний

2.3 Аналіз систем моніторингу основної номенклатури відповідального обладнання розподільчих пристроїв високої напруги

2.3.1 Системи моніторингу високовольтних вимикачів

Апаратами, від надійного функціонування яких значною мірою залежить надійність роботи електроенергетичної системи, є високовольтні

вимикачі. В разі виникнення аварійних ситуацій, під час пошкодження ізоляції високовольтного обладнання з виникненням струмів короткого замикання, надійність локалізації цих аварійних ділянок насамперед залежить від високовольтних вимикачів. Перспективним напрямком розвитку впровадження вимикачів на високі класи напруги є елегазові вимикачі, але вибір типу елегазового вимикача в умовах недостатнього досвіду експлуатації стає відповідальним завданням для підприємств, в яких вони будуть експлуатуватись [65, 70].

Широке впровадження елегазових вимикачів в енергосистеми України свідчить про необхідність розробки та впровадження нових методів і моделей діагностування ТС, які можливо здійснювати без виведення вимикача з експлуатації. Ці методи мають бути універсальними, інформативними та дозволяти комплексно оцінити ТС вимикача на час спостереження.

Існує досить велика кількість систем контролю високовольтних вимикачів, що контролюють такі показники ТС вимикача як: вібраційні показники (вібрація контактів та рухомих частин привода вимикача), акустичні (контроль стану опорно-стрижневої ізоляції), теплові (тепловий стан контактної системи), хімічні (стан ізоляційного середовища), електричні (перехідний опір контактної системи, струм кола соленоїда та ін.), часові показники. Але не всі ці параметри можливо контролювати в режимі «on-line» діагностування. Наприклад, експертна система «Нікта», виробника ТОВ «DIMRUS» [118], контролює такі динамічні та статичні параметри вимикача:

- час замикання головного контакту та послідовності замикання;
- середню швидкість руху, прискорення та переміщення контактів в процесі замикання;
- величину, характер та час «встановлення» опору головного контакту;
- динамічні загрузки в механічній системі вимикача під час вмикання;

- особисті резонансні частоти механічної системи вимикача у різних фазах вмикання, інтенсивність затухання коливань;
- опір головних контактів;
- різниця в часі замикання контактів;
- максимальний та усталений струм керування.

За заміряними параметрами експертна частина системи «Нікта» дає можливість визначати такі параметри ТС вимикача (з коефіцієнтом градації від 1 – «добре» до 0,8 – «недопустиме»): коефіцієнт узагальненого ТС вимикача, коефіцієнт ТС головного контакту (контактів) вимикача, коефіцієнт ТС механічної системи вимикача, залишковий комутаційний ресурс контрольованого вимикача (визначається у відсотках від ресурсу умовного «нового» вимикача). Експертна система «Нікта» не контролює стан ізоляційного середовища (рідкого або газовмісного) вимикача, тиск повітря у повітряному вимикачі. «Нікта» є досить інформативною системою діагностування стану вимикача, але вона застосовується лише на виведеному з роботи обладнанні.

Підприємством ТОВ «DIMRUS» випускається система моніторингу та діагностування дефектів комутаційного обладнання «BDM» (Breaker Diagnostics and Monitoring System) та «BDM/PD» з контролем часткових розрядів. Можливості системи «BDM» та «BDM/PD» [119]:

- контроль стану ізоляції вимикачів на основі аналізу часткових розрядів;
- контроль роботи привода вимикача на основі графіка зміни струмів соленоїдів керування та динамічних ударів в приводі;
- аналіз різночасовості роботи головних контактів по фазах на основі контролю зміни фазних струмів;
- контроль технологічних параметрів, набір яких залежить від типу контрольованого вимикача.

Система моніторингу «BDM/PD» – це система безперервного контролю високовольтних вимикачів обладнання, що знаходиться в роботі,

тому діагностування стану ізоляції методом контролю часткових розрядів є дуже складною задачею, оскільки обладнання знаходиться під впливом електромагнітних полів навколишнього обладнання. Для діагностування ізоляції доцільнішим є використання непрямих методів (тепловізійний контроль).

Розглянемо систему моніторингу високовольтного вимикача АВМ-В ТОВ «АВМ-Енерго» [120] та аналогічну за функціональними можливостями систему моніторингу АББ OLM2 (On-LineMonitoring) [121]. Система моніторингу АВМ-В призначена для вирішення завдань, таких як безперервне вимірювання, реєстрація та відображення основних параметрів високовольтних вимикачів в нормальних, передаварійних та аварійних режимах; прогнозування ТС та розрахунок залишкового ресурсу вимикача. Блок АВМ-В виконує такі функції:

- контроль стану елегазу (густина, розрахунок точки скраплення, контроль рівня витоку);
- контроль робочих операцій (кількість операцій, визначення неповнофазних режимів, час спрацювання);
- контроль струму вимкнення (вимірювання струму, розрахунок електричного зносу контактів, вимірювання часу горіння дуги);
- контроль заводу пружин (час заведення, кількість запусків двигуна заводу, вимір струмів запуску двигуна заводу);
- контроль власних потреб та оперативних кіл (контроль цілісності кіл соленоїдів, контроль напруги живлення, контроль температури).

Система моніторингу АВМ-В є системою безперервного контролю за станом обладнання, контролює досить великий спектр показників ТС високовольтного вимикача. Але це підвищує її собівартість та складність в обслуговуванні експлуатуючим персоналом. Також контроль великої кількості параметрів, складність самої системи та датчиків контролю параметрів підвищує ймовірність відмов самої системи, ускладнює

інтегрування системи в загальну систему моніторингу обладнання розподільчих пристроїв. Велика кількість контрольованих параметрів досить ускладнює створення моделі визначення загального ТС високовольтного вимикача. Впровадження нових високовольтних елегазових вимикачів (ABB, SIEMENS, ALSTOM) на заміну старого парку вимикачів або на новозбудованих об'єктах електроенергетики відповідно до вимог інструкцій з експлуатації не потребують ретельного контролю механічної та комутаційної систем, тому не є доцільним впровадження дороговартісних та складних систем моніторингу стану обладнання.

2.3.2 Системи моніторингу апаратів для захисту від перенапруг

Підвищення напруги, яке впливає на ізоляцію електрообладнання понад найбільше робоче значення, має як зовнішнє походження (грозові розряди), так і внутрішнє (комутаційні або аварійні режими та пов'язані з ними перехідні процеси). Апарати, які забезпечують захист електрообладнання від всіх видів перенапруг, – це вентильні розрядники (ВР) та обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН). Вентильні розрядники призначені для захисту ізоляції від грозових та короткочасних комутаційних перенапруг. Обмежувачі перенапруг нелінійні призначені для захисту ізоляції електрообладнання напругою 6–750 кВ змінного струму промислової частоти 50 Гц від комутаційних та грозових перенапруг і мають досить стабільні захисні характеристики протягом усього строку служби [3 – 4].

Згідно з [104] кожного року перед початком грозового сезону потрібно перевіряти стан засобів захисту від перенапруг (ВРП і ліній електропередач) та забезпечувати готовність до захисту. На підприємствах мають реєструватися випадки грозових відключень та пошкодження ПЛ, обладнання РП. За отриманими даними має проводитись оцінювання надійності грозозахисту та, за необхідності, розроблятися заходи для її підвищення. Але ж необхідно оцінювати не тільки надійність виконання своїх функцій апаратом захисту від перенапруги, але й його технічний стан

та ймовірність пошкодження його внаслідок значного спрацьованого ресурсу. Пошкодження РВ та ОПН можуть призводити до відключення значної кількості відповідального обладнання внаслідок «жорсткого» приєднання (без комутаційних апаратів – вимикачів) в комірках силових трансформаторів та на збірні шини РП. Таким чином, РВ та ОПН внаслідок відмови можуть також стати причиною відмови силового або вимірювального трансформаторного обладнання, що мало низьке значення ступеня полімеризації целюлози паперової ізоляції.

Згідно з [3 – 4] експлуатаційний нагляд виконується таким чином – огляд черговим персоналом з обліком спрацьовання за даними реєстратора та, за наявності відповідного пристрою, контролю струмів витoku апарата (для пристроїв, що знаходяться під робочою напругою). Важливою складовою експлуатаційного нагляду є періодичні профілактичні випробування – вимірювання опору елементів захисних апаратів та струму провідності (для пристроїв, вимкнених з експлуатації). Стан РВ та ОПН ефективно контролюється засобами інфрачервоної техніки без вимкнення апаратів з експлуатації. Але ці методи не дають можливості для комплексного, інтегрованого оцінення ТС апаратів захисту від перенапруги, а здебільшого аналіз зводиться до інтуїтивного (експертного) оцінення технічного спеціаліста.

Контроль стану апаратів для захисту від перенапруг є досить важливим заходом для забезпечення обладнання РПВН від впливу комутаційних та грозових перенапруг, які можуть призвести до пошкодження ізоляції дорогого обладнання (силові трансформатори, трансформатори напруги). Діагностування стану обмежувачів перенапруги та розрядників за графіком технічного обслуговування є недостатнім, тому впровадження систем безперервного моніторингу стану апаратів – це актуальна задача з уникнення аварійних ситуацій та фінансових втрат. Підприємством ТОВ «DIMRUS» випускається система моніторингу ТС обмежувачів перенапруг «OPN-Monitor» [122], яка оцінює ТС комплексно за

вбудованими в систему алгоритмами. Як вихідна інформація використовуються технічні та експлуатаційні параметри, які відображають поточний стан обмежувача перенапруги:

- загальна кількість грозових та комутаційних перенапруг, які пройшли через обмежувач перенапруги;
- повний струм провідності ОПН за поточним значенням напруги та температури навколишнього середовища;
- співвідношення амплітуд 1, 3 і 5 гармонік повного струму витоку;
- співвідношення амплітуд 1 і 3 гармоніки активної складової струму провідності ОПН;

Система моніторингу «OPN-Monitor» контролює електричні та комутаційні параметри апарата, але для повноти інформації в цьому алгоритмі визначення ТС ОПН не враховується тепловий стан апарата. Також незрозумілою є можливість її адаптування для контролю стану розрядників. Аналогічним за своїм алгоритмом та засобами визначення ТС ОПН є система моніторингу фірми АВВ EXCOUNT-III [123] ТОВ «Енергоавтоматизація» [124]. Але тепловий стан апарата захисту від перенапруг для визначення його загального ТС також не враховується цими системами моніторингу.

2.3.3 Системи моніторингу роз'єднувачів

Будь-яка комірka РПВН в своєму складі має комутаційний апарат для відокремлення її від іншого обладнання на час ремонтних робіт. Пошкодження роз'єднувача може призвести до виникнення аварійної ситуації з пошкодженням обладнання як в самій комірці, так і поза її межами.

Організація безперервного моніторингу роз'єднувачів відбувається шляхом фіксації параметрів нормальних та аварійних режимів роботи:

- величини струму, який протікає через контактну систему;
- струмового перевантаження, з фіксацією дати та часу виникнення й тривалості;

- факту, дати та часу відключення–включення роз'єднувача;
- тривалості кожного циклу включення–відключення;
- факту, дати та часу виникнення відмінностей тривалості циклу;
- остаточного механічного ресурсу в будь-який заданий момент часу.

Існує багато розробок та досліджень методів діагностування ТС та прогнозування залишкового ресурсу роз'єднувачів [112 – 117], які здебільшого пропонують контролювати ТС за станом привода апарата. Інші методи стосуються контролю параметрів апарата у разі виведення роз'єднувача з роботи. Системи безперервного моніторингу впроваджуються фірмами-виготовлювачами роз'єднувачів, такими як ABB, AREVA, SIEMENS [125]. Велика кількість контрольованих параметрів ускладнює алгоритм визначення загального спрацьованого ресурсу (ТС) роз'єднувача та його реалізацію. Також не враховано температурну складову експлуатаційного режиму роз'єднувача.

Аналізуючи існуючі методи моніторингу основного відповідального обладнання РПВН можна зробити висновок щодо необхідності розвитку та впровадження нових програмно-апаратних комплексів контролю ТС і прогнозування ресурсу, які б відповідали таким вимогам:

- уніфікованість;
- інформативність;
- гнучкість математичного апарата моделювання визначення ТС;
- простота реалізації та технічного обслуговування;
- дотримання нормативної документації та вимог заводських інструкцій впроваджуваного обладнання.

2.3.4 Системи моніторингу трансформаторів струму

До відповідального обладнання РПВН відносяться трансформатори струму, тому прогнозування ресурсу трансформатора струму є актуальною задачею. Вимірювальний трансформатор знаходиться в електричних

комірках, що відокремлюються роз'єднувачами, пошкодження яких може призвести до пошкодження як самих трансформаторів струму, так і до більш тяжких наслідків.

Трансформатор струму є відповідальним елементом РПВН, від якого залежить надійність роботи релейного захисту, точність вимірювання та обліку електричної енергії. Контроль стану ізоляції трансформатора струму, як електричного апарата, що працює в складних умовах (електричні та температурні режими), потребує безперервного «on-line» діагностування для своєчасного виявлення дефектів, які можуть призвести до пошкодження обладнання. Нерівноважно-компенсаційний (балансовий) метод контролю є найбільш поширеним методом безперервного контролю під робочою напругою. Реалізації цього метода різні:

- пристрої КІВ-500Р з регульовальними трансформаторами ТПС-0,66;
- сучасні мікропроцесорні пристрої типу R1500 («DIMRUS» м. Перм);
- ZVCM Bushing Monitor (ZTZ ServiceInternationalInc, USA) [126].

ТОВ «DIMRUS» [127] впроваджує в експлуатацію систему моніторингу ТС елегазових трансформаторів струму за частковими розрядами ADS-3, яка складається з базового блока ADS-3 та трьох інтелектуальних датчиків ISPD-A з вбудованими акустичними датчиками, що монтуються на нижню основу елегазових трансформаторів струму трифазної системи. ТОВ «DIMRUS» випускає систему моніторингу стану ізоляції маслонаповнених трансформаторів струму СТ-Relay, в якій реалізовано два взаємодоповнювальних методи контролю стану ізоляції:

- вимірювання та аналіз струмів провідності ізоляції по фазах трансформаторів струму, контролюється відносна зміна тангенса кута діелектричних втрат та ємності ізоляції;
- аналіз інтенсивності та розподілення часткових розрядів – допоміжний метод, який доповнює метод контролю тангенса кута діелектричних втрат.

ТОВ «Енергоавтоматизація» [124] впроваджує в експлуатацію систему моніторингу стану ізоляції трансформаторів струму, в якій реалізовано контроль таких параметрів:

- тангенс кута діелектричних втрат основної ізоляції та його зміна;
- ємність основної ізоляції та її зміна;
- небаланс струму провідності ізоляції трифазної групи;
- характеристики часткових розрядів;
- густина елегазу (для елегазових);
- прогноз залишкового ресурсу.

Розглянуті системи моніторингу ТОВ «DIMRUS», ТОВ «Енергоавтоматизація» контролюють електричні показники та щільність газомісного середовища. Тепловий стан апарата, який обтікається повним фазним струмом, в моделі оцінення ТС трансформатора струму не враховується.

2.3.5 Аналіз досвіду експлуатації нерівноважно-компенсаційного (балансового) методу моніторингу основної ізоляції трансформаторів струму

Світові енергетичні компанії мають достатній досвід експлуатації пристроїв, робота яких основана на балансовому методі. Але досвід в багатьох випадках є негативним [94 – 97], неправильна інформація стосовно показників діагностичних параметрів не дає можливості зробити правильний висновок про ТС контрольованого апарата. Наприклад, в роботі [94] на практичному досвіді доведено, що застосування компенсації дисбалансу не є ефективним, а в деяких випадках шкодить. Також негативний досвід експлуатації внаслідок неправильної інформації стосовно значень діагностичних параметрів показано в [95, 96]. Але удосконалену модель, надану в [97], може бути використано для підвищення надійності цього діагностичного методу, адже вона є стійкою до асиметрії амплітуд та міжфазних кутів робочих напруг.

Балансовий метод оснований на двох припущеннях:

- трифазна система напруги симетрична;
- діагностичні параметри трьох апаратів трифазної групи не можуть одночасно зазнати змін рівною мірою.

Ці припущення є правильними для ідеальної трифазної системи – стан ізоляції апаратів однаковий (незмінний) та трифазна система напруг симетрична (амплітуди однакові, міжфазні кути 120°). В такій системі сумарний струм витоку буде дорівнювати нулю. Але в реальній системі у разі збільшення активних втрат або зміни ізоляційної здатності і фаза (рис. 2.2), і модуль струму (рис. 2.3) будуть змінюватись, це призведе до появи струму, відмінного від нуля – дисбалансу, який може бути вимірний діагностичним інструментом.

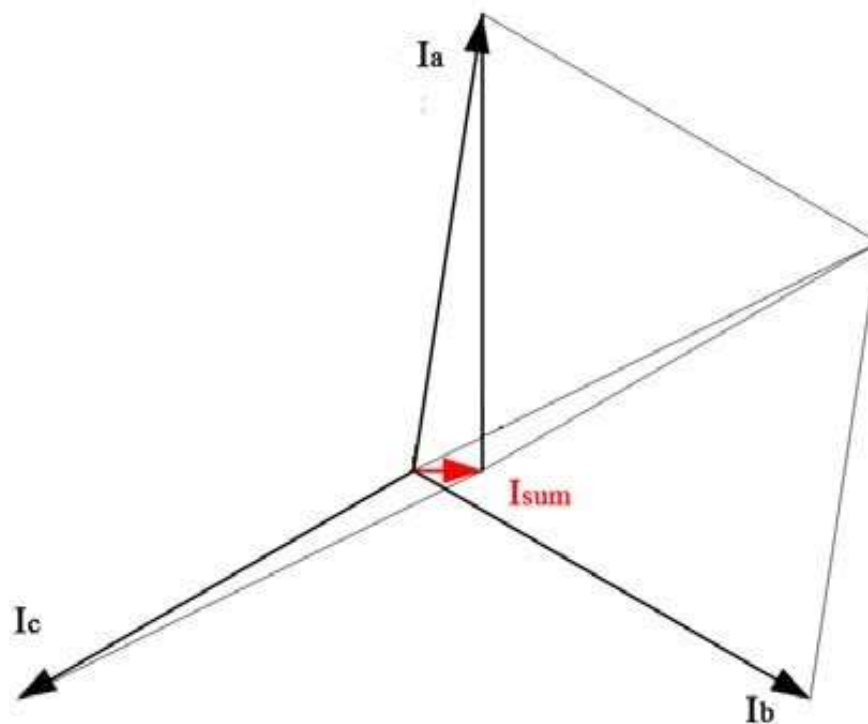


Рисунок 2.2 – Зміна фази струму витоку ізоляції апарата ф «А»

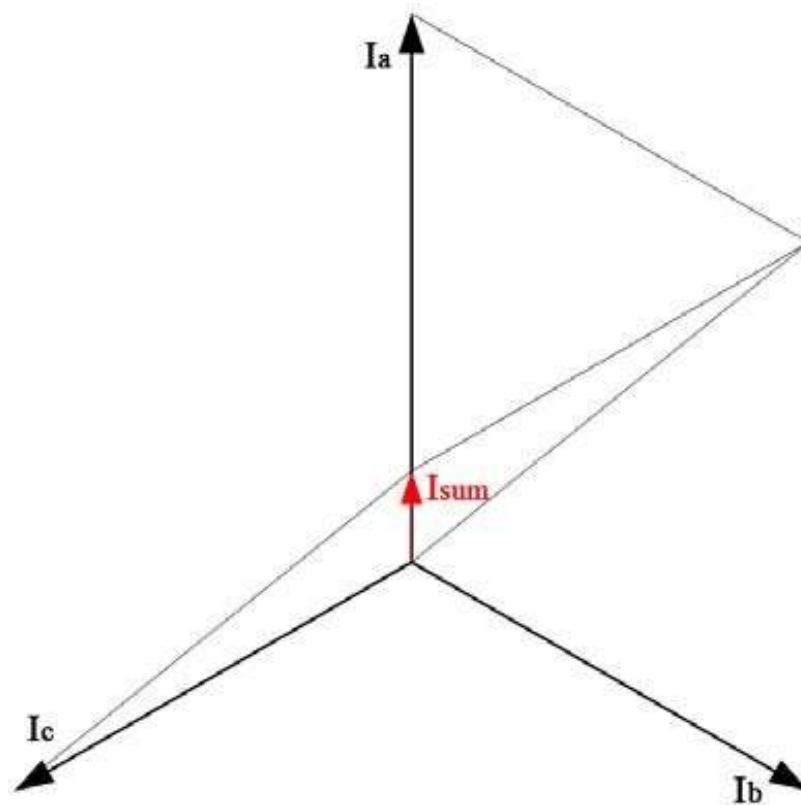


Рисунок 2.3 – Зміна модуля струму витoku ізоляції апарата ф «А»

Вектор струму витoku ізоляції, виміряний цим методом, залежить від векторів напруг, які прикладені до цієї ізоляції, активних втрат та ємності ізоляції. Відповідно, незбалансований вектор струму залежить від 9 параметрів

$$I_H = f(U_a, U_b, U_c, C_{1a}, C_{1b}, C_{1c}, tg\delta_{1a}, tg\delta_{1b}, tg\delta_{1c}), \quad (2.1)$$

де $U_{a,b,c}$ – фазна напруги;

$C_{1a,1b,1c}$ – ємність ізоляції апарата кожної фази, відповідно;

$tg\delta_{1a,1b,1c}$ – активні втрати ізоляції кожної фази, відповідно.

Таким чином, математичний розрахунок тангенса кута діелектричних втрат і ємності ізоляції цим методом погано обґрунтований та малоефективний.

Іншим негативним фактором балансового методу є те, що пристрої основані на цьому методі, не можуть виявити дефект навіть на небезпечній стадії розвитку. Налаштування аварійної уставки становить 5–7% від збільшення

номінального струму, але на практиці вона значно більша, що призводить до несвоєчасного виявлення аварійної ситуації. Тому в [97] запропоновано спосіб покращення балансового методу, суть якого в такому:

– до пристрою мають бути підключені сигнали від робочих напруг, а також струми витoku ізоляції;

– на момент введення в експлуатацію діагностичний пристрій має реєструвати та зберігати параметри (амплітуду та початкову фазу) фазних напруг і струмів витoku основної ізоляції. Поточне значення вектора небалансу розраховується за формулою

$$I_H = \frac{|\vec{U}_{ae}|}{U_{ae}} \cdot \left[\frac{\vec{I}_a \cdot \vec{U}_{ae}}{U_a} + \frac{\vec{I}_b \cdot \vec{U}_{be}}{U_b} + \frac{\vec{I}_c \cdot \vec{U}_{ce}}{U_c} - (\vec{I}_{ae} + \vec{I}_{be} + \vec{I}_{ce}) \right], \quad (2.2)$$

де \vec{U}_{ae} , \vec{U}_{be} , \vec{U}_{ce} – початкові (під час введення в експлуатацію) значення векторів фазних напруг (відповідно ф. «А», «В», «С»);

\vec{I}_{ae} , \vec{I}_{be} , \vec{I}_{ce} – початкові (під час введення в експлуатацію) значення векторів струмів витoku основної ізоляції (відповідно ф. «А», «В», «С»);

\vec{U}_a , \vec{U}_b , \vec{U}_c – вимірні значення векторів фазних напруг (відповідно ф. «А», «В», «С»);

\vec{I}_a , \vec{I}_b , \vec{I}_c – вимірні значення векторів струмів витoku основної ізоляції (відповідно ф. «А», «В», «С»).

Під «початковим» розуміється перший вимір вимірювальним пристроєм, під час якого виконується калібрування системи вимірювання для виключення сторонніх впливів. За наявності опорної напруги отримані таким методом значення фази і амплітуди вектора небалансу не будуть залежати від режимів роботи мережі.

2.4 Визначення чинників впливу на технічний стан відповідального обладнання розподільчого пристрою високої напруги

Згідно з означенням розподільчого пристрою [63] можна виділити певну номенклатуру обладнання, контроль ТС якого може забезпечити

прогнозованість функціонування РПВН, планування технічного обслуговування та розподілення матеріальних і фінансових активів підприємств ОЕС України.

Виходячи з означення розподільчого пристрою, до цієї номенклатури відносяться:

- комутаційні апарати (високовольтні вимикачі, роз'єднувачі);
- вимірювальні апарати (трансформатори струму, трансформатори напруги);
- апарати захисту від перенапруг (розрядники вентильні, обмежувачі перенапруг нелінійні);
- опорна ізоляція.

Впровадження системи безперервного контролю ТС основного відповідального обладнання розподільчого пристрою є визначення параметрів, контроль яких буде досить інформативно відображати поточний стан контрольованого об'єкта [128]. З метою визначення цих параметрів побудуємо причино-наслідкову діаграму Ісікави (рис. 2.4). Сформулюємо проблему як «Ймовірність порушення роботи РПВН». Основними чинниками впливу на роботу РПВН є:

- людський (кваліфікація, психологічний стан тощо);
- погодний (опади, вітер, блискавка);
- експлуатаційний (деградація ізоляції, зміна структури та хімічного складу електротехнічних матеріалів, знос вузлів апаратів, зміна теплового стану, концентрація середовища).

Людський і погодний чинники мають непередбачуваний, неконтрольований характер, впливу яких можна запобігти опосередковано, тому в системі «on-line» діагностики контролюються параметри, які мають прямий вплив на експлуатаційний чинник. Також контроль цих параметрів має мати можливість технічної реалізації на об'єкті, уніфікованість за переліком контрольованих параметрів та програмно-апаратної реалізації, економічне обґрунтування впровадження системи моніторингу.

Розглядаються параметри, які впливають на ТС обладнання, мають функції захисту та ліквідації аварійних режимів в енергосистемі; контроль стану опорної ізоляції виконується в роботі зовнішнім оглядом та засобами інфрачервоної техніки, тому безперервний контроль стану такого типу обладнання не є доцільним.

Згідно з [129] кожен апарат розподільчої установки можна розглядати як об'єкт, який має n елементів з вхідними ознаками та один вихід

$$T \cdot dz / dt = f(z, V(t, \varepsilon), P(t)), \quad (2.3)$$

де $z=(z_1 \dots z_n)^T$ – вектор змінних стану (фазові координати), які визначаються на основі електричних, механічних, хімічних законів, характерних для кожного елемента об'єкта;

$P(t)$ – вектор параметрів елементів об'єкта, який змінюється з часом внаслідок старіння, зносу, конструктивних особливостей об'єкта;

T – вектор сталих часу елементів об'єкта;

$V(t, \varepsilon)$ – зовнішні збурення;

ε – випадок, обумовлений режимом експлуатації, впливом метеоумов та персоналу.

Аналізуючи нормативну документацію з контролю ТС електрообладнання та вимоги заводських інструкцій, можна визначити основні параметри:

- ізоляція електрообладнання (струм витоку, ємність ізоляції, діелектричні втрати);
- тепловий стан апаратів та контактних з'єднань;
- тиск газозмісного середовища;
- кількість спрацювань (механічних або комутаційних).

Причинно-наслідкову діаграму Ісікави зображено на рис. 2.4.

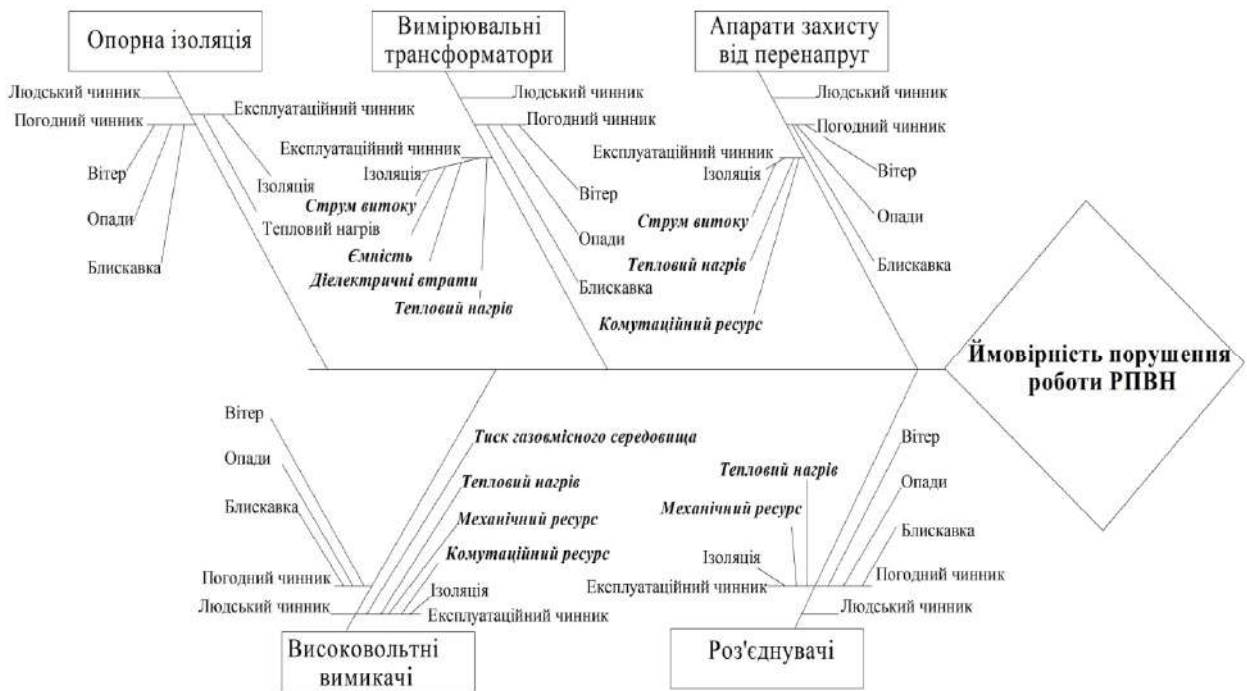


Рисунок 2.4 – Причинно-наслідкова діаграма Ісікави

Аналізуючи діаграму Ісікави, можна визначити основні параметри для уніфікації апаратно-програмного комплексу контролю ТС обладнання РПВН:

- струм витоку, який характеризує стан ізоляції та за яким можна визначити діелектричні втрати і ємність ізоляції;
- тепловий нагрів, який характеризує стан ізоляції та контактної системи і з'єднань;
- комутаційний ресурс, реєстрація кількості виконаних комутацій апарата впродовж його функціонування;
- механічний ресурс, реєстрація кількості виконаних механічних операцій включення–відключення апарата впродовж його функціонування;
- тиск газозвмісного середовища, реєстрація допустимого тиску газозвмісного середовища, за якого можливим є виконання апаратом своїх функцій.

ТС узагальненої одиниці обладнання можна описати такою функцією

$$TS = f(I_{sol}, T_{st}, P_{gas}, N_{op}), \quad (2.4)$$

де TS – технічний стан узагальненої одиниці обладнання;

I_{sol} – стан ізоляції електрообладнання;

T_{st} – тепловий стан електрообладнання та контактних з'єднань;

P_{gas} – тиск газівмісного середовища;

N_{op} – кількість спрацювань.

Можна побачити з (2.4), що параметри, які впливають на ТС електрообладнання, мають різну природу походження. Використання стандартних фізико-математичних моделей – задача досить складна. За таких обставин доцільним є використання апарата нечіткої логіки, що базується на понятті нечіткої множини з функцією належності до неї, яка набуває будь-яких значень в інтервалі $[0;1]$.

Нечітка модель [129] має таку структуру

$$S = F(\phi(P), R, M, D, A), \quad (2.5)$$

де $\phi(P)$ – функції належності (ФН) вхідних і вихідних змінних;

R – база нечітких правил «ЯКЩО – ТО»;

M – механізм нечіткого виведення Мамдані, який реалізує логічні операції правил «ЯКЩО – ТО» для відображення вхідних нечітких змінних в вихідну;

D – метод дефазифікації;

A – вхідна лінгвістична змінна;

S – кількісне значення ТС досліджуваного об'єкта.

Узагальнену нечітку модель для визначення ТС електрообладнання РПВН зображено на рис. 2.5.

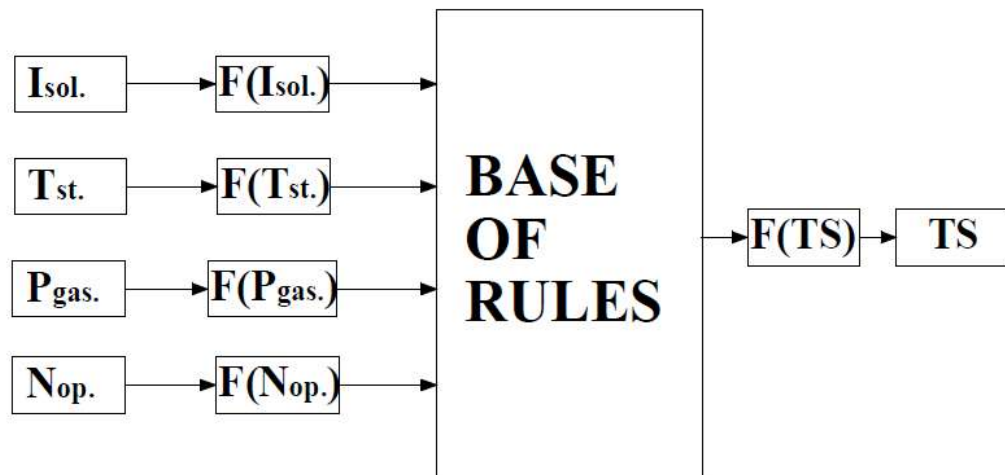


Рисунок 2.5 – Узагальнена нечітка модель для визначення ТС електрообладнання РПВН

Isol. – ізоляційні параметри; Tst. – тепловий стан; Pgas. – тиск газовмісного середовища; Norp. – кількість спрацювань; F (Isol.) – лінгвістична змінна «Значення ізоляційних параметрів»; F (Tst.) – лінгвістична змінна «Тепловий стан»; F (Pgas.) – лінгвістична змінна «Тиск газовмісного середовища»; F (Norp.) – лінгвістична змінна «Кількість спрацювань»; F(TS) – вихідна лінгвістична змінна «Загальний спрацьований ресурс»; TS – кількісне значення загального спрацьованого ресурсу.

2.5 Висновки до розділу 2

1. В розділі визначено номенклатуру відповідального обладнання РПВН, від якого залежить виконання своїх функцій, за означенням, розподільчою установкою. До такого обладнання належать: високовольтні (елегазові) вимикачі, трансформатори струму, апарати захисту від перенапруг, роз'єднувачі.

2. Зроблено висновок щодо виключення або скорочення деяких видів профілактичних випробувань, у разі впровадження СБК (Smart Grid), який ґрунтується на вимогах нормативної та експлуатаційної документації.

3. Проаналізовано ефективність існуючих нині систем моніторингу основного відповідального обладнання РПВН. На основі дослідження зроблено висновок щодо основних недоліків існуючих СБК. До таких недоліків можна віднести:

- складність та високу собівартість технічної реалізації;
- складність параметризації математичних моделей (багато вхідних параметрів);
- неврахування в СБК важливих чинників впливу на ТС обладнання.

4. Визначено уніфіковані чинники впливу на ТС відповідального обладнання, які можна контролювати СБК. Чинники обумовлено вимогами нормативної та експлуатаційної документації. Визначено математичний метод, що може інтегрувати різні за природою походження чинники впливу, це метод нечіткого моделювання.

5. Побудовано узагальнену (уніфіковану) нечітку математичну модель визначення ТС основного відповідального обладнання РПВН. Внаслідок різної природи походження певних чинників використання цього методу передбачає найбільш об'єктивне оцінення ТС електрообладнання.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ РПВН

3.1 Постановка задачі

Наявність нечіткої та неточної інформації, яка не може бути інтерпретована в ймовірнісних термінах, призводить до того, що традиційні кількісні методи, які використовуються в теорії автоматизації процесів, є недостатньо адекватними. Виходячи з цього, з'являються труднощі в формуванні алгоритмів керування. Один із способів подолання цієї проблеми полягає у впровадженні нечіткого поняття знань, проведенні операцій з використанням нечітких логічних правил та в отриманні на їхній основі нечітких логічних висновків, на базі яких формуються керівні процеси.

Однією з передумов виникнення ідеї нечіткого керування, Заде, засновник теорії нечіткої логіки, висуває принцип несумісності, котрий полягає в тому, що зі збільшенням розмірів та складності системи суттєво ускладнюється її моделювання за допомогою наявних математичних прийомів. У разі використання формул значно збільшується кількість змінних та параметрів, ускладнюється вимірювання окремих величин, внаслідок чого створення достатньо адекватної моделі стає практично неможливим.

Л. Заде замість математичних прийомів запропонував лінгвістичну модель, яка використовує слова – лінгвістичні змінні, що відображають якість, стверджуючи, що нечіткість – скоріше перевага, ніж недолік моделювання. Нечітка логіка вдало дозволяє уявити мислення людини, тобто засоби прийняття рішень та засоби моделювання складних систем. Більш того, нечітка логіка придатна для умоглядного подання накопичених знань.

Аналізуючи фактори, які впливають на ТС всієї номенклатури основного відповідального обладнання РПВН, можна зробити висновок про

різну природу походження цих факторів. Також ускладнює процес визначення поточного ТС наявність таких умов [129]:

- відсутність адекватного математичного опису динамічних процесів, що відбуваються в об'єкті, які дають повну характеристику роботоздатності об'єкта;
- вимірювання ознак з деякою мірою достовірності;
- обмежена кількість доступних вимірюванню і спостереженню ознак;
- складність виявлення аналітичних залежностей взаємовпливу ознак в процесі оцінення ТС об'єкта;
- недостатність ретроспективних даних про експлуатацію такого типу обладнання.

Виходячи з цих умов, доцільним є використання нечіткого моделювання для оцінення ТС об'єкта, яке може об'єднати різнорідні за своїм походженням фактори впливу. Побудову нечіткої моделі доцільно проводити на основі експертного досвіду та знань нормативної документації, вимог до функціонування та будови такого типу обладнання. Нечітка логіка зручно дозволяє уявити алгоритми мислення людини, тобто засоби прийняття рішень людиною в моделюванні складних систем.

Метод експертних оцінок поєднує в собі процес інтуїтивно-логічного аналізу проблеми з якісними та кількісними методами обробки, як для подання результатів вирішення, так і для керування самим процесом аналізування. Застосування методу експертних оцінок для вирішення поставленої задачі базується на теорії, яка стверджує, що експерт є сховищем великої кількості добре обробленої інформації, тому він вважається якісним джерелом інформації. Послідовність та склад вирішення задачі методом експертних оцінок:

- постановка задачі;
- обґрунтування переліку параметрів задачі;
- відбір та підготовка експертів;
- обробка експертних результатів.

Тому для визначення ТС основного відповідального обладнання РПВН використовуємо метод нечіткого моделювання. Нечітка модель для визначення ТС будується на базі експертних знань та досвіду.

3.2 Алгоритм нечіткого моделювання

У загальному випадку під поняттям нечіткої моделі розуміється інформаційно-логічна модель системи, побудована на основі теорій нечітких множин та нечіткої логіки. Тому для розуміння процесу потрібно дати більш широке означення деяких понять, які стосуються цього процесу.

Нечітка множина

Нечітка множина є базовим поняттям в нечіткій логіці, яка описує лінгвістичну змінну, тобто вхідний діагностичний параметр. Нечіткою множиною [130 – 132] на універсальній множині $U_i = [\underline{u}_i, \overline{u}_i], i = \overline{1, k}$ називають сукупність пар або кортежів

$$A = \{ \langle u, \mu_A(u) \rangle \}, \quad (3.1)$$

де u – елемент деякої універсальної множини U ;

$\mu_A(u)$ – ступінь належності елемента $u \in U$ нечіткій множині A .

Терм-множиною називається множина всіх можливих значень лінгвістичної змінної. Термом називається будь-який елемент терм-множини. Терм задається за допомогою функції належності. Функцією належності (ФН) називають характеристичну функцію, яка дозволяє для довільного елемента універсальної множини вирахувати ступінь належності нечіткій кінцевій множині $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$. Ступінь належності – це число з інтервалу $[0, 1]$. В процесі побудови нечіткої моделі налаштування ФН є одним з найважливіших етапів.

В процесі описування діагностичного чинника нечіткі множини визначено в відповідних межах згідно з нормативною документацією, тому припустимою є лінійна апроксимація ФН. Для налаштування ФН на визначення ТС електрообладнання, доцільно використовувати ФН трикутної

або трапецієподібної форми. Загалом, функції належності мають такий вигляд [130, 131], як зображено на рис. 3.1.

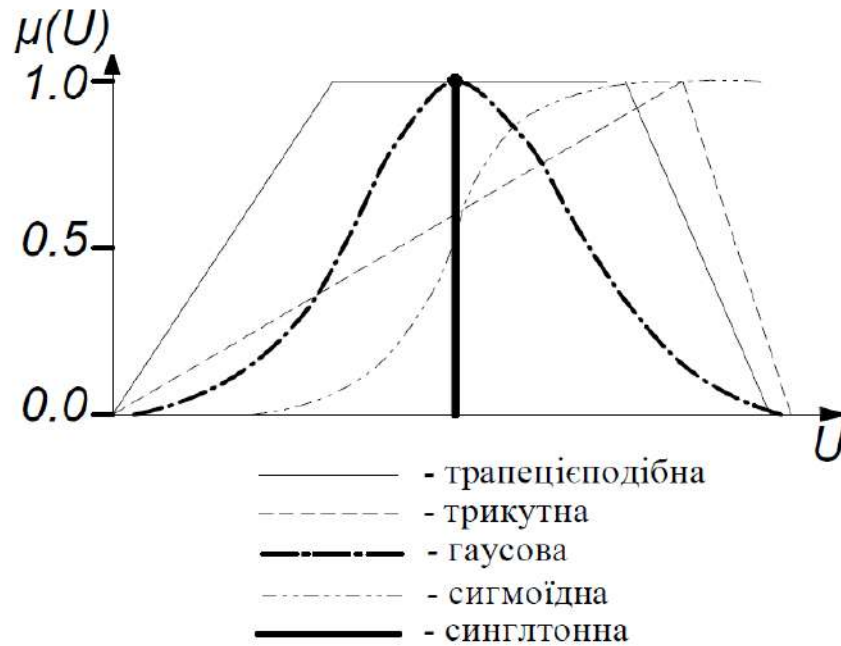


Рисунок 3.1 – Графічне зображення функцій належності

Основні види ФН:

– трикутна

$$\mu(u) = \begin{cases} 0, & u \leq a \text{ або } u \geq c; \\ \frac{u-a}{b-a}, & a < u \leq b; \\ \frac{c-u}{c-b}, & b < u < c, \end{cases} \quad (3.3)$$

де (a, c) – носій нечіткої множини,

b – координата максимуму;

– трапецієподібна

$$\mu(u) = \begin{cases} 0, & u \leq a \text{ або } u \geq d; \\ \frac{u-a}{b-a}, & a \leq u \leq b; \\ 1, & b \leq u \leq c; \\ \frac{d-u}{d-c}, & c \leq u \leq d, \end{cases} \quad (3.4)$$

де (a, d) – носій нечіткої множини,

(b, c) – ядро нечіткої множини;

– гаусова

$$\mu(u) = \exp\left(-\frac{(u-b)^2}{2c^2}\right), \quad (3.5)$$

де b – координата максимуму,

c – коефіцієнт концентрації;

– сигмоїдна

$$\mu(u) = \frac{1}{1 + \exp(-a(u-c))}, \quad (3.6)$$

де a – коефіцієнт крутизни,

c – координата переходу через 0,5;

– синглтонна

$$\mu(u) = \begin{cases} 1, & u = a; \\ 0, & u \neq a, \end{cases} \quad (3.7)$$

де a – чітке число, яке надається у вигляді нечіткої множини.

Нечіткий логічний висновок

Важливим ключовим поняттям нечіткої логіки є лінгвістична змінна, яка відображає суб'єктивну оцінку людиною числової змінної «природною мовою». Лінгвістичною змінною називається змінна, значеннями якої можуть бути слова або словосполучення деякої природної мови.

Лінгвістична змінна формально описується такою п'ятіркою параметрів [130]

$$\langle \beta, T, U, G, M \rangle, \quad (3.8)$$

де β – ім'я лінгвістичної змінної;

T – базова терм-множина лінгвістичної змінної або множина її значень (термів), кожне з яких є найменуванням окремої нечіткої змінної;

U – універсальна множина визначення нечітких змінних;

G – синтаксичні правила, які породжують назви термів;

M – семантичні правила, які задають ФН нечітких термів.

Як правило, лінгвістична змінна описується декількома нечіткими множинами, тому для збереження прозорості в процесі побудови декількох ФН використовують правило Руспіні [133]

$$\forall U_i \in [\underline{u}_i, \overline{u}_i]: \sum_{v=1, V_i} \mu_{iv}(u_i) = 1. \quad (3.2)$$

де V_i – потужність терм-множини змінної x_i , $i = \overline{1, n}$.

Під час моделювання багатовимірних залежностей «вхід–вихід» доцільно використовувати ієрархічні системи нечіткого виведення, найпростішим випадком якої є однорівнева система з декількома входами (не більш п'яти) [132] і одним виходом. Визначимо поняття і позначення вхідних та вихідних лінгвістичних змінних, які використаємо в процесі побудови нечітких моделей під час визначення ТС відповідального обладнання РПВН:

– визначаються нечіткі терм-множини значень вхідних лінгвістичних змінних $A = \{A_1, A_2, \dots, A_i\} i = \overline{1, k}$ і нечіткі терм-множини значень вихідної лінгвістичної змінної $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$;

– лінгвістичні змінні A визначаються на універсальних множинах $U_i = [\underline{u}_i, \overline{u}_i], i = \overline{1, k}$. вхідних змінних;

– лінгвістичні змінні S визначаються на універсальних множинах $Y_i = [\underline{y}_i, \overline{y}_i]$ вихідних змінних.

Нечіткий логічний висновок – це апроксимація залежності «вхід–вихід» на основі лінгвістичних висловлювань {ЯКЩО-ТО} та логічних операцій над нечіткими множинами. Нечіткою базою знань називається сукупність нечітких правил {ЯКЩО-ТО}, яка задає взаємозв'язок між входами та виходами досліджуваного об'єкта. Формат нечітких правил має такий вигляд: ЯКЩО «посилання правила», ТО «висновок правила».

Після фазифікації та побудови бази правил виконується нечітке логічне виведення Мамдані [132], яке порівняно з іншими алгоритмами

(Сугено, Ларсена), найкраще підходить за наявності бази правил, складеної з якісно виражених продукційних правил за такою базою знань

$$(A_1 = T_{1j}, A_2 = T_{2j}, \theta_j \dots \theta_j, A_n = T_{nj} \text{ з вагою } W_j) \Rightarrow S_j, j = 1, \bar{m}, \quad (3.9)$$

де A – лінгвістична змінна в j -му правилі;

T – нечіткий терм, яким оцінюється лінгвістична змінна;

θ_j – логічна операція, яка пов'язує фрагменти антецедента j -го правила («І», «АБО»);

S_j – висновок j -го правила;

m – кількість правил в базі знань;

\Rightarrow – нечітка імплікація;

W_j – ваговий коефіцієнт j -го правила ($W_j = 1$ – у випадку високого рівня інтерпретабельності).

В результаті логічного виведення за j -м правилом отримаємо значення вихідної лінгвістичної змінної

$$S_j = \text{imp}(S_j, \mu_j(u)), j = 1, \bar{m}, \quad (3.10)$$

де imp – імплікація, яка реалізується операцією «мінімуму», тобто «зрізання» ФН $\mu_{S_j}(y)$ нечітких термів вихідної лінгвістичної змінної по рівню $\mu_j(u)$;

$\mu_j(u)$ – функція належності нечіткого терма T_j вхідної лінгвістичної змінної.

Результат логічного виведення по всій базі знань знаходять агрегуванням нечітких множин

$$\bar{S} = \text{agg}(s_1, s_2, \dots, s_j), \quad (3.11)$$

де agg – агрегування, яке реалізується операцією «максимуму».

Логічне виведення виконується на стандартній шкалі Харрінгтона [134].

Чітке значення виходу S_0 , яке відповідає вхідному вектору U_i , визначається методом дефазифікації нечіткої множини \bar{S} . Зазвичай дефазифікація виконується методом центра ваги або центра площ [132]

$$S_0 = \frac{\sum_{j=1}^m \mu_j(s) \cdot s_j}{\sum_{j=1}^m \mu_j(s)}. \quad (3.12)$$

Розглянутий вище алгоритм нечіткого моделювання дозволяє числові показники інтерпретувати лінгвістичними означеннями з подальшою математичною обробкою і отриманням на виході числового значення. Тому можна зробити висновок про доцільність застосування методу нечіткої логіки в процесі визначення ТС електрообладнання в умовах різномірної вхідної інформації.

3.3 Евристичний метод визначення ТС відповідального обладнання РПВН

В умовах неповноти та невизначеності інформації доцільно використовувати евристичний метод, який ґрунтується на базі експертних знань і досвіду щодо поведінки вхідних діагностичних чинників. Налаштування ФН є одним з найважливіших питань теорії нечітких множин. В процесі налаштування використовуються стандартні вербально-числові шкали, масиви ретроспективної інформації, експертні системи [134 – 136].

ФН будуються такими методами:

- за статистичними даними про функціонування досліджуваного об'єкта;
- використання стандартних інтервалів на шкалі бажаності Харрінгтона [134];
- обробка думок експертів, який базується на парних порівняннях (метод Сааті) [135, 136].

Найкраще для налаштування ФН підходить метод експертного опитування, з обробкою отриманої інформації та із визначенням важливості критеріїв експертного оцінення. Важливість критеріїв визначається методом побудови матриць парного порівняння Сааті [137]. Парні порівняння здійснюються за дев'ятибальною шкалою відношень, наведеною в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Шкала попарних порівнянь (шкала відношень) Сааті

Ступінь важливості	Означення
1	Однакова значущість
3	Деяка перевага значущості однієї думки над іншою
5	Істотна або сильна значущість
7	Дуже сильна або очевидна значущість
9	Абсолютна значущість
2, 4, 6, 8	Проміжні значення

Наведений метод має перевагу над іншими методами (Уея, Коггера) в достатності мінімальної кількості експертної інформації, зручній для сприйняття експертами шкалі парних порівнянь та високому ступені узгодженості оцінок експертів різної кваліфікації. Також, вибір обумовлений такими факторами:

- відсутність точних та достовірних ретроспективних даних щодо функціонування такого типу обладнання;
- суб'єктивність думки одного експерта.

Побудова ФН методом парного порівняння передбачає, що спочатку кожен експерт дає бінарну оцінку про наявність властивостей нечіткої множини (про її наявність чи відсутність) в елемента $b_{i,j}$, який оцінюється [130]. Тобто $b_{i,j} \in \{0;1\}$, де 1 вказує на наявність властивості, 0 – відсутність властивості. Інтервал, на якому досліджуються ці властивості, визначається нормативною документацією з розмірністю, переведеною у відносні одиниці. Дані опитування експертів заносяться до таблиці (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Результати опитування експертів

	Елемент (терм)	0,0 (min)	...	1,0 (max)
Експерт 1	u_1	1	1	0
	u_i	0	0	1
.....
Експерт 9	u_1	1	0	0
	u_i	0	1	1

У разі оцінювання за дев'ятибальною шкалою достатньо залучити дев'ять експертів, експертна думка яких може бути посилена експертним добором за такими показниками як рівень освіти, стаж роботи та освіченість у відповідній галузі та ін. Наприклад: m експертів зазначили наявність властивостей нечіткої множини у елемента u_i , визначеного на універсальній вхідній множині U_k ; n експертів зазначили відсутність властивостей нечіткої множини у елемента u_i , тоді перевага думки однієї частини експертної групи на іншою частиною визначається як $|m - n|$, за $m+n=9$.

Мінімальна кількість експертів та можлива помилка результатів експертизи взаємопов'язані формулою [138]:

$$N_{\min} = 0,5 \cdot \left(\frac{3}{d} + 5 \right), \quad (3.13)$$

де N_{\min} – кількість експертів;

d – можлива похибка результатів експертизи ($0 < d < 1$).

Метод добору експертів не відіграє визначальної ролі, тобто методика в будь-якому підрозділі електроенергетичного підприємства може бути своя. Незалежно від методики добору експертів рівень кваліфікації, досвід роботи, професійні навички будуть різними. Експертна група може бути затверджена наказом по підприємству чи мати колегіальний характер. Згідно з (3.13) знайдемо можливу помилку за кількості експертів $N_{\min}=9$. Помилка $d=0,23$ є суттєвою, але метод обробки експертної інформації не залежить від досвіду роботи, кваліфікації, суб'єктивності та упередженості експертів, що значно мінімізує цю помилку.

Оцінення вагових коефіцієнтів важливості критеріїв (експертних думок), здійснюється побудовою матриці парних порівнянь Сааті [135 – 137]. Матриця парних порівнянь є діагональною ($a_{ij}=1, i=1,n$) і обернено симетричною ($a_{ij}=1/a_{ji}, i,j=1,n$). Ступені належності елементів u_i нечітким множинам такими, що дорівнюють відповідним координатам власного вектора $W=(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ матриці парних порівнянь Λ

$$\mu_A(u_i) = w_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3.14)$$

де $\mu_A(u_i)$ – ФН елемента u_i нечіткій множині A ;

w_i – координата власного вектора.

Власний вектор знаходиться з такої системи рівнянь

$$\begin{cases} \Lambda W = \lambda_{\max} W; \\ w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1, \end{cases} \quad (3.15)$$

де λ_{\max} – максимальне власне значення матриці Λ .

Шкала бажаності Харрінгтона може застосовуватись для визначення вихідної лінгвістичної змінної. Інтервали на шкалі отримано на основі статистичного аналізу великого масиву даних та універсально застосовуються для визначення меж термів нечітких змінних (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Шкала інтервалів бажаності Харрінгтона

№	Бажаність	Числове значення
1	Дуже низька (ДН)	0,0–0,2
2	Низька (Н)	0,2–0,36
3	Середня (С)	0,36–0,64
4	Висока (В)	0,64–0,8
5	Дуже висока (ДВ)	0,8–1,0

Визначимо координати максимумів ФН на інтервалах бажаності Харрінгтона (рис. 3.2).

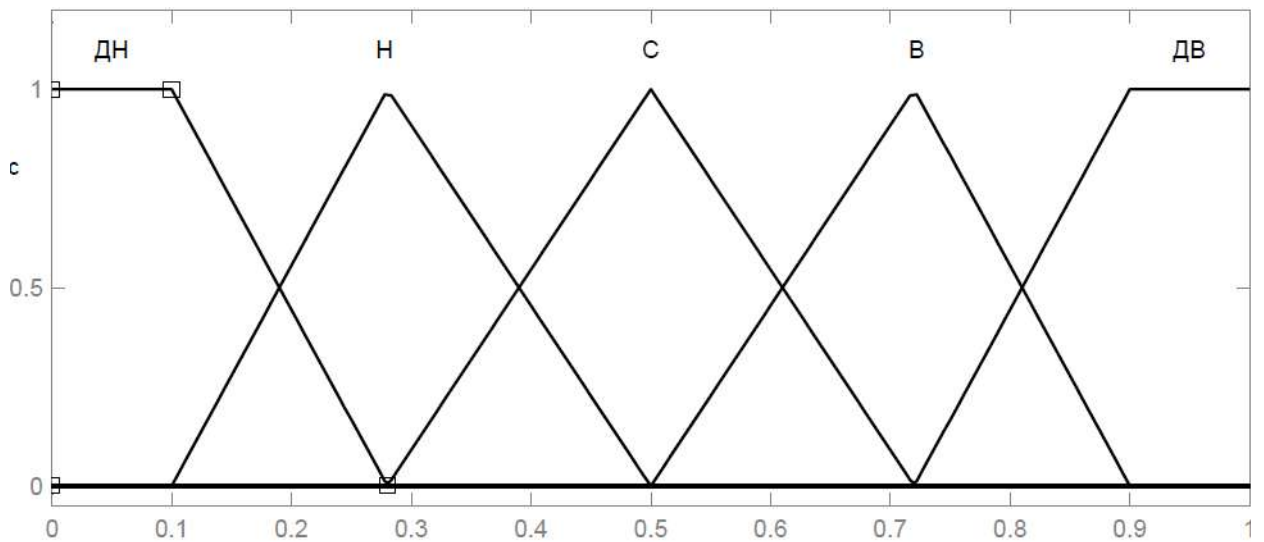


Рисунок 3.2 – Графічне зображення ФН, визначених на інтервалах бажаності Харрінгтона

Точки максимумів ФН вихідної лінгвістичної змінної визначаються за формулами:

$$- \text{«Дуже низька» } y_1 = \frac{0 + 0,2}{2} = 0,1; \quad (3.16)$$

$$- \text{«Низька» } y_2 = \frac{0,2 + 0,36}{2} = 0,28; \quad (3.17)$$

$$- \text{«Середня» } y_3 = \frac{0,36 + 0,64}{2} = 0,5; \quad (3.18)$$

$$- \text{«Висока» } y_4 = \frac{0,64 + 0,8}{2} = 0,72; \quad (3.19)$$

$$- \text{«Дуже висока» } y_5 = \frac{0,8 + 1,0}{2} = 0,9. \quad (3.20)$$

Евристичний метод найкраще підходить для налаштування ФН вхідних лінгвістичних змінних, які характеризують чинники впливу на ТС відповідального обладнання, а шкалу бажаності Харрінгтона для налаштування ФН вихідної лінгвістичної змінної.

3.4 Висновки до розділу 3

Основні наукові результати, отримані в цьому розділі:

1. Обґрунтовано можливість застосування методу нечіткого моделювання як єдиного методу, який адекватно описує зв'язок ТС електрообладнання РПВН з діагностичними параметрами, різними за своєю природою.

2. Доказано спроможність теорії нечітких множин та нечіткого логічного виведення, завдяки своїй гнучкості, вирішувати складні математичні задачі параметризації вхідних параметрів, що характеризують ТС обладнання. Сформовано теоретичну базу для вирішення задач за допомогою нечіткої логіки.

3. Запропоновано застосування евристичного (експертного) методу в умовах неповноти, викривлення або відсутності інформації щодо функціонування певного типу обладнання. Визначено мінімальну кількість експертів ($N_{\min}=9$), обґрунтовану вибором методу оцінювання експертної інформації.

4. Обґрунтовано використання методу експертних оцінок для налаштування параметрів ФН лінгвістичних змінних. Обробка експертних оцінок важливості критеріїв виконується методом парних порівнянь Сааті з визначенням найбільшого власного числа. Відносна важливість критеріїв оцінюється за 9-бальною шкалою.

РОЗДІЛ 4

НЕЧІТКІ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ТС ОСНОВНОГО ВІДПОВІДАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ РПВН

4.1 Нечітка модель оцінення технічного стану засобів захисту від перенапруг експертним методом

Для оцінення ризику порушення роботи РПВН необхідно оцінити ризик відмови важливого елемента розподільчої установки апарата захисту від перенапруг. В разі відмови апарата можливим є пошкодження основної ізоляції трансформаторів струму, трансформаторів напруги, перекриття опорної ізоляції РПВН, а також пошкодження силового маслонаповненого обладнання. Імовірність відмови ОПН та РВ значною мірою залежить від їхнього ТС, визначення якого відбувається в умовах неповноти або викривлення інформації.

Всі основні експлуатаційні фактори за своєю фізичною природою поділяються на такі:

- електричні;
- теплові;
- механічні;
- хімічні.

Контроль стану апаратів захисту (РВ та ОПН), який змінюється під дією цих факторів, здійснюється таким чином: механічні та хімічні контролюються експлуатаційним наглядом (наявність тріщин та сколів, корозії, забруднень, також зняття показів реєстраторів спрацювання тощо), електричні та теплові контролюються періодичними випробуваннями (контроль електричних параметрів), контролем теплового стану засобами інфрачервоної техніки. Основними показниками, за якими оцінюється ТС апаратів, відповідно до нормативної документації [4, 5, 104] є контроль струму витоку, теплового стану апарата, контроль кількості спрацювань (комутацій). Методи, запропоновані в [108 – 110], ґрунтуються на контролі

струму витоку (зокрема 3-ї гармоніки) та кількості комутацій. Системи моніторингу проаналізовано в [122 – 124] аналогічно контролюють струм витоку та комутаційні параметри. В сучасних РПВН знаходять широке застосування стаціонарні пристрої інфрачервоного діагностування для контролю теплового стану електрообладнання. Тому, для більшої інформативності щодо ТС апарата для захисту від перенапруг, пропонується контролювати СБК тепловий стан апарата. Для оцінення ТС апарата для захисту від перенапруг за цих умов розроблено нечітку модель для інтегрування її в СБК.

Вибір параметрів обумовлено нормативною [3 – 5, 104], заводською документацією [139], а також можливістю технічної реалізації в СБК. Контроль цих параметрів дозволить скоротити обсяг періодичних випробувань РВ (табл. 2.3: п. 21.1.1, п. 21.1.2, п. 21.1.6) і ОПН (табл. 2.4: п. 21.2.2 – п. 21.2.4), для яких необхідно виводити обладнання з роботи. Виділяються основні контрольовані експлуатаційні параметри, за якими буде побудовано нечітка модель визначення загального спрацьованого ресурсу апарата захисту від перенапруг:

- кількість спрацювань апаратів захисту;
- вимірювання струму провідності;
- контроль теплового стану елементів за допомогою інфрачервоної техніки.

Для використання обраних параметрів, у разі вирішення задачі оцінення стану апарата захисту від перенапруг, для визначення загального спрацьованого ресурсу за нечіткою моделлю вибрано такі входні лінгвістичні змінні:

- A_1 = «Кількість спрацювань апарата»;
- A_2 = «Значення струму провідності апарата»;
- A_3 = «Надлишкова температурна різниця».

Для кожної лінгвістичної змінної введено такі нечіткі терми:

- $A_1 : H_1$ = «Нормальна», D_1 = «Допустима», B_1 = «Висока»;

- $A_2 : H_2 = \text{«Низьке»}, D_2 = \text{«Допустиме»}, AB_2 = \text{«Аварійно-високе»};$
- $A_3 : P_3 = \text{«Початкова»}, P_3 = \text{«Розвинена»}.$

Вихідну множину ймовірності подій S описано лінгвістичною змінною «Загальний спрацьований ресурс апарата захисту від перенапруг». Терми вихідної змінної та їхні інтервали визначено за стандартними відмітками вербально-числової шкали Харрінгтона:

- $ДВ = \text{«Дуже високий спрацьований ресурс»} (0,8; 1,0];$
- $В = \text{«Високий спрацьований ресурс»} (0,64; 0,8];$
- $С = \text{«Середній спрацьований ресурс»} (0,36; 0,64];$
- $Н = \text{«Низький спрацьований ресурс»} (0,2; 0,36];$
- $ДН = \text{«Дуже низький спрацьований ресурс»} [0,0; 0,2].$

База правил для оцінення загального спрацьованого ресурсу апарата захисту від перенапруг формується на основі експертних знань характеристик та процесів досліджуваного об'єкта. В цій моделі вона являє собою набір із 18 продукційних правил такого типу: «ЯКЩО кількість спрацювань апарата $A_1 = \{H_1, D_1, B_1\}$ ТА значення струму провідності апарата $A_2 = \{H_2, D_2, AB_2\}$ ТА міжелементна температурна різниця $A_3 = \{P_3, P_3\}$, ТО загальний спрацьований ресурс апарата захисту від перенапруг $S = \{ДВ, В, С, Н, ДН\}$ ».

Сформовану загальну базу правил для оцінення загального спрацьованого ресурсу апарата наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Загальна база правил для оцінення загального спрацьованого ресурсу апарата захисту від перенапруг

A_3							
P_3				P_3			
A_2	H_2	D_2	AB_2	A_2	H_2	D_2	AB_2
A_1				A_1			
B_1	B	B	$ДВ$	B_1	B	$ДВ$	$ДВ$
D_1	H	H	$ДВ$	D_1	B	B	$ДВ$
H_1	$ДН$	H	B	H_1	C	C	$ДВ$

Структурну схему розробленої нечіткої моделі для оцінення ТС апарата захисту від перенапруг подано на рис. 4.1.

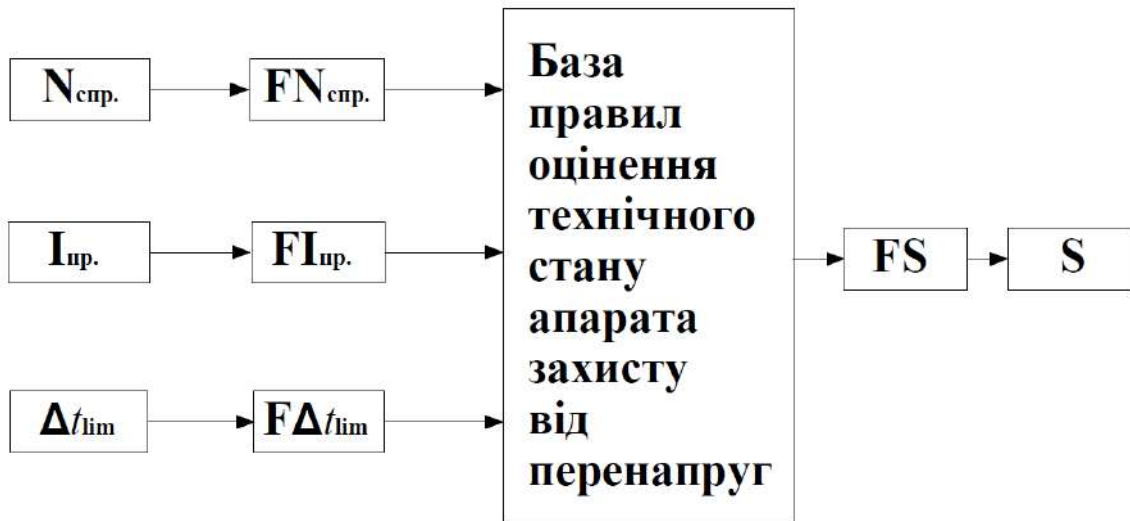


Рисунок 4.1 – Структурна схема нечіткої моделі для оцінення ТС апарата захисту від перенапруг:

$N_{cpr.}$ – кількість спрацювань апарата; $I_{np.}$ – значення струму провідності апарата захисту; Δt_{lim} – надлишкова температурна різниця; $FN_{cpr.}$ – лінгвістична змінна «Кількість спрацювань апарата»; $FI_{np.}$ – лінгвістична змінна «Значення струму провідності апарата»; $F\Delta t_{lim}$ – лінгвістична змінна «Надлишкова температурна різниця»; FS – лінгвістична змінна «Загальний спрацьований ресурс апарата захисту від перенапруг»; S – значення загального спрацьованого ресурсу апарату захисту від перенапруг

Для ОПН, в яких нелінійні робочі резистори виготовляються з оксиду цинку з більш високою нелінійною характеристикою, на відміну від ВР, де використовується карбід кремнію зі зв'язкою із рідкого скла, така вхідна характеристика як кількість спрацювань апарата не є впливовою [104, 109].

Для достовірного оцінення ймовірності відмови апарата захисту від перенапруг необхідно виконати настройку параметрів ФН вхідних та вихідних лінгвістичних змінних. Через відсутність достатньої кількості статистичних даних про вплив факторів на ТС апарата захисту, яка б дала нам можливість з високою мірою оцінити ймовірність його відмови,

настройку параметрів ФН вхідних лінгвістичних змінних виконаємо за допомогою експертних опитувань. Для побудови ФН нечітких термів вхідних лінгвістичних змінних A_1 , A_2 , A_3 опитано 9 експертів (п. 3.3), які мають досвід роботи в службах діагностування стану електротехнічного обладнання електроенергетичних підприємств. В процесі опитування всі розмірності визначено в умовних одиницях в межах нормованих інтервальних значень згідно з нормативною та заводською документаціями для апаратів захисту. Результати обробки експертних опитувань наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати обробки експертних оцінок

$A_1 = \text{«Кількість спрацювань апарата»}$						
$N_{спр.}, \text{ в.о.}$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$AN_1 = \text{«Нормальна»}$	9	5	0	0	0	0
$D_1 = \text{«Допустима»}$	0	4	9	9	7	0
$B_1 = \text{«Висока»}$	0	0	0	0	2	9
$A_2 = \text{«Значення струму провідності апарата»}$						
$I_{пр.}, \text{ в.о.}$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$H_2 = \text{«Низьке»}$	9	7	0	0	0	0
$D_2 = \text{«Допустиме»}$	0	2	9	9	1	0
$AB_2 = \text{«Аварійно високе»}$	0	0	0	0	8	9
$A_3 = \text{«Надлишкова температурна різниця»}$						
$\Delta t_{lim.}, \text{ в.о.}$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$P_3 = \text{«Початкова»}$	9	9	7	3	0	0
$R_3 = \text{«Розвинена»}$	0	0	2	6	9	9

Згідно з (3.19–3.20) визначимо ступені належності значень вхідних лінгвістичних змінних нечітким термам. Результати розрахунків зведено в табл. (4.3–4.5). ФН нечітких термів вхідних лінгвістичних змінних будуюмо згідно з (3.3–3.4), ФН нечітких термів вихідної змінної «Загальний спрацьований ресурс апарата захисту від перенапруг» визначається на стандартних інтервалах вербально-числової шкали Харрінгтона.

Таблиця 4.3 – Ступені належності нечітким термам значень вхідної величини «Кількість спрацювань апарата»

$N_{\text{спр.}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{\text{нормальне}}(N_{\text{спр.}})$	1	0,557	0	0	0	0
$\mu_{\text{допустиме}}(N_{\text{спр.}})$	0	0,443	1	1	0,776	0
$\mu_{\text{високе}}(N_{\text{спр.}})$	0	0	0	0	0,224	1

Таблиця 4.4 – Ступені належності нечітким термам значень вхідної величини «Значення струму провідності апарата»

$I_{\text{пр.}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{\text{низьке}}(I_{\text{пр.}})$	1	0,778	0	0	0	0
$\mu_{\text{допустиме}}(I_{\text{пр.}})$	0	0,222	1	1	0,111	0
$\mu_{\text{аварійно високе}}(I_{\text{пр.}})$	0	0	0	0	0,889	1

Таблиця 4.5 – Ступені належності нечітким термам значень вхідної величини «Надлишкова температурна різниця»

Δt_{lim}	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{\text{початкова}}(\Delta t_{\text{lim}})$	1	1	0,779	0,333	0	0
$\mu_{\text{розвинена}}(\Delta t_{\text{lim}})$	0	0	0,221	0,667	1	1

Розглянемо побудову ФН термів вхідної лінгвістичної змінної «Кількість спрацювань апарата» більш детально [60, с. 89]. Згідно з правилом Руспіні (3.2) доцільно почати побудову з нечіткого терма $D_1 =$ «Допустима». Якщо апарат не здійснював комутацій, то $N_{\text{спр.}}=0$, а його комутаційний ресурс належить до терма $H_1 =$ «Нормальна» зі ступенем належності $\mu_{H_1}(0)=1$. Якщо апарат здійснив нормативну кількість комутацій, то $B_1(1) =1$, а його комутаційний ресурс належить до терма $B_1 =$ «Висока» зі ступенем належності $\mu_{B_1}(1)=1$.

За правилом Руспіні можна стверджувати, що $\mu_{D_1}(0)=1 - \mu_{H_1}(0)=0$ та $\mu_{D_1}(1)=1 - \mu_{B_1}(1)=0$.

Експертне опитування показало, що належність $N_{\text{спр.}}=0,2$ до множини «Допустима» має деяку перевагу над належністю $N_{\text{спр.}}=0,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 4 бали.

Належність $N_{\text{спр.}}=0,4$ до множини «Допустима» має абсолютну перевагу над належністю $N_{\text{спр.}}=0,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $N_{\text{спр.}}=0,6$ до множини «Допустима» має абсолютну перевагу над належністю $N_{\text{спр.}}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $N_{\text{спр.}}=0,8$ до множини «Допустима» має очевидну або дуже сильну перевагу над належністю $N_{\text{спр.}}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється на 7 балів.

За отриманими балами складено матриці парних порівнянь Сааті для визначення границь ФН:

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_1/\lambda_2 \\ \lambda_2/\lambda_1 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 4/9 \\ 9/4 & 1-\lambda \end{bmatrix}; \quad (4.1)$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_3/\lambda_4 \\ \lambda_4/\lambda_3 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/7 \\ 7/9 & 1-\lambda \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

Визначаємо для матриць Λ_1 та Λ_2 найбільші власні числа λ :

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 4/9 \\ 9/4 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2; \quad (4.3)$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/7 \\ 7/9 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2. \quad (4.4)$$

Ступені належності вхідної лінгвістичної змінної «Кількість спрацювань апарата» до нечіткої терм множини «Допустима» визначаються за рівняннями:

$$\Lambda_1 \Omega_1 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 0,444 \\ 2,25 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (4.6)$$

$$\Lambda_2 \Omega_2 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 1,286 \\ 0,778 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Другі рівняння в системах (4.6) та (4.7) згідно з (3.20) замінюються умовою нормування $\sum_i \omega_i = 1$. Знаходимо вектори, які є розв'язанням цих рівнянь:

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} 0,307 \\ 0,693 \end{bmatrix}; \quad (4.8)$$

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} 0,563 \\ 0,437 \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Нормалізацію отриманих ступенів належності виконаємо шляхом ділення векторів Ω_1 та Ω_2 на відповідні максимальні елементи:

$$\Omega_1^N = \frac{\Omega_1}{\max\{\Omega_1\}} = \begin{bmatrix} 0,307/0,693 \\ 0,693/0,693 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,443 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (4.10)$$

$$\Omega_2^N = \frac{\Omega_2}{\max\{\Omega_2\}} = \begin{bmatrix} 0,563/0,563 \\ 0,437/0,563 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,776 \end{bmatrix}. \quad (4.11)$$

ФН нечіткої терм-множини «Допустима» має форму трапеції (3.4) і будується за такими значеннями: $\mu(0,2)=0,443$, $\mu(0,4)=1$, $\mu(0,6)=1$, $\mu(0,8)=0,776$. Значення ФН «Нормальна», «Висока» будуюмо згідно з правилом Руспіні.

Побудуємо ФН термів вхідної лінгвістичної змінної «Значення струму провідності апарата». Починаємо побудову з нечіткого терма $D_2 = \text{«Допустиме»}$. Якщо струм провідності не нижче нижньої межі за нормативним значенням, то $D_2 = 0$, а значення струму належить до терма $H_2 = \text{«Низьке»}$ зі ступенем належності $\mu_{H_2}(0)=1$. Якщо струм провідності досяг верхньої межі нормативного значення, то $AB_2(1) = 1$, а значення струму провідності належить до терма $AB_2 = \text{«Аварійно високе»}$ зі ступенем належності $\mu_{AB_2}(1)=1$.

За правилом Руспіні можна стверджувати, що $\mu_{D_2}(0)=1 - \mu_{H_2}(0)=0$ та $\mu_{D_2}(1)=1 - \mu_{AB_2}(1)=0$.

Експертне опитування показало, що належність $I_{пр.}=0,2$ до множини «Допустиме» має деяку перевагу над належністю $I_{пр.}=0,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 2 бали.

Належність $I_{\text{пр.}}=0,4$ до множини «Допустиме» має абсолютну перевагу над належністю $I_{\text{пр.}}=0,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $I_{\text{пр.}}=0,6$ до множини «Допустиме» має абсолютну перевагу над належністю $I_{\text{пр.}}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $I_{\text{пр.}}=0,8$ до множини «Допустиме» має однакову значущість з належністю $I_{\text{пр.}}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється на 1 бал.

Матриці парних порівнянь:

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_1/\lambda_2 \\ \lambda_2/\lambda_1 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 2/9 \\ 9/2 & 1-\lambda \end{bmatrix}; \quad (4.12)$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_3/\lambda_4 \\ \lambda_4/\lambda_3 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/1 \\ 1/9 & 1-\lambda \end{bmatrix}. \quad (4.13)$$

Найбільші власні числа Λ_1 та Λ_2 :

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 2/9 \\ 9/2 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2; \quad (4.14)$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/1 \\ 1/9 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2. \quad (4.15)$$

Ступені належності вхідної лінгвістичної змінної «Значення струму провідності апарата» до нечіткої терм-множини «Допустиме» визначаються за рівняннями:

$$\Lambda_1 \Omega_1 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 0,222 \\ 4,5 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (4.16)$$

$$\Lambda_2 \Omega_2 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 9 \\ 0,111 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.17)$$

Другі рівняння в системах (4.16) та (4.17) замінюються умовою нормування $\sum_i \omega_i = 1$. Знаходимо вектори, які є розв'язанням цих рівнянь

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} 0,182 \\ 0,818 \end{bmatrix}; \quad (4.18)$$

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} 0,9 \\ 0,1 \end{bmatrix}. \quad (4.19)$$

Нормалізація отриманих ступенів належності:

$$\Omega_1^N = \frac{\Omega_1}{\max\{\Omega_1\}} = \begin{bmatrix} 0,182/0,818 \\ 0,818/0,818 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,222 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (4.20)$$

$$\Omega_2^N = \frac{\Omega_2}{\max\{\Omega_2\}} = \begin{bmatrix} 0,9/0,9 \\ 0,1/0,9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,111 \end{bmatrix}. \quad (4.21)$$

ФН нечіткої терм множини «Допустиме» має форму трапеції (3.4) і будується за такими значеннями: $\mu(0,2)=0,222$, $\mu(0,4)=1$, $\mu(0,6)=1$, $\mu(0,8)=0,111$. Значення ФН «Низьке», «Аварійно високе» будуюмо відповідно до правила Руспіні.

Побудуємо ФН термів вхідної лінгвістичної змінної «Надлишкова температурна різниця». Якщо температурна різниця досягла верхньої межі нормативного значення, то $P_3(1) = 1$, а значення температурної різниці належить до терма $P_3 =$ «Розвинена» зі ступенем належності $\mu_{P_3}(1)=1$. За правилом Руспіні можна стверджувати, що $\mu_{P_3}(1)=1 - \mu_{P_3}(1)=0$.

Експертне опитування показало, що належність $\Delta t_{lim}=0,4$ до множини «Початкова» має очевидну перевагу над належністю $\Delta t_{lim}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 7 балів. Належність $\Delta t_{lim}=0,6$ до множини «Початкова» має деяку перевагу над належністю $\Delta t_{lim}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 3 бали.

Матриці парних порівнянь:

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_1/\lambda_2 \\ \lambda_2/\lambda_1 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 7/9 \\ 9/7 & 1-\lambda \end{bmatrix}; \quad (4.22)$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_3/\lambda_4 \\ \lambda_4/\lambda_3 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/3 \\ 3/9 & 1-\lambda \end{bmatrix}. \quad (4.23)$$

Найбільші власні числа Λ_1 та Λ_2 :

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 7/9 \\ 9/7 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2; \quad (4.24)$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/3 \\ 3/9 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2. \quad (4.25)$$

Ступені належності вхідної лінгвістичної змінної «Надлишкова температурна різниця» до нечіткої терм множини «Початкова» визначаються за рівняннями:

$$\Lambda_1 \Omega_1 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 0,778 \\ 1,285 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (4.26)$$

$$\Lambda_2 \Omega_2 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 3 \\ 0,333 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.27)$$

Другі рівняння в системах (4.26) та (4.27) замінюються умовою нормування $\sum_i \omega_i = 1$. Знаходимо вектори, які є розв'язанням цих рівнянь:

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} 0,438 \\ 0,562 \end{bmatrix}; \quad (4.28)$$

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} 0,75 \\ 0,25 \end{bmatrix}. \quad (4.29)$$

Нормалізація отриманих ступенів належності:

$$\Omega_1^N = \frac{\Omega_1}{\max\{\Omega_1\}} = \begin{bmatrix} 0,562/0,562 \\ 0,438/0,562 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,779 \end{bmatrix}; \quad (4.30)$$

$$\Omega_2^N = \frac{\Omega_2}{\max\{\Omega_2\}} = \begin{bmatrix} 0,25/0,75 \\ 0,75/0,75 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,333 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4.31)$$

ФН нечіткої терм множини «Початкова» має форму трапеції (3.4) і будується за такими значеннями: $\mu(0,2)=1,0$, $\mu(0,4)=0,779$, $\mu(0,6)=0,333$, $\mu(0,8)=0,0$. Значення ФН «Розвинена» будуюмо згідно з правилом Руспіні.

Отримані значення ФН вхідної лінгвістичної змінної «Кількість спрацювань апарату» будуються за аналітичними виразами:

$$\mu_{\text{НОРМАЛЬНА}}(N_{\text{спр.}}) = \begin{cases} 1; N_{\text{спр.}} \leq 0,0395; \\ 1 - \frac{N_{\text{спр.}} - 0,0395}{0,3605}; 0,4 \geq N_{\text{спр.}} \geq 0,0395; \\ 0; N_{\text{спр.}} \geq 0,4. \end{cases} \quad (4.32)$$

$$\mu_{\text{ДОПУСТИМА}}(N_{\text{спр.}}) = \begin{cases} 0; N_{\text{спр.}} \leq 0,0395; \\ 1 - \frac{0,4 - N_{\text{спр.}}}{0,3605}; 0,0395 \leq N_{\text{спр.}} \leq 0,4; \\ 1; 0,4 \leq N_{\text{спр.}} \leq 0,742; \\ 1 - \frac{N_{\text{спр.}} - 0,742}{0,258}; 0,742 \leq N_{\text{спр.}} \leq 1,0. \end{cases} \quad (4.33)$$

$$\mu_{\text{ВИСОКА}}(N_{\text{спр.}}) = \begin{cases} 0; N_{\text{спр.}} \leq 0,742; \\ 1 - \frac{1 - N_{\text{спр.}}}{0,258}; 1 \geq N_{\text{спр.}} \geq 0,742. \end{cases} \quad (4.34)$$

ФН вхідної лінгвістичної змінної «Надлишкова температурна різниця» будуються за аналітичними виразами:

$$\mu_{\text{НИЗЬКЕ}}(I_{\text{пр.}}) = \begin{cases} 1; I_{\text{пр.}} \leq 0,143; \\ 1 - \frac{I_{\text{пр.}} - 0,143}{0,257}; 0,4 \geq I_{\text{пр.}} \geq 0,143; \\ 0; I_{\text{пр.}} \geq 0,4. \end{cases} \quad (4.35)$$

$$\mu_{\text{ДОПУСТИМЕ}}(I_{\text{пр.}}) = \begin{cases} 0; I_{\text{пр.}} \leq 0,143; \\ 1 - \frac{0,4 - I_{\text{пр.}}}{0,257}; 0,143 \leq I_{\text{пр.}} \leq 0,4; \\ 1; 0,4 \leq I_{\text{пр.}} \leq 0,6; \\ 1 - \frac{I_{\text{пр.}} - 0,6}{0,225}; 0,6 \leq I_{\text{пр.}} \leq 0,825; \\ 0; I_{\text{пр.}} \geq 0,825. \end{cases} \quad (4.36)$$

$$\mu_{\text{АВАРІЙНО ВИСОКА}}(I_{\text{пр.}}) = \begin{cases} 0; I_{\text{пр.}} \leq 0,6; \\ 1 - \frac{0,825 - I_{\text{пр.}}}{0,225}; 0,825 \geq I_{\text{пр.}} \geq 0,6. \\ 1; I_{\text{пр.}} \geq 0,825 \end{cases} \quad (4.37)$$

ФН вхідної лінгвістичної змінної «Надлишкова температура різниця» будуються за аналітичними виразами:

$$\mu_{\text{ПОЧАТКОВА}}(\Delta t_{\text{lim}}) = \begin{cases} 1; \Delta t_{\text{lim}} \leq 0,3; \\ 1 - \frac{\Delta t_{\text{lim}} - 0,3}{0,448}; 0,748 \geq \Delta t_{\text{lim}} \geq 0,3; \\ 0; \Delta t_{\text{lim}} \geq 0,748. \end{cases} \quad (4.38)$$

$$\mu_{\text{РОЗВИНЕНА}}(\Delta t_{\text{lim}}) = \begin{cases} 0; \Delta t_{\text{lim}} \leq 0,3; \\ 1 - \frac{0,748 - \Delta t_{\text{lim}}}{0,448}; 0,748 \geq \Delta t_{\text{lim}} \geq 0,3; \\ 1; \Delta t_{\text{lim}} \geq 0,748. \end{cases} \quad (4.39)$$

Побудову ФН вихідної лінгвістичної змінної «Загальний спрацьований ресурс апарата захисту від перенапруг» виконаємо на шкалі Харрінгтона. За відомих інтервальних значень використовуємо лінійну апроксимацію ФН, форма яких є трикутною. Координати максимумів ФН є серединою інтервалу. ФН вихідної лінгвістичної змінної будуються за такими аналітичними виразами:

$$\mu_{\text{ДН}}(S) = \begin{cases} 1; S \leq 0,1; \\ 1 - \frac{S - 0,1}{0,18}; 0,1 \leq S \leq 0,28; \\ 0; S \geq 0,28. \end{cases} \quad (4.40)$$

$$\mu_{\text{Н}}(S) = \begin{cases} 1 - \frac{0,28 - S}{0,18}; 0,28 \geq S \geq 0,1; \\ 1 - \frac{S - 0,28}{0,22}; 0,28 < S \leq 0,5; \\ 0; 0,1 > S > 0,5. \end{cases} \quad (4.41)$$

$$\mu_{\text{С}}(S) = \begin{cases} 1 - \frac{0,5 - S}{0,22}; 0,5 \geq S \geq 0,28; \\ 1 - \frac{S - 0,5}{0,22}; 0,5 < S \leq 0,72; \\ 0; 0,28 > S > 0,72. \end{cases} \quad (4.42)$$

$$\mu_B(S) = \begin{cases} 1 - \frac{0,72 - S}{0,22}; & 0,72 \geq S \geq 0,5; \\ 1 - \frac{S - 0,72}{0,18}; & 0,72 < S \leq 0,9; \\ 0; & 0,5 > S > 0,9. \end{cases} \quad (4.43)$$

$$\mu_{дв}(S) = \begin{cases} 1; & S > 0,9; \\ 1 - \frac{0,9 - S}{0,18}; & 0,72 \leq S \leq 0,9; \\ 0; & S < 0,72. \end{cases} \quad (4.44)$$

Графічне зображення ФН нечітких термів лінгвістичних змінних подано на рис.4.2–4.5.

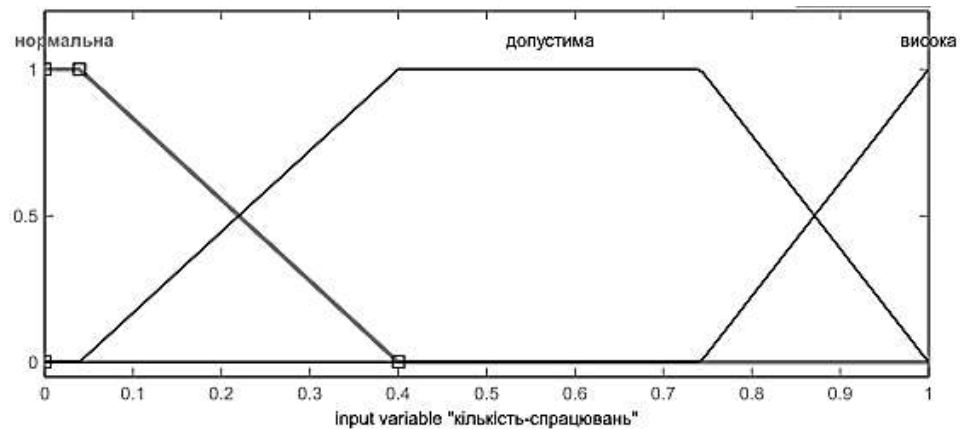


Рисунок 4.2 – ФН термів вхідної лінгвістичної змінної «Кількість спрацювань апарата»

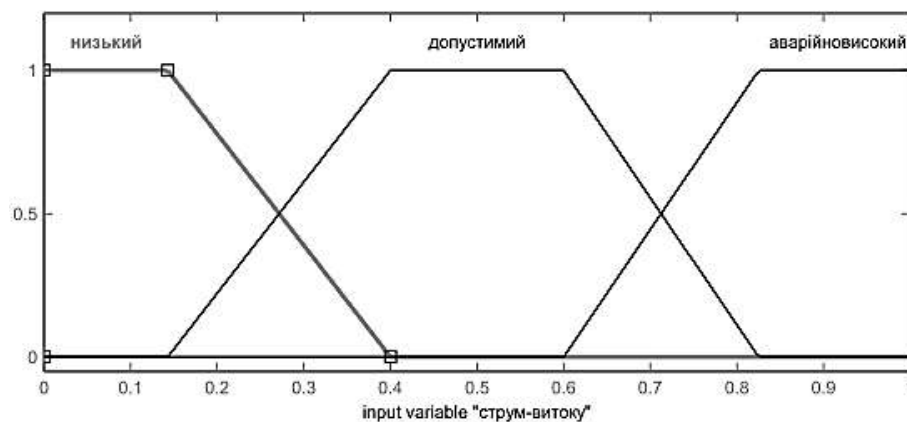


Рисунок 4.3 – ФН термів вхідної лінгвістичної змінної «Значення струму провідності апарата»

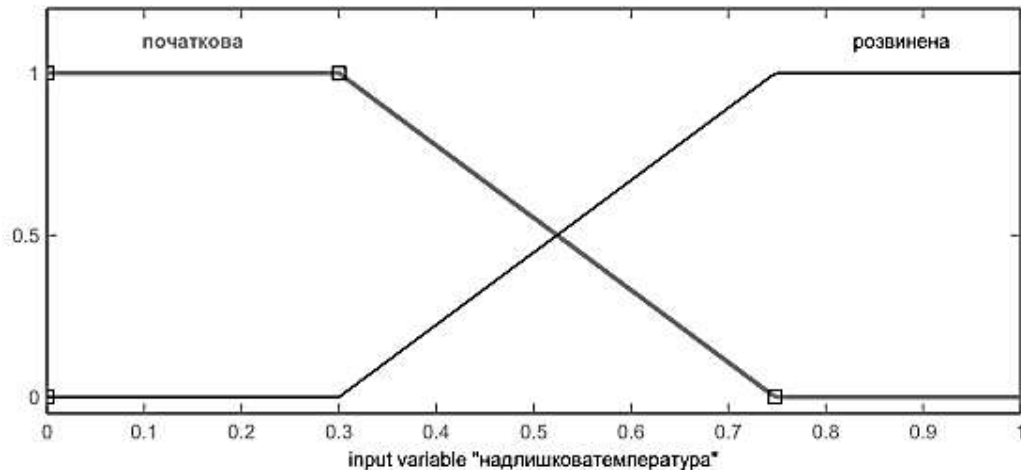


Рисунок 4.4 – ФН термів вхідної лінгвістичної змінної «Надлишкова температурна різниця»

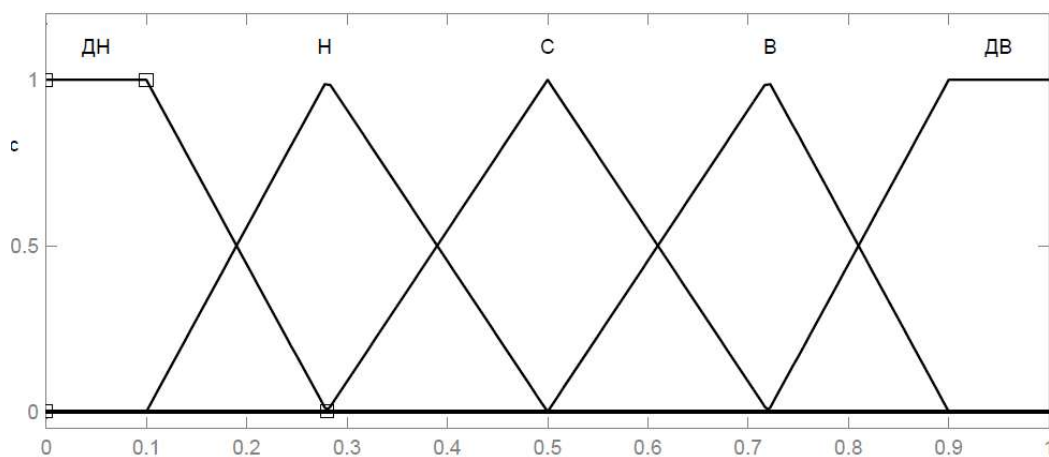


Рисунок 4.5 – ФН термів вихідної лінгвістичної змінної «Загальний спрацьований ресурс апарата захисту від перенапруг»

Розроблена модель оцінення ТС апарата для захисту від перенапруг має універсальне застосування для всіх апаратів РПВН.

4.2 Нечітка модель оцінення технічного стану обладнання комірки високовольтного вимикача

Однією з найважливіших функціональних одиниць РПВН, від якого великою мірою залежить стійкість роботи ЕЕС, є високовольтний вимикач, від надійної роботи якого залежить вимикання аварійних ділянок

електричних мереж. Переважна більшість, до 90%, високовольтних вимикачів в ЕЕС України – це повітряні вимикачі, оцінення ТС стану яких досліджено в роботі [60]. Але перспективним є впровадження елегазових вимикачів, експлуатація яких потребує набагато менших матеріальних затрат. Вони не потребують утримання і обслуговування системи стислого повітря, компресорного устаткування. Також елегазовий вимикач є більш надійним у випадку багаторазових відключень, у разі аварійного повторного включення (АПВ), що підтверджено досвідом експлуатації [8 – 14]. Тому визначення надійної роботи комірки високовольтного елегазового вимикача є заходом до підвищення надійної роботи ЕЕС.

Для того, щоб оцінити надійність роботи комірки елегазового високовольтного вимикача, потрібно розглядати ТС не тільки власне самого вимикача, а і ТС обладнання, котре входить до складу комірки. Якщо відбудеться відмова будь-якого обладнання комірки (трансформатор струму, роз'єднувач), то це призведе до відмови всієї комірки. Оцінювання ТС обладнання, яке входить до комірки високовольтного вимикача, виконується аналогічно до методики, наведеної в п. 4.2.

4.2.1 Оцінення ТС елегазового високовольтного вимикача

Для оцінення ТС високовольтного елегазового вимикача потрібно визначити основні діагностичні параметри, контроль яких дозволить оцінити спрацьований ресурс апарата. Вибір параметрів обумовлено нормативною [3 – 5], заводською документацією [140], а також можливістю технічної реалізації в СБК. Контроль цих параметрів дозволить скоротити обсяг періодичних випробувань (табл. 2.1: п. 14.2, п. 14.7, п. 14.9, п. 14.10), для яких необхідно виводити обладнання з роботи. Виділимо основні контрольовані експлуатаційні параметри, за якими буде побудовано нечітку модель визначення загального спрацьованого ресурсу елегазового високовольтного вимикача:

- кількість виконаних механічних циклів вкл./відкл;

- кількість комутаційних операцій з відключення струмів КЗ;
- контроль тиску газовмісного середовища
- контроль теплового стану головних рухомих контактів струмопровідного контуру.

Для визначення загального спрацьованого ресурсу за нечіткою моделлю обрано такі входні лінгвістичні змінні:

- A_1 = «Спрацьований механічний ресурс»;
- A_2 = «Спрацьований комутаційний ресурс»;
- A_3 = «Тиск елегазу»;
- A_4 = «Надлишкова температурна різниця».

Для кожної лінгвістичної змінної введено такі нечіткі терми:

- $A_1 : P_1 =$ «Припрацювальний», $D_1 =$ «Допустимий», $B_1 =$ «Відпрацьований»;
- $A_2 : P_2 =$ «Припрацювальний», $D_2 =$ «Допустимий», $B_2 =$ «Відпрацьований»;
- $A_3 : H_3 =$ «Низький», $D_3 =$ «Допустимий»;
- $A_4 : P_4 =$ «Початкова», $R_4 =$ «Розвинена».

Терми вихідної змінної та їхні інтервали визначено за стандартними відмітками вербально-числової шкали Харрінгтона.

База правил для оцінення ТС елегазового вимикача формується на основі експертних знань характеристик та процесів досліджуваного об'єкта. В цій моделі вона являє собою набір із 36 продукційних правил такого типу:

«ЯКЩО механічний ресурс вимикача $A_1 = \{P_1, D_1, B_1\}$ ТА комутаційний ресурс вимикача $A_2 = \{P_2, D_2, B_2\}$ ТА тиск елегазу $A_3 = \{H_3, D_3\}$ ТА надлишкова температурна різниця $A_4 = \{P_4, R_4\}$, ТО загальний спрацьований ресурс елегазового вимикача $S = \{ДВ, В, С, Н, ДН\}$ ».

Сформовану базу правил для оцінення ТС елегазового вимикача наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – База правил для оцінення ТС елегазового вимикача

A_4	P_4				P_4			
A_3	P_4				P_4			
H_3	A_2	P_2	D_2	B_2	A_2	P_2	D_2	B_2
	A_1				A_1			
	P_1	C	B	$ДВ$	P_1	B	$ДВ$	$ДВ$
	D_1	B	B	$ДВ$	D_1	$ДВ$	$ДВ$	$ДВ$
	B_1	$ДВ$	$ДВ$	$ДВ$	B_1	$ДВ$	$ДВ$	$ДВ$
D_3	A_2	P_2	D_2	B_2	A_2	P_2	D_2	B_2
	A_1				A_1			
	P_1	$ДН$	H	B	P_1	C	B	$ДВ$
	D_1	H	C	B	D_1	B	$ДВ$	$ДВ$
	B_1	B	B	$ДВ$	B_1	$ДВ$	$ДВ$	$ДВ$

Структурну схему розробленої нечіткої моделі для оцінення ТС елегазового вимикача зображено на рис. 4.6.



Рисунок 4.6 – Структурна схема нечіткої моделі для оцінення ТС елегазового вимикача

$R_{мех}$ – значення спрацьованого механічного ресурсу вимикача; $R_{ком}$ – значення спрацьованого комутаційного ресурсу вимикача; $P_{елег.}$ – значення тиску елегазу; Δt_{lim} – надлишкова температурна різниця; $FR_{мех}$ – лінгвістична змінна «Спрацьований механічний ресурс»; $FR_{ком}$ – лінгвістична змінна «Спрацьований комутаційний ресурс»; $FP_{елег.}$ – лінгвістична змінна «Тиск елегазу»; $F\Delta t_{lim}$ – лінгвістична змінна «Надлишкова температурна різниця»; FS – лінгвістична змінна «Загальний спрацьований ресурс елегазового

вимикача»; S – значення загального спрацьованого ресурсу елегазового вимикача.

Для побудови ФН нечітких термів вхідних лінгвістичних змінних A_1 , A_2 , A_3 , A_4 опитано 9 експертів, які мають досвід роботи в службах діагностування стану електротехнічного обладнання. Всі розмірності визначено в умовних одиницях, в межах нормованих інтервальних значень, відповідно до нормативної та заводської документації. Результати обробки експертних опитувань, ступені належності нечітким термам значень вхідної величини, побудова ФН, графічне зображення ФН наведено в Додатку А.

4.2.2 Оцінення ТС високовольтного трансформатора струму

Для оцінення ТС високовольтного трансформатора струму потрібно визначити основні діагностичні параметри, контроль яких дозволить оцінити спрацьований ресурс апарата. Вибір параметрів обумовлено нормативною [3 – 5], заводською документацією [141], а також можливістю технічної реалізації в СБК. Контроль цих параметрів дозволить скоротити обсяг періодичних випробувань (табл. 2.5: п. 9.1, п. 9.2, п. 9.9 – п. 9.13), для яких необхідно виводити обладнання з роботи. Виділимо основні контрольовані експлуатаційні параметри, за якими буде побудовано нечітку модель визначення загального спрацьованого ресурсу високовольтного трансформатора струму:

- сумарний струм витоку ізоляції трифазної групи трансформаторів струму (струм небалансу);
- тангенс кута діелектричних втрат головної ізоляції;
- відхилення ємності головної ізоляції;
- контроль теплового стану апарата та контактних з'єднань.

Для визначення загального спрацьованого ресурсу за нечіткою моделлю обрано такі вхідні лінгвістичні змінні:

- A_1 = «Струм небалансу»;
- A_2 = «Діелектричні втрати»;

- $A_3 = \text{«Відхилення ємності»}$;
- $A_4 = \text{«Надлишкова температурна різниця»}$.

Для кожної лінгвістичної змінної введено такі нечіткі терми:

- $A_1 : H_1 = \text{«Нормальний»}$, $D_1 = \text{«Допустимий»}$, $AB_1 = \text{«Аварійно-високий»}$;
- $A_2 : H_2 = \text{«Нормальний»}$, $D_2 = \text{«Допустимий»}$, $AB_2 = \text{«Аварійно-високий»}$;
- $A_3 : D_3 = \text{«Допустиме»}$, $AB_3 = \text{«Аварійно-високе»}$;
- $A_4 : P_4 = \text{«Початкова»}$, $R_4 = \text{«Розвинена»}$.

Терми вихідної змінної та їхні інтервали визначено за стандартними відмітками вербально-числової шкали Харрінгтона.

База правил для оцінення ТС трансформатора струму формується на основі експертних знань характеристик та процесів досліджуваного об'єкта. В цій моделі вона являє собою набір із 36 продукційних правил такого типу:

«ЯКЩО струм небалансу трансформатора струму $A_1 = \{H_1, D_1, AB_1\}$ ТА діелектричні втрати трансформатора струму $A_2 = \{H_2, D_2, AB_2\}$ ТА відхилення ємності трансформатора струму $A_3 = \{D_3, AB_3\}$ ТА надлишкова температурна різниця $A_4 = \{P_4, R_4\}$, ТО загальний спрацьований ресурс трансформатора струму $S = \{ДВ, В, С, Н, ДН\}$ ».

Сформовану базу правил для оцінення ТС трансформатора струму наведено в табл.4.7.

Таблиця 4.7 – База правил для оцінення ТС трансформатора струму

A_4	P_4				R_4			
A_3	P_4				R_4			
D_3	A_2	H_2	D_2	AB_2	A_2	H_2	D_2	AB_2
	A_1				A_1			
	H_1	H	H	B	H_1	H	H	B
	D_1	H	$ДН$	$ДВ$	D_1	H	H	$ДВ$
AB_1	B	B	$ДВ$	AB_1	B	B	$ДВ$	
AB_3	A_2	H_2	D_2	AB_2	A_2	H_2	D_2	AB_2
	A_1				A_1			
	H_1	C	C	$ДВ$	H_1	B	B	$ДВ$
	D_1	C	H	$ДВ$	D_1	C	C	$ДВ$
AB_1	B	$ДВ$	$ДВ$	AB_1	B	$ДВ$	$ДВ$	

Структурну схему розробленої нечіткої моделі для оцінення ТС трансформатора струму зображено на рис. 4.7.

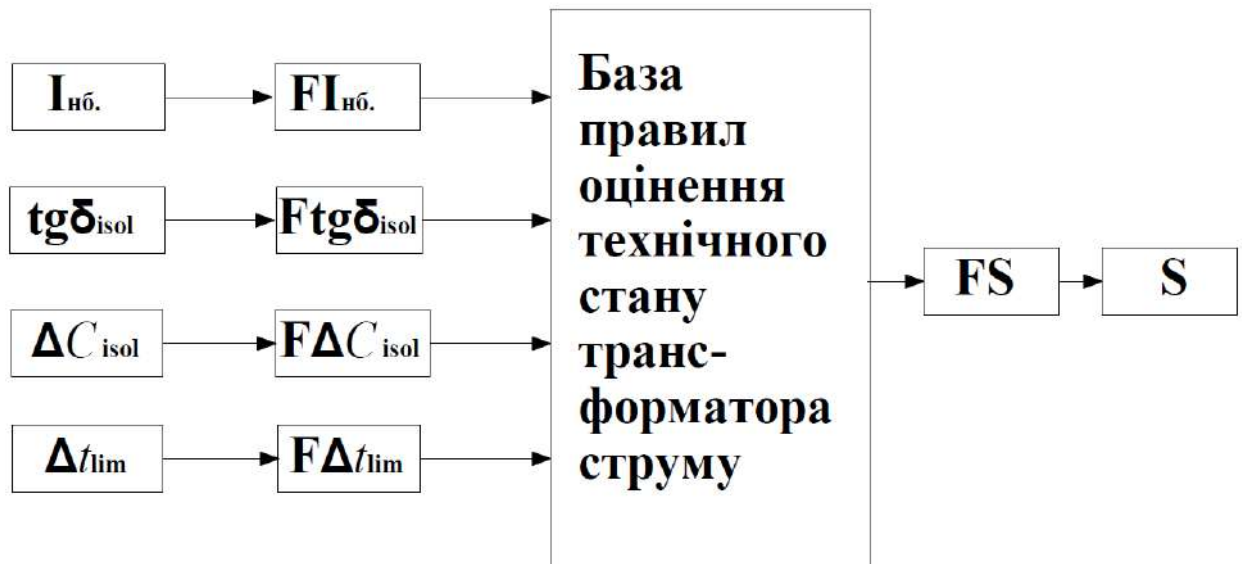


Рисунок 4.7 – Структурна схема нечіткої моделі для оцінення ТС трансформатора струму

$I_{nb.}$ – значення струму небалансу трансформаторної групи; $tg\delta_{isol}$ – значення тангенса кута діелектричних втрат; ΔC_{isol} – значення відхилення ємності; Δt_{lim} – надлишкова температурна різниця; $FI_{nb.}$ – лінгвістична змінна «Струм небалансу»; $Ftg\delta_{isol}$ – лінгвістична змінна «Діелектричні втрати»; $F\Delta C_{isol}$ – лінгвістична змінна «Відхилення ємності»; $F\Delta t_{lim}$ – лінгвістична змінна «Надлишкова температурна різниця»; FS – лінгвістична змінна «Загальний спрацьований ресурс трансформатора струму»; S – значення загального спрацьованого ресурсу трансформатора струму.

Для побудови ФН нечітких термів вхідних лінгвістичних змінних A_1 , A_2 , A_3 , A_4 опитано 9 експертів, які мають досвід роботи в службах діагностування стану електротехнічного обладнання. Всі розмірності визначено в умовних одиницях в межах нормованих інтервальних значень відповідно до нормативної та заводської документації. Результати обробки

експертних опитувань, ступені належності нечітким термам значень вхідної величини, побудова ФН, графічне зображення ФН наведено в Додатку Б.

4.2.3 Оцінення ТС високовольтного роз'єднувача

Для оцінення ТС високовольтного роз'єднувача потрібно визначити основні діагностичні параметри, контроль яких дозволить оцінити спрацьований ресурс апарата. Вибір параметрів обумовлено нормативною [3 – 5], заводською документацією [142, 143], а також можливістю технічної реалізації в СБК. Контроль цих параметрів дозволить скоротити обсяг періодичних випробувань (табл. 2.2: п. 15.3 – п. 15.6, п. 15.8), для яких необхідно виводити обладнання з роботи. Виділимо основні контрольовані експлуатаційні параметри, за якими буде побудовано нечітку модель визначення загального спрацьованого ресурсу високовольтного роз'єднувача:

- кількість виконаних механічних циклів вкл./відкл.;
- контроль теплового стану головних рухомих контактів струмопровідного контуру.

Для визначення загального спрацьованого ресурсу за нечіткою моделлю обрано такі вхідні лінгвістичні змінні:

- A_1 = «Спрацьований механічний ресурс»;
- A_2 = «Надлишкова температурна різниця».

Для кожної лінгвістичної змінної введено такі нечіткі терми:

- A_1 : Π_1 = «Припрацювальний», D_1 = «Допустимий», B_1 = «Відпрацьований»;
- A_2 : Π_2 = «Початкова», P_2 = «Розвинена».

Терми вихідної змінної та їхні інтервали визначено за стандартними відмітками вербально-числової шкали Харрінгтона.

База правил для оцінення ТС роз'єднувача формується на основі експертних знань характеристик та процесів досліджуваного об'єкта. В цій моделі вона являє собою набір із 6 продукційних правил такого типу:

«ЯКЩО механічний ресурс роз'єднувача $A_1 = \{P_1, D_1, B_1\}$ ТА надлишкова температурна різниця $A_2 = \{P_2, R_2\}$, ТО загальний спрацьований ресурс роз'єднувача $S = \{ДВ, В, С, Н, ДН\}$ ».

Сформовану базу правил для оцінення ТС роз'єднувача наведено в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – База правил для оцінення ТС роз'єднувача

A_1	P_2	P_2
A_2		
P_1	$ДН$	$В$
D_1	$С$	$ДВ$
B_1	$В$	$ДВ$

Структурну схему розробленої нечіткої моделі для оцінення ТС роз'єднувача зображено на рис. 4.8.



Рисунок 4.8 – Структурна схема нечіткої моделі для оцінення ТС роз'єднувача

R_{mex} – значення спрацьованого механічного ресурсу роз'єднувача; Δt_{lim} – надлишкова температурна різниця; FR_{mex} – лінгвістична змінна «Спрацьований механічний ресурс»; $F\Delta t_{lim}$ – лінгвістична змінна «Надлишкова температурна різниця»; FS – лінгвістична змінна «Загальний спрацьований ресурс роз'єднувача»; S – значення загального спрацьованого ресурсу роз'єднувача.

Для побудови ФН нечітких термів вхідних лінгвістичних змінних A_1 , A_2 опитано 9 експертів, які мають досвід роботи в службах діагностування

стану електротехнічного обладнання. Всі розмірності визначено в умовних одиницях в межах нормованих інтервальних значень відповідно до нормативної та заводської документації. Результати обробки експертних опитувань, ступені належності нечітким термам значень вхідної величини, побудова ФН, графічне зображення ФН наведено в Додатку В.

4.3 Висновки до розділу 4

Основні наукові результати, отримані в цьому розділі:

1. Розроблено нечітку математичну модель для оцінення ТС апарата для захисту від перенапруг, яка дозволить комплексно оцінити спрацьований ресурс апарата. В моделі використовуються діагностичні параметри, які обумовлено нормативною та заводською документацією. Параметри доступні для вимірювання та спостереження та можуть бути інтегровані в СБК.

2. Розроблено нечіткі моделі для оцінення ТС обладнання, яке входить до складу комірки високовольтного елегазового вимикача:

- нечітка модель оцінення ТС елегазового вимикача;
- нечітка модель оцінення ТС трансформатора струму;
- нечітка модель оцінення ТС роз'єднувача.

3. Застосовано евристичний метод в процесі налаштування ФН лінгвістичних змінних, які характеризують чинники впливу на ТС відповідального обладнання РПВН. Залучено 9 експертів відповідного напряму роботи в сфері діагностики електрообладнання. Запропонований метод визначення ТС відповідального обладнання РПВН є адаптивним та відкритим для залучення додаткових чинників впливу для більш детального аналізу ТС апаратів.

РОЗДІЛ 5

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ РПВН

5.1 Постановка задачі

Ризик порушення нормального функціонування РПВН залежить від точності прогнозу ймовірності відмови кожного елемента схеми розподільчої електроустановки. Статистична інформація, яка використовується для оцінення ймовірності відмови конкретного типу обладнання, ґрунтується на генеральній сукупності подій [144 – 147]. Тобто статистичні дані враховують такі зовнішні впливи як: погодний чинник, людський чинник, експлуатаційні фактори, зміну режимів електричної мережі та ін. Для визначення ймовірності відмови досліджуваної одиниці обладнання за ретроспективною інформацією необхідно мати повну і достовірну інформацію щодо функціонування такого типу обладнання. Але в сьогоденних умовах ведення документації, приховування або викривлення інформації отримання достовірних даних є складним завданням [147]. Статистичну інформацію можна використовувати лише для приблизного прогнозу залишкового ресурсу конкретного типу обладнання.

Для усунення цього недоліку необхідно корегування прогнозу поведінки обладнання даними про поточний ТС окремого елемента схеми РПВН. Корегування можна виконати врахуванням як ретроспективної інформації, так і залученням експертного досвіду стосовно функціонування контрольованого типу обладнання. Залучення експертного досвіду, експертних знань про функціонування певного типу обладнання є досить корисним для підвищення достовірності прогнозу ймовірності відмови окремого елемента схеми. Тому постає питання побудови методу, який об'єднує ймовірнісно-статистичний метод з експертним методом прогнозування.

Враховуючи різноманітну природу чинників впливу на поведінку електрообладнання, невизначеності причинно-наслідкових зв'язків в прогнозуванні, доцільно використання математичного апарата нечіткої логіки під час побудови моделей прогнозу експертно-статистичним методом. В процесі визначення ТС відповідального обладнання РПВН застосовувався метод нечіткого логічного виведення, оснований на використанні експертних систем. Для визначення ресурсу (ймовірності події) найкраще підходить метод нечітких причинно-наслідкових відношень, який є зручним для експерта у встановленні зв'язку між ознакою та подією. Розроблення удосконаленого методу прогнозування ресурсу відповідального обладнання РПВН є необхідним з метою модифікації функції прогнозу згідно з даними, отриманими від СБК.

5.2 Нечіткі відношення

Під час прогнозування будь-якої події існує взаємозв'язок між причиною та наслідком. В нечіткій логіці такий зв'язок визначається нечіткими причинно-наслідковими відношеннями. Тобто, кожену причину можна охарактеризувати множиною ознак $U_1 = \{u_1, u_2, \dots, u_i\}$, а кожний наслідок можна охарактеризувати множиною альтернатив $U_2 = \{u_1, u_2, \dots, u_j\}$. Конкретні причини та наслідки, визначені на універсальних множинах U_1 та U_2 , задано як декартовий добуток двох множин. Між собою нечіткі множини взаємопов'язані композиційним правилом нечіткого виведення Заде.

Композиційним правилом нечіткого виведення Заде називається відоме нечітке відношення R між ознакою S та альтернативою P , коли за нечіткого значення вхідної змінної S нечітке значення вихідної змінної P визначається як

$$P = \tilde{S} \circ \tilde{R}, \quad (5.1)$$

де знак « \circ » – максмінна композиція.

Ймовірність відмови досліджуваного обладнання можна визначити, використовуючи принцип бінарного нечіткого відношення. В загальному випадку [130] бінарне нечітке відношення задається на базисних множинах U_n, U_m і визначається як нечітке відношення

$$R = \left\{ \left\langle u_i, u_j \right\rangle, \mu_r \left(\left\langle u_i, u_j \right\rangle \right) \right\}, \quad (5.2)$$

де $\mu_r(\langle u_i, u_j \rangle)$ – ФН бінарного нечіткого відношення, яке визначається як відображення $\mu_r: U_n \times U_m \rightarrow [0, 1]$;

$\langle u_i, u_j \rangle$ – кортеж з двох елементів, за $u_i \in U_n; u_j \in U_m$.

Бінарне нечітке відношення можна записати у вигляді нечіткої матриці причинно-наслідкових відношень

$$R_{mn} = \begin{pmatrix} \mu_r(u_i, u_j)_{11} & \mu_r(u_i, u_j)_{12} & \dots & \mu_r(u_i, u_j)_{1n} \\ \mu_r(u_i, u_j)_{21} & \mu_r(u_i, u_j)_{22} & \dots & \mu_r(u_i, u_j)_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_r(u_i, u_j)_{m1} & \mu_r(u_i, u_j)_{m2} & \dots & \mu_r(u_i, u_j)_{mn} \end{pmatrix}, \quad (5.3)$$

де $\mu_r(u_i, u_j)_{mn}$ – ФН бінарного нечіткого відношення між ознакою x_n та альтернативою u_m ,

R_{mn} – матриця нечіткого відношення.

Використовуючи метод нечітких причинно-наслідкових відношень, можна встановити зв'язок між n ознаками та m альтернативами. Експерт має можливість оцінити вплив кожної ознаки на кожну з альтернатив, виходячи з досвіду та накопиченої інформації.

5.3 Метод прогнозування залишкового ресурсу за ретроспективною інформацією про функціонування досліджуваного електрообладнання

Статистичне прогнозування [146] – це процес визначення можливих в майбутньому подій на основі вже відомих. Розрізняють прогнози за періодом упередження:

- оперативні (до 1 міс.);
- короткотермінові (до 1 року);
- середньострокові (1–5 років);
- довгострокові (більш 5 років).

Статистичні дані, як правило, формуються за щорічними звітами про функціонування енергетичних об'єктів ЕЕС, тобто доцільно формувати короткострокові статистичні прогнози.

За методами статистичні прогнози діляться на такі:

- спрощені, основані на середніх показниках динаміки (середні темпи зростання, приросту);
- аналітичні методи (метод найменших квадратів, тренди тощо);
- адаптивні методи, які враховують ступінь старіння даних (метод експоненціальних середніх, метод авторегресії). Типову статистичну функцію розподілу ймовірності обладнання РПВН зображено на рисунку 5.1.

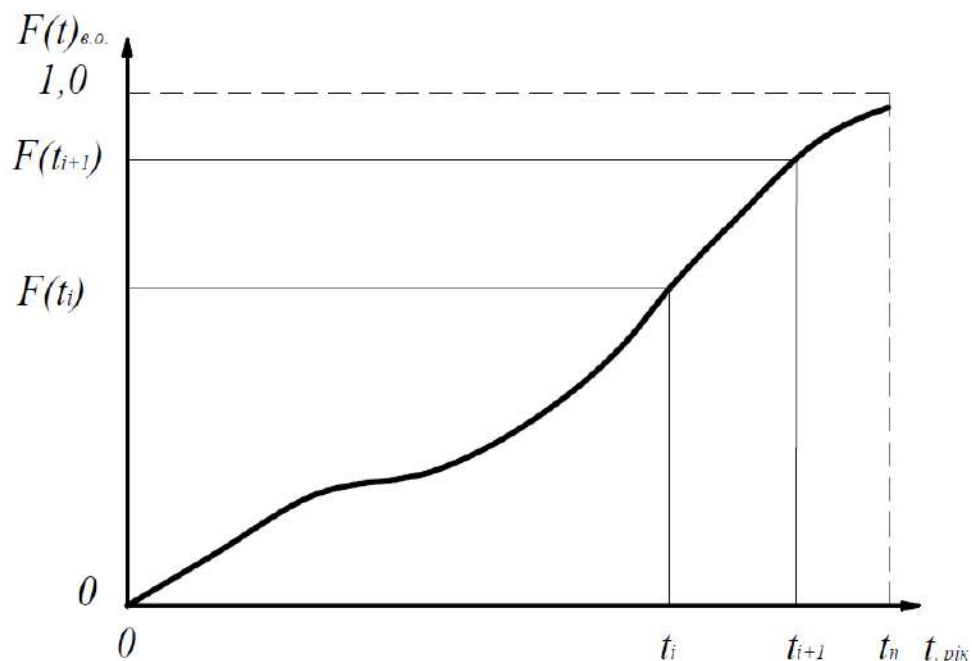


Рисунок 5.1 – Типова статистична функція розподілу ймовірності відмови електрообладнання РПВН (без врахування так званих припрацьовочних дефектів, що мають місце на початковому етапі експлуатації, які визвано скритими дефектами виробництва)

На рисунку 5.1: t_n – термін експлуатації досліджуваної одиниці обладнання; $F(t_i)$ – ймовірність відмови досліджуваної одиниці обладнання в момент спостереження t_i .

Електрообладнання, яке розглядається, знаходиться в роботоздатному стані в момент нагляду t_i . Відомо також функцію $F(t)$ розподілу ймовірності відмови такого типу вимикача. Із статистичної функції $F(t)$ визначається ймовірність відмови електрообладнання на інтервалі часу $\Delta t_n = t_{i+1} - t_i$.

$$\Delta F(t_n) = F(t_{i+1}) - F(t_i). \quad (5.4)$$

Оцінення ризику відмови електрообладнання розподільчих пристроїв потребує достовірної інформації про функціонування кожної одиниці відповідального обладнання РПВН. Процес експлуатації електрообладнання супроводжується зміненням його ТС. Але збір достовірної інформації потребує ретельного моніторингу та аналізу відмов кожного типу обладнання РПВН, що потребує врахування всіх експлуатаційних факторів, зокрема, погодного та людського. За цією інформацією будується залежність ймовірності відмови від терміну експлуатації. Отримана як результат обробки статистичних даних функція розподілу ймовірності події базується на загальній сукупності подій і не є ймовірнісною характеристикою конкретного досліджуваного обладнання [30]. Статистичне моделювання ускладнюється в отриманні достовірних результатів тим, що на практиці дуже важко отримати однорідну, репрезентативну статистику внаслідок різного розташування в схемі електроустановок, різнорідності обладнання, різних умов експлуатації.

Використання моделі визначення ймовірності відмови окремого типу обладнання за статистичною інформацією можливо лише для приблизного оцінення цієї події і потребує уточнення для конкретного досліджуваного об'єкта. Для уточнення спрацьованого ресурсу обладнання необхідно вести безперервний контроль за основними показниками, які впливають на його ТС. Сукупність аварійних та діагностичних статистик для однотипного

обладнання дає можливість виявити ймовірність виникнення таких показників експлуатаційної надійності, як ймовірність виникнення дефекту, напрацювання на дефект, механізм виникнення дефекту, розкриття механізмів виникнення відмов, але не дає узагальненої оцінки про ТС конкретної одиниці обладнання.

5.4 Експертний метод прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання за визначеним ТС

Експертний метод прогнозування ґрунтується на припущенні про постійний моніторинг апаратно-програмним комплексом СБК відповідального електрообладнання РПВН за певними чинниками впливу. Тобто, експертний прогноз обмежений умовою постійного контролю ТС обладнання. Для визначення умовної ймовірності відмови одиниці обладнання потрібно мати інформацію про поточний стан обладнання, тобто про спрацьований ресурс. Для визначення спрацьованого ресурсу необхідно використовувати певні алгоритми і математичні моделі, які були зазначені в попередніх розділах. В умовах відсутності або викривлення ретроспективної інформації, користуватись для визначення спрацьованого ресурсу тільки статистичними даними не є доцільним. В процесі прогнозування залишкового ресурсу відповідального електрообладнання РПВН, ТС досліджуваної одиниці визначається методом нечіткого логічного виведення, а побудову моделей виконувати методом експертного опитування з залученням експертів, які мають певний досвід роботи та володіють достатнім об'ємом інформації в галузі виробництва. Докладно методику та засоби моделювання викладено в п. 3.2 та п. 3.3.

Умовну ймовірність відмови об'єкта знайдемо нечітким причинно-наслідковим методом, який поєднує побудовану модель визначення ТС електрообладнання апаратом причинно-наслідкових відношень з ймовірністю відмови. Задача визначення умовних ймовірностей полягає у формуванні вхідних та вихідних множин (ознаки та альтернативи),

поєднаних між собою причинно-наслідковим зв'язком [60]. Сформована множина вхідних характеристик визначається умовою поточного ТС обладнання, визначеного за нечіткою моделлю $S = \{x_1, x_2, \dots, x_5\}$, де:

- x_1 – дуже малий діагностований загально-спрацьований ресурс;
- x_2 – малий діагностований загально-спрацьований ресурс;
- x_3 – середній діагностований загально-спрацьований ресурс;
- x_4 – великий діагностований загально-спрацьований ресурс;
- x_5 – дуже великий діагностований загально-спрацьований ресурс.

Вхідні змінні $x_1 \div x_5$ характеризують варіанти поточних станів, тобто діагностований загально-спрацьований ресурс електрообладнання S . Поточні стани описуються значенням функцій належності $\mu(S)$ терм-множин лінгвістичної змінної, які відкладено на інтервалах шкали бажаності Харрінгтона (3.13)–(3.17).

Для визначення умовної ймовірності відмови P_p сформовано вихідну множину (альтернативу) $Y_p = \{y_{p1}, y_{p2}, y_{p3}, y_{p4}, y_{p5}\}$, з функцією належності $\mu_p(Y_{pi})$ лінгвістичній змінній, яка складається з таких множин:

y_{p1} – дуже низька ймовірність відмови за діагностичними ознаками поточного ТС;

y_{p2} – низька ймовірність відмови за діагностичними ознаками поточного ТС;

y_{p3} – середня ймовірність відмови за діагностичними ознаками поточного ТС;

y_{p4} – висока ймовірність відмови за діагностичними ознаками поточного ТС;

y_{p5} – дуже висока ймовірність відмови за діагностичними ознаками поточного ТС.

Для визначення умовної ймовірності безвідмовної роботи P_q сформовано вихідну множину (альтернативу) $Y_q = \{y_{q1}, y_{q2}, y_{q3}, y_{q4}, y_{q5}\}$ з функцією належності $\mu_q(Y_{qi})$ лінгвістичній змінній, яка складається з таких множин:

y_{q1} – дуже низька ймовірність безвідмовної роботи за діагностичними ознаками поточного ТС;

y_{q2} – низька ймовірність безвідмовної роботи за діагностичними ознаками поточного ТС;

y_{q3} – середня ймовірність безвідмовної роботи за діагностичними ознаками поточного ТС;

y_{q4} – висока ймовірність безвідмовної роботи за діагностичними ознаками поточного ТС;

y_{q5} – дуже висока ймовірність безвідмовної роботи за діагностичними ознаками поточного ТС.

Вихідні множини Y_p та Y_q характеризують варіанти альтернатив, тобто подій (відмови або безвідмовної роботи) з функціями належності $\mu_p(Y_{pi})$ та $\mu_q(Y_{qi})$ терм-множин лінгвістичної змінної, відкладених на інтервалах шкали бажаності Харрінгтона (3.13)–(3.17) (табл. 5.1–5.2).

Таблиця 5.1 – Інтервали належності вихідних множин P_p

Альтернатива	Інтервал належності
y_{p1}	0-0,28
y_{p2}	0,1-0,5
y_{p3}	0,28-0,72
y_{p4}	0,5-0,9
y_{p5}	0,72-1,0

Таблиця 5.2 – Інтервали належності вихідних множин P_q

Альтернатива	Інтервал належності
y_{q1}	0-0,28
y_{q2}	0,1-0,5
y_{q3}	0,28-0,72
y_{q4}	0,5-0,9
y_{q5}	0,72-1,0

Матриця причинно-наслідкових відношень (5.3) складається методом експертного оцінення фахівцем відповідного напрямку, з досвідом роботи в профільній галузі, спираючись на дані про функціонування цього типу

електричного апарата. Експертне оцінювання формалізується методом парних порівнянь Сааті [137], тобто отриманням з кількісного вираження в відносних величинах, асоційованих з парами об'єктів, множини ваг (векторів). Кількісне вираження пар подій (y_i, y_j) подається матрицею $(n \times n)$

$$A=(a_{ij}), (i,j=1,2,\dots,n), \quad (5.5)$$

де A – матриця парних порівнянь Сааті.

Припустимо, y_1, y_2, \dots, y_n – сукупність можливих подій, які визвано причиною x_n , тоді бінарне нечітке відношення $\mu_r(x_i, y_j)$ буде дорівнювати ваговому коефіцієнту W_{in}

$$W_{in} = \sum a_{in} / \sum a_{nn}, \quad (5.6)$$

де a_{nn} – експертне судження про переваги події y_i над подією y_j , $(i,j=1,2,\dots,n)$.

В загальному вигляді алгоритм побудови матриці причинно-наслідкових відношень між вхідними ознаками та вихідними альтернативами подано в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Алгоритм побудови матриці причинно-наслідкових відношень

x_n	y_1	y_2	...	y_j	\sum	r_{nn}
y_1	1	a_{12}	...	a_{1n}	$\sum a_{1n}$	$\sum a_{1n} / \sum a_{nn}$
y_2	$1/a_{12}$	1	...	a_{2n}	$\sum a_{2n}$	$\sum a_{2n} / \sum a_{nn}$
...
y_i	$1/a_{1n}$	$1/a_{2n}$...	1	$\sum a_{in}$	$\sum a_{in} / \sum a_{nn}$
	\sum				$\sum a_{nn}$	$\sum a_{nn} / \sum a_{nn}$

Детальний приклад побудови матриці причинно-наслідкових відношень у разі визначення умовних ймовірностей подій, наведено у Додатку Д.

Відповідно до композиційного правила Заде (5.1), нечіткі відношення між вхідною характеристикою (ТС) та альтернативою відмови (5.7) або безвідмовної роботи (5.8) має такий загальний вигляд, відповідно:

$$\begin{bmatrix} \mu_p(y_1) \\ \mu_p(y_2) \\ \dots \\ \mu_p(y_j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_r(x_1, y_1)_{11} & \mu_r(x_2, y_1)_{12} & \dots & \mu_r(x_i, y_1)_{1j} \\ \mu_r(x_1, y_2)_{21} & \mu_r(x_2, y_2)_{22} & \dots & \mu_r(x_i, y_2)_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_r(x_1, y_j)_{i1} & \mu_r(x_2, y_j)_{i2} & \dots & \mu_r(x_i, y_j)_{ij} \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} \mu_s(x_1) \\ \mu_s(x_2) \\ \dots \\ \mu_s(x_i) \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$$\begin{bmatrix} \mu_q(y_1) \\ \mu_q(y_2) \\ \dots \\ \mu_q(y_j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_r(x_1, y_1)_{11} & \mu_r(x_2, y_1)_{12} & \dots & \mu_r(x_i, y_1)_{1j} \\ \mu_r(x_1, y_2)_{21} & \mu_r(x_2, y_2)_{22} & \dots & \mu_r(x_i, y_2)_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_r(x_1, y_j)_{i1} & \mu_r(x_2, y_j)_{i2} & \dots & \mu_r(x_i, y_j)_{ij} \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} \mu_s(x_1) \\ \mu_s(x_2) \\ \dots \\ \mu_s(x_i) \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Тоді ймовірність відмови P_p та безвідмовної роботи P_q визначимо за виразами

$$P_p = R_p \circ S, \quad (5.9)$$

$$P_q = R_q \circ S. \quad (5.10)$$

Рішення на інтервалах належності визначаються на основні приблизної модифікації центра ваги

$$y_{p0} = \frac{\sum_{j=1}^m \mu_p(y_j) \cdot y_j}{\sum_{j=1}^m \mu_p(y_j)}, \quad (5.11)$$

$$y_{q0} = \frac{\sum_{j=1}^m \mu_q(y_j) \cdot y_j}{\sum_{j=1}^m \mu_q(y_j)}. \quad (5.12)$$

Кількісні значення ймовірностей P_p та P_q визначаються рівняннями

$$P_p = y_{p0}, \quad (5.13)$$

$$P_q = y_{q0}. \quad (5.14)$$

За розробленим методом можна визначити умовну ймовірність відмови конкретного типу електрообладнання. Цей метод враховує вплив поточного ТС електрообладнання на ймовірність його відмови або безвідмовної роботи. Він виключно базується на експертному досвіді,

експертному аналізі експлуатаційної поведінки конкретного типу обладнання.

5.5 Експертно-статистичний метод прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання за певним ТС

Експертний метод оцінює ймовірність відмови досліджуваної одиниці обладнання, ґрунтуючись на даних про поточний ТС елемента РПВН, але він не може врахувати вплив таких експлуатаційних факторів, якими є: людський фактор, вплив метеоумов, режими енергосистеми тощо. Такі фактори враховує ймовірнісно-статистичний метод оцінення ймовірності відмови електрообладнання, який базується на сукупності всіх факторів, але не враховує поточний стан досліджуваної одиниці. Тому є доцільним поєднання цих методів в дослідженні ймовірності відмови електрообладнання РПВН з метою модифікації статистичної функції розподілення ймовірностей відмов відповідно до діагностичних даних, отриманих від СБК.

Під час оцінювання ймовірності відмови окремої одиниці відповідального обладнання РПВН на інтервалі часу, з урахуванням його ТС [35, 36, 59, 82], необхідно знати функцію розподілу ймовірності відмови цієї конкретної одиниці. Для формування цієї функції розподілу ймовірності відмови $F(t)$, враховуючи індивідуальні характеристики окремої одиниці обладнання, необхідним є врахування таких факторів:

- електричний апарат знаходиться в роботі під час діагностування t_1 ;
- діагностичні дані про ТС апарата.

Для визначення ймовірності відмови електрообладнання РПВН на інтервалі часу, з урахуванням робочого стану досліджуваного об'єкта в момент діагностування, використовуються статистичні дані про функціонування конкретної досліджуваної одиниці [72, 73]. За цими даними побудовано статистичну функцію розподілу ймовірності відмови $F(t)$ (рис. 5.1). Доцільність використання статистичних даних пояснюється тим,

що вони враховують всі експлуатаційні фактори, зокрема і вплив навколишнього середовища. Отримана в результаті обробки статистичних даних функція розподілу ймовірності події базується на генеральній сукупності подій і не є ймовірнісною характеристикою конкретного досліджуваного об'єкта [59]. Тому для визначення ймовірнісних характеристик конкретного типу обладнання на інтервалі часу необхідною є модифікація статистичної функції $F(t)$ з урахуванням його діагностованого ТС [60].

Врахування спрацьованого ресурсу за діагностичними ознаками електрообладнання в момент нагляду здійснюється таким чином [82]. Електрообладнання апіорі в момент діагностування t_1 має роботоздатний стан, а також відома функція $F(t)$ розподілу ймовірності відмови такого типу електрообладнання. Із статистичної функції $F(t)$ визначається ймовірність відмови досліджуваного об'єкта на інтервалі часу $\Delta t = t_1 - t_2$.

Введемо такі припущення ймовірності подій:

H_1 – об'єкт відмовив на інтервалі часу Δt ;

H_2 – безвідмовна робота на інтервалі часу Δt ;

G – об'єкт безвідмовно працював на інтервалі часу $[0; t_1]$;

\bar{G} – об'єкт відмовляв на інтервалі часу $[0; t_1]$;

C_2 – об'єкт відмовить до моменту часу t_2 ;

B – у об'єкта в момент часу t_1 діагностовано ТС S .

У разі відсутності діагностичних даних про стан об'єкта в момент нагляду t_1 , безумовна ймовірність відмови на інтервалі часу Δt визначається безпосередньо з функції $F(t)$

$$p(H_1) = F(t_2) - F(t_1). \quad (5.15)$$

Безумовні ймовірності подій можна визначити з функції $F(t)$

$$p(C_2) = F(t_2), \quad (5.16)$$

$$p(\bar{G}) = F(t_1). \quad (5.17)$$

Складна подія C_2 полягає в настанні або події \bar{G} (відмова на інтервалі часу $[0; t_1]$) або події H_1 (відмова на інтервалі часу Δt). Події \bar{G} та H_1 – несумісні (може наступити або подія \bar{G} , або подія H_1), тому ймовірність настання події C_2 визначається за формулою додання ймовірностей [148]

$$p(C_2) = p(\bar{G}) + p(H_1). \quad (5.18)$$

Настання події H_1 залежить від події G (роботоздатний стан об'єкта до моменту часу t_1). З огляду на залежність цих подій, ймовірність настання події H_1 визначається за формулою множення ймовірностей [148]

$$p(H_1) = p(G) \cdot p(H_1/G). \quad (5.19)$$

З урахуванням (5.18), ймовірність настання події C_2 визначається таким чином

$$p(C_2) = p(\bar{G}) + p(G) \cdot p(H_1/G). \quad (5.20)$$

Ймовірність настання події H_1 , за умови події G :

$$p(H_1/G) = \frac{p(C_2) - p(\bar{G})}{p(G)}. \quad (5.21)$$

З визначення події G виходить:

$$p(G) = 1 - p(\bar{G}) = 1 - F(t_1). \quad (5.22)$$

З урахуванням (5.16), (5.17), (5.22), ймовірність відмови досліджуваного об'єкта на інтервалі часу Δt за умови його роботоздатного стану на момент часу t_1 визначається з функції $F(t)$ (рис.5.1)

$$p(H_1/G) = \frac{F(t_2) - F(t_1)}{1 - F(t_1)}. \quad (5.23)$$

Оскільки ймовірність відмови об'єкта на інтервалі часу Δt залежить від його ТС в момент діагностування t_1 , як оціночний показник ТС взято величину S , яка кількісно характеризує загальний спрацьований ресурс досліджуваного об'єкта, та визначається за розробленими нечіткими моделями п. 4.2–4.3.

Додатково введемо такі визначення подій:

$$p(H_2) = 1 - p(H_1). \quad (5.24)$$

Подія B може спостерігатися в обох несумісних подіях H_1 та H_2 , тобто як у разі відмови обладнання на інтервалі Δt , так і за відсутності відмови. Безумовна ймовірність події B визначається за формулою повної ймовірності [145]:

$$p(B) = p(H_1) \cdot p(B/H_1) + p(H_2) \cdot p(B/H_2), \quad (5.25)$$

де $p(H_1)$ – апіорна ймовірність події H_1 до діагностування події B ;

$p(H_2)$ – апіорна ймовірність події H_2 до діагностування події B ;

$p(B/H_1)$ – умовна ймовірність підтвердження гіпотези «відмова на Δt » ознаками S , які характеризують ТС досліджуваного об'єкта;

$p(B/H_2)$ – умовна ймовірність підтвердження гіпотези «безвідмовна робота на Δt » ознаками S , які характеризують ТС досліджуваного об'єкта.

У випадку безперервного діагностування засобами СБК відбувається постійний моніторинг ТС, тобто подія B настає (виявлено ТС S). Тоді апостеріорна ймовірність гіпотези H_1 за умови появи події B (умовна ймовірність відмови на інтервалі часу Δt за умови визначення ТС S) визначається за теоремою Байєса [35, 36, 82]

$$p(H_1/B) = \frac{p(H_1) \cdot p(B/H_1)}{p(H_1) \cdot p(B/H_1) + p(H_2) \cdot p(B/H_2)}. \quad (5.26)$$

Якщо діагностовано ТС електрообладнання, за яким розраховано ймовірність відмови на інтервалі часу, то типова статистична функція $F(t_n)$ може бути модифікована відповідно до поточних діагностичних даних (рис. 5.2)

$$F_M(t_n) = p(H_1/B). \quad (5.27)$$

Прогноз ймовірності відмови електрообладнання, як правило, виконується на інтервалі часу не більше 1 року. Це обумовлено тим, що, як правило, статистична інформація про функціонування такого типу обладнання формується за даними щорічних звітів підприємств ОЕС України. Таким чином, можна визначити, що $\Delta F(t) = const$ на інтервалі досліджуваного періоду, тобто лінійна апроксимація функції $F(t)$ допустима. В процесі безперервного моніторингу електрообладнання, під впливом зовнішніх та внутрішніх факторів, загальний ТС зазнає постійних змін. Зміни можуть відбуватися як в бік погіршення, так і в бік нормалізації або покращення показників, тобто $\Delta F_M(t) \neq const$.

Процес зміни ТС має непередбачуваний (стахостичний) характер, тому можна контролювати лише поточний ТС в момент нагляду t_i . Кількісне оцінювання поточного ТС досліджуваного електрообладнання виконується за нечіткою моделлю, що обумовлено різною фізичною природою факторів впливу. Модифікована функція дає можливість розрахувати зміну ресурсних характеристик досліджуваної одиниці обладнання

$$F(t_n) - F_M(t_n) = \pm \delta_s F, \quad (5.28)$$

де $\pm \delta_s F$ – показник зміни ресурсних характеристик досліджуваної одиниці обладнання на інтервалі часу Δt_i ,

«-» – зменшення фактичного залишкового ресурсу відносно призначеного терміну служби;

«+» – збільшення фактичного залишкового ресурсу відносно призначеного терміну служби.

Типову статистичну функцію та її модифікований варіант на інтервалі дослідження зображено на рис. 5.2.

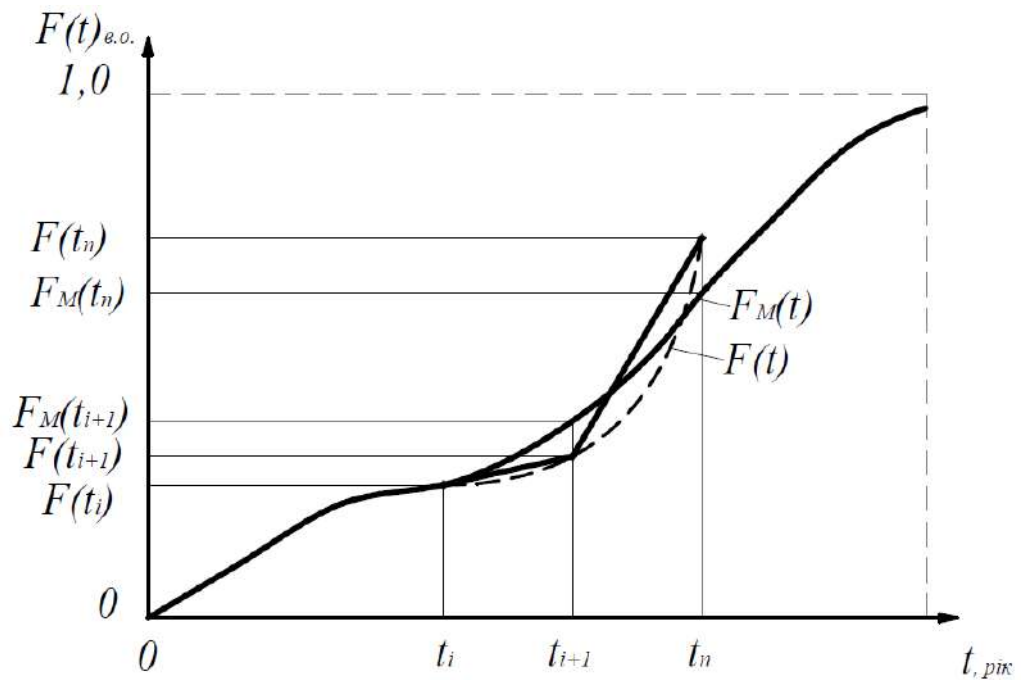


Рисунок 5.2 – Типова $F(t)$ і модифікована $F_M(t)$ статистичні функції розподілу ймовірності відмови електрообладнання РПВН (без врахування так званих припрацьовочних дефектів, що мають місце на початковому етапі експлуатації, викликаних прихованими дефектами виробництва)

На рисунку 5.2 t_n – термін експлуатації досліджуваної одиниці обладнання; $F(t_i)$ – ймовірність відмови досліджуваної одиниці обладнання в момент t_i ; $F_M(t_i)$ – прогнозна ймовірність відмови за даними про ТС на інтервалі t_{i+1} .

Модифікована функція дозволяє прогнозувати поведінку електрообладнання на інтервалі дослідження, враховуючи поточний ТС електрообладнання. Поєднання ймовірнісно-статистичної моделі прогнозування ресурсу електрообладнання з експертною моделлю оцінювання поточного ТС підвищує достовірність прогнозу. Модифіковану функцію доцільно використовувати у визначенні ризиків порушення роботи РПВН, які обумовлено ризиками відмов електрообладнання, що входить до складу електроустановки.

5.6 Висновки до розділу 5

В цьому розділі отримано такі результати:

1. Обґрунтовано застосування експертно-статистичного методу прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання РПВН. Перевагами цього методу є врахування поточного ТС досліджуваної одиниці обладнання для корегування ймовірнісних показників, отриманих з ретроспективної інформації про функціонування такого типу обладнання.

2. Сформовано загальний підхід до застосування евристичного методу визначення причинно-наслідкових зв'язків між ТС та спрацьованим ресурсом досліджуваної одиниці обладнання. Евристичний метод базується на математичному апараті нечіткої логіки (нечітких відношеннях).

3. Удосконалено метод модифікації статистичної функції ймовірності відмов певної одиниці обладнання РПВН за поточними діагностичними даними, які мають зв'язок з ТС та які отримано від СБК.

РОЗДІЛ 6

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ РПВН ЕКСПЕРТНО-СТАТИСТИЧНИМ МЕТОДОМ

6.1 Прогнозування ймовірності відмови апарата захисту від перенапруг на певному інтервалі часу

В п. 4.2 було оцінено ТС, тобто загальний спрацьований ресурс апарата захисту від перенапруг експертним методом. Прогнозування ресурсу апарата захисту від перенапруг доцільно виконати, поєднуючи експертний та ймовірнісно-статистичний методи.

На ПС «Дніпровська - 750» [111] під час тепловізійного обстеження було виявлено підозру на дефект розрядника типу РВМК – 750М в комірці РВ 750 2АТ ф.-«А» (рис. 6.1).

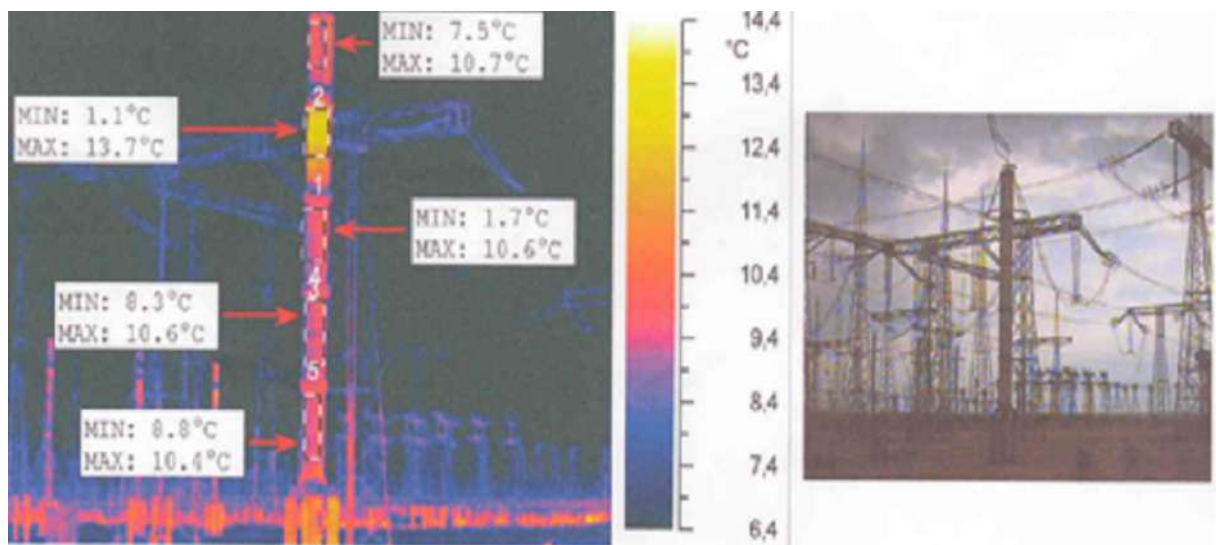


Рисунок 6.1 – Термограма розрядника типу РВМК – 750М
комірки РВ 750 2АТ ф.-«А»

Розрядник було виведено з експлуатації для позапланових випробувань, результати яких зведено до табл. 6.1. Нормативні значення вимірних характеристик наведено згідно з [4, 5], [104].

Таблиця 6.1 – Результати позапланових випробувань розрядника типу РВМК – 750М комірки РВ 750 2АТ ф.-«А»

Тип обладнання	Кількість комутацій граничних імпульсних струмів, N_k , од.		Струм провідності, I_{np} , мкА		Надлишкова температурна різниця, Δt , °С		Загальний спрацьований ресурс, в.о.
	На момент спостереження	Нормоване	На момент спостереження	Нормоване	На момент спостереження	Нормоване	
Розрядник РВМК-750	12	≤ 20	326	250-330	12,6	$\leq 2,0$	Розраховано MATLAB Fuzzy Logic 0,901

За вимірними характеристиками виконаємо оцінення загального спрацьованого ресурсу розрядника за розробленою нечіткою моделлю. Відповідно до вимірних і нормативних значень переведемо вимірні показники з іменованих у відносні одиниці:

- кількість спрацювань апарата $N_{спр.} = 0,59$ в.о.;
- значення струму провідності елемента $I_{np.} = 0,95$ в.о.;
- надлишкова температурна різниця $\Delta t_{ел.} > 1,0$ в.о.

Оцінювання загального спрацьованого ресурсу апарата захисту від перенапруг виконується за допомогою пакета MATLAB Fuzzy Logic Toolbox; результати зображено на рисунку 6.2.

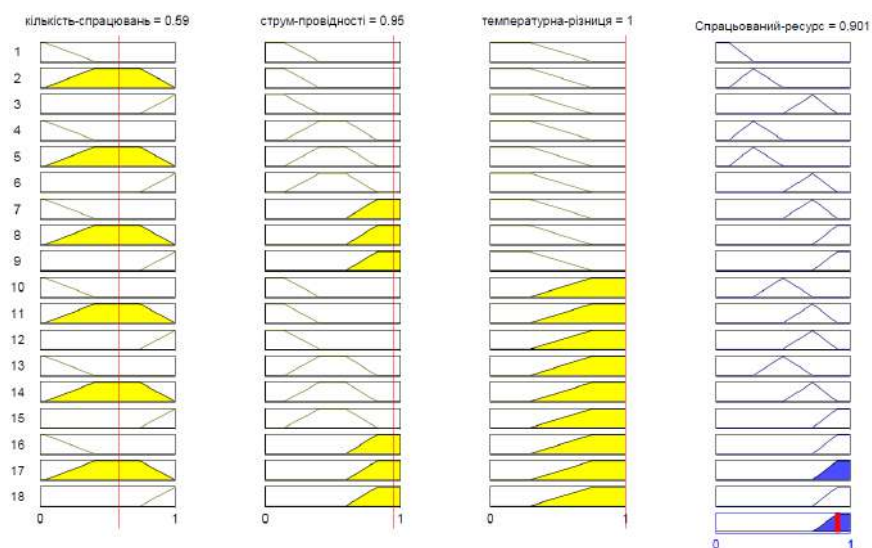


Рисунок 6.2 – Загальний спрацьований ресурс розрядника РВ 750 2АТ ф.-«А»

На рис. 6.2 можна побачити, що загальний спрацьований ресурс розрядника дорівнює

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i(s) \cdot S_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i(s)} = 0,901. \quad (6.1)$$

Для визначення ймовірності відмови розрядника на інтервалі часу ймовірнісно-статистичним методом використовуємо статистичну функцію розподілу ймовірностей відмови $F(t)$, отриману відповідно до статистичних даних про функціонування апаратів захисту від перенапруг [110]. Статистична функція інтегрує в собі всі фактори, які впливають на надійність роботи апаратів захисту від перенапруг (режим експлуатації, погодні умови, розташування в схемі енергооб'єкта, людський фактор та ін.), але не враховує ТС апарата в момент нагляду. Статистичну функцію розподілу ймовірності відмов апаратів захисту від перенапруг зображено на рисунку 6.3.

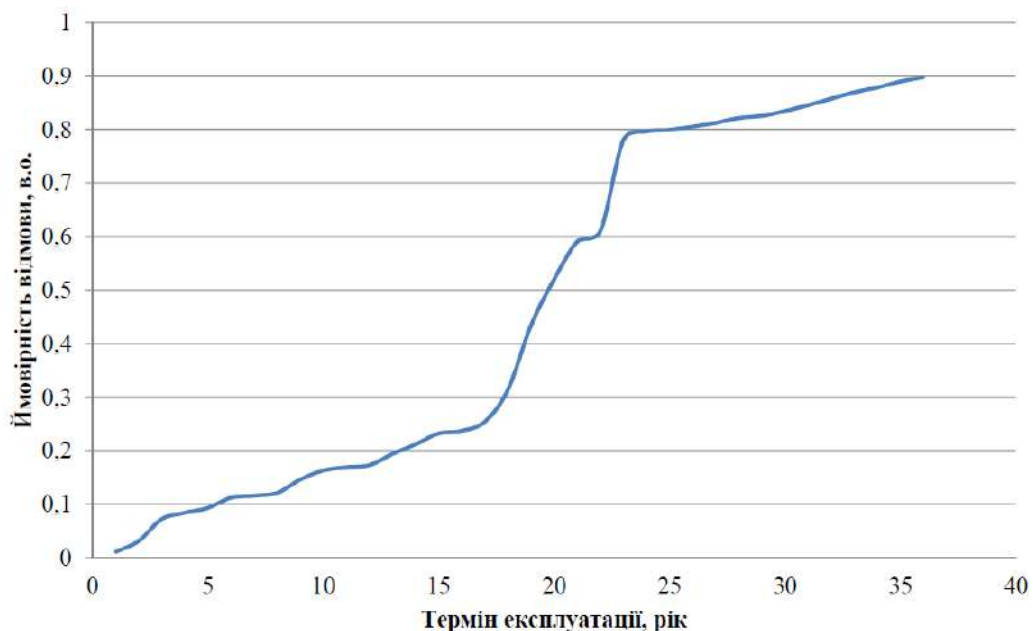


Рисунок 6.3 – Статистична функція розподілу ймовірності відмов апаратів захисту від перенапруг

За даними статистичної функції (рис. 6.3) та за виразами (5.23), (5.24) знайдемо чисельне значення апріорної ймовірності відмови та безвідмовної

роботи розрядника на інтервалі часу $\Delta t=1$ рік (розрядник в експлуатації 21 рік).

$$p(H_1) = \frac{F(t_2) - F(t_1)}{1 - F(t_1)} = \frac{0,78 - 0,61}{1 - 0,61} = 0,436; \quad (6.2)$$

$$p(H_2) = 1 - p(H_1) = 0,564. \quad (6.3)$$

Ці ймовірності базуються на узагальненій ретроспективній інформації про функціонування такого типу обладнання. Для конкретного апарата, який діагностується, необхідним є врахування поточного ТС за основними параметрами, обумовленими нормативною документацією. В п. 4.2 за побудованою моделлю було визначено спрацьований ресурс розрядника. За виразами (4.40)–(4.44) знайдемо ступені належності $\mu(S)$ до вхідної множини $S = \{x_1, x_2, \dots, x_5\}$.

$$\mu_{ДВ}(S) = \begin{cases} 1; & S > 0,9; \\ 1 - \frac{0,9 - S}{0,18}; & 0,72 \leq S \leq 0,9; \\ 0; & S < 0,72. \end{cases} \Rightarrow \mu_{ДВ}(S) = 1. \quad (6.4)$$

Графічне подання знаходження рішення на інтервалах належності Харрінгтона подано на рисунку 6.4.

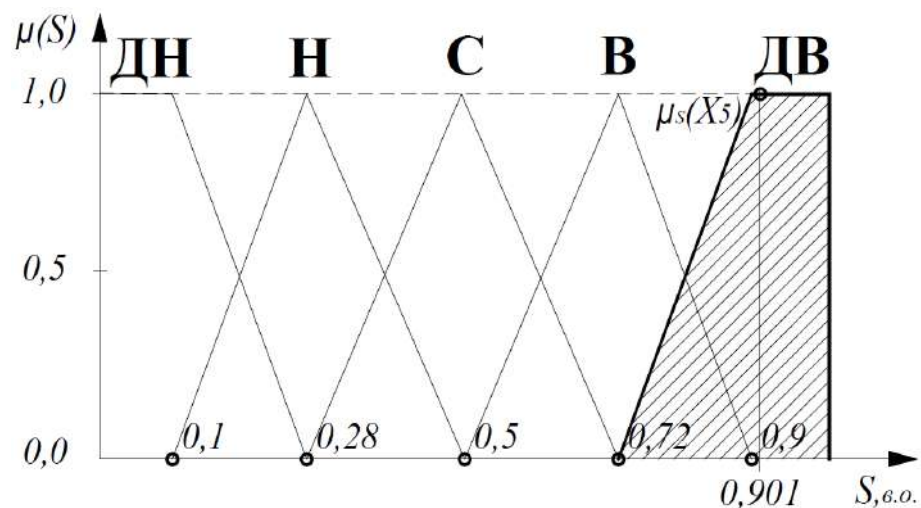


Рисунок 6.4 – Ступені належності нечітким термам вихідної лінгвістичної змінної «Загальний спрацьований ресурс» апарата захисту від перенапруг: S спрацьований ресурс, в.о.; $\mu(S)$ – ступінь належності нечіткій змінній «Загальний спрацьований ресурс».

Ступені належності $\mu_p(Y_i)$ та $\mu_q(Y_i)$ до вихідних множин $Y_p = \{y_{p1}, y_{p2}, y_{p3}, y_{p4}, y_{p5}\}$ та $Y_q = \{y_{q1}, y_{q2}, y_{q3}, y_{q4}, y_{q5}\}$ знайдемо методом бінарного нечіткого відношення (5.7)–(5.8) композиційного правила Заде (5.9)–(5.10). Бінарне нечітке відношення реалізується за допомогою матриці причинно-наслідкових відношень (5.3) R_p та R_q , які побудовано експертним оціненням причинних зв'язків між входами та альтернативами:

- матриця причинно-наслідкових відношень (спрацьований ресурс – ймовірність відмови)

$$R_p = \begin{bmatrix} 0,91 & 0,541 & 0,123 & 0,094 & 0,105 \\ 0,326 & 0,897 & 0,652 & 0,036 & 0,018 \\ 0,024 & 0,115 & 0,886 & 0,031 & 0,044 \\ 0,022 & 0,036 & 0,151 & 0,821 & 0,109 \\ 0,06 & 0,04 & 0,012 & 0,08 & 0,835 \end{bmatrix}; \quad (6.5)$$

- матриця причинно-наслідкових відношень (спрацьований ресурс – ймовірність безвідмовної роботи)

$$R_q = \begin{bmatrix} 0,07 & 0,046 & 0,014 & 0,106 & 0,867 \\ 0,026 & 0,039 & 0,123 & 0,813 & 0,113 \\ 0,038 & 0,098 & 0,837 & 0,044 & 0,047 \\ 0,296 & 0,864 & 0,396 & 0,024 & 0,022 \\ 0,892 & 0,396 & 0,114 & 0,075 & 0,095 \end{bmatrix}. \quad (6.6)$$

Згідно з (5.7) знайдемо

$$\begin{bmatrix} y_{p5} \\ y_{p4} \\ y_{p3} \\ y_{p2} \\ y_{p1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,91 & 0,541 & 0,123 & 0,094 & 0,105 \\ 0,326 & 0,897 & 0,652 & 0,036 & 0,018 \\ 0,024 & 0,115 & 0,886 & 0,031 & 0,044 \\ 0,022 & 0,036 & 0,151 & 0,821 & 0,109 \\ 0,06 & 0,04 & 0,012 & 0,08 & 0,835 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 1,0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,91 \\ 0,326 \\ 0,024 \\ 0,022 \\ 0,06 \end{bmatrix}. \quad (6.7)$$

Графічне подання визначення рішення на інтервалах належності Харрінгтона зображено на рисунку 6.5.

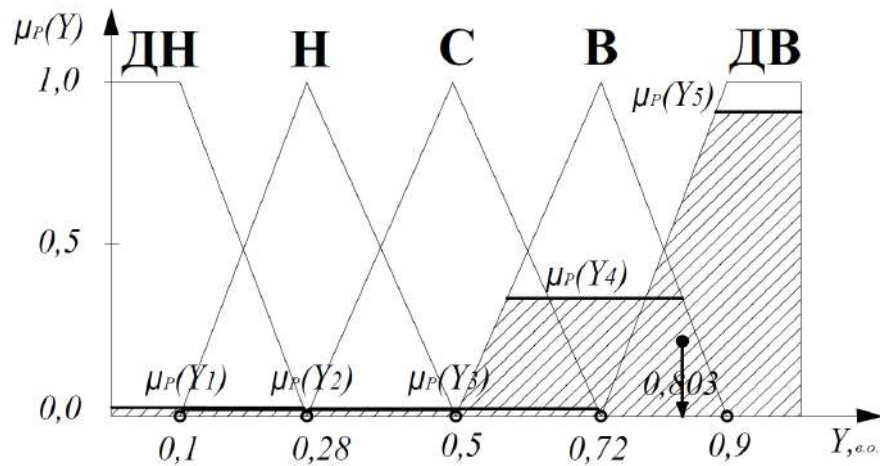


Рисунок 6.5 – Ступені належності нечітким вихідним множинам P_{pi} умовної ймовірності $p(B/H_1)$ апарата захисту від перенапруг: Y – універсальна множина визначення альтернатив; $\mu(P_p)$ – ступінь належності альтернативі «відмова»

Згідно з (5.8) знайдемо

$$\begin{bmatrix} y_{q5} \\ y_{q4} \\ y_{q3} \\ y_{q2} \\ y_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,07 & 0,046 & 0,014 & 0,106 & 0,867 \\ 0,026 & 0,039 & 0,123 & 0,813 & 0,113 \\ 0,038 & 0,098 & 0,837 & 0,044 & 0,047 \\ 0,296 & 0,864 & 0,396 & 0,024 & 0,022 \\ 0,892 & 0,396 & 0,114 & 0,075 & 0,095 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 1,0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,07 \\ 0,026 \\ 0,038 \\ 0,296 \\ 0,892 \end{bmatrix}. \quad (6.8)$$

Графічне зображення визначення рішення на інтервалах належності Харрінгтона подано на рисунку 6.6.

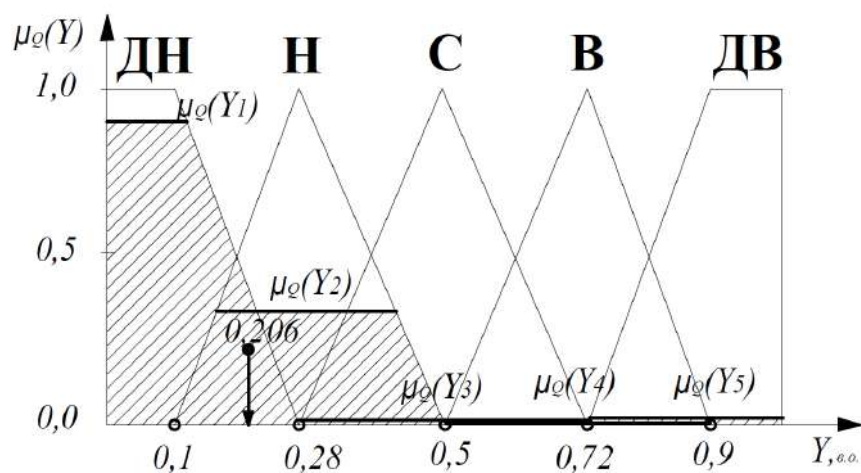


Рисунок 6.6 – Ступені належності нечітким вихідним множинам P_{qi} умовної ймовірності $p(B/H_2)$ апарата захисту від перенапруг: Y – універсальна множина визначення альтернатив; $\mu(P_p)$ – ступінь належності альтернативі «безвідмовна робота»

Числові значення y_{p0} та y_{q0} знайдемо за виразами (5.11)–(5.12)

$$y_{p0} = \frac{0,06 \cdot 0,1 + 0,022 \cdot 0,28 + 0,024 \cdot 0,5 + 0,326 \cdot 0,72 + 0,91 \cdot 0,9}{0,06 + 0,022 + 0,024 + 0,326 + 0,91} = 0,803; \quad (6.9)$$

$$y_{q0} = \frac{0,892 \cdot 0,1 + 0,296 \cdot 0,28 + 0,038 \cdot 0,5 + 0,026 \cdot 0,72 + 0,07 \cdot 0,9}{0,892 + 0,296 + 0,038 + 0,026 + 0,07} = 0,206. \quad (6.10)$$

Умовні значення ймовірності відмови $p(B/H_1)$ та безвідмовної роботи $p(B/H_2)$ за визначеним ТС знайдемо за виразами (5.13)–(5.14)

$$y_{p0} = P_p = p(B/H_1) = 0,803; \quad (6.11)$$

$$y_{q0} = P_q = p(B/H_2) = 0,206. \quad (6.12)$$

За визначеними апріорними (6.2)–(6.3) та умовними (6.11)–(6.12) ймовірностями відмови та безвідмовної роботи розрядника визначимо за теоремою Байєса (5.26) апостеріорну ймовірність відмови розрядника на інтервалі часу Δt

$$p(H_1/B) = \frac{p(H_1) \cdot p(B/H_1)}{p(H_1) \cdot p(B/H_1) + p(H_2) \cdot p(B/H_2)} = \frac{0,436 \cdot 0,803}{0,436 \cdot 0,803 + 0,564 \cdot 0,206} = 0,751. \quad (6.13)$$

6.2 Прогнозування ймовірності відмови комірки високовольтного вимикача на інтервалі часу експертно-статистичним методом

В п. 4.3 експертним методом було побудовано нечіткі моделі для оцінення ТС обладнання, яке входить до складу комірки високовольтного вимикача. Для прогнозування ймовірності відмови комірки високовольтного вимикача визначимо ймовірність відмови кожної одиниці обладнання, яке входить до складу комірки, на інтервалі часу 1 рік. Прогнозування ресурсу виконаємо на прикладі комірки Л-229 ПС ДД-330 кВ, в якій виявлено аварійний дефект трансформатора струму типу ТФКН-330 кВ системою безперервного контролю «SAFE-T» підприємства ТОВ «Енергоавтоматизація». Згідно з даними контролю ТС обладнання комірки Л-229 високовольтного вимикача за побудованими нечіткими моделями визначимо ТС кожної одиниці обладнання комірки.

Ймовірність настання сумісних подій в загальному вигляді визначається за [148]

$$Q\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_i Q(A_i) - \sum_{i,j} Q(A_i A_j) + \sum_{i,j,k} Q(A_i A_j A_k) + \dots + (-1)^{n-1} \sum_n Q(A_1 A_2 A_n). \quad (6.14)$$

Ймовірність відмови у випадку застосування для елемента РПВН (комірки)

$$\begin{aligned} p\left(\sum_{i=1}^n (H_1 / B)_i\right) &= \sum_i p(H_1 / B)_i - \dots \\ &\dots - \sum_{i,j} p((H_1 / B)_i \cdot (H_1 / B)_j) + \dots \\ &\dots + \sum_{i,j,k} p((H_1 / B)_i \cdot (H_1 / B)_j \cdot (H_1 / B)_k) + \dots \\ &\dots + (-1)^{n-1} \sum_n p((H_1 / B)_1 \cdot (H_1 / B)_2 \cdot (H_1 / B)_n), \end{aligned} \quad (6.15)$$

де n – кількість елементів в схемі.

Значення ймовірності безвідмовної роботи та ймовірності відмови (за відсутності інформації про конкретний об'єкт ЕЕС) за статистичними даними визначається згідно з [46].

Ймовірність відмови

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right], \quad (6.16)$$

де λ – середня інтенсивність відмов, рік⁻¹;

t – напрацювання апарата на час спостереження, рік;

$P(t)$ – значення ймовірності безвідмовної роботи, в.о.

Ймовірність безвідмовної роботи

$$Q(t) = 1 - P(t), \quad (6.17)$$

де $Q(t)$ – ймовірність відмови об'єкта, в.о.

Схему комірки високовольтного вимикача зображено на рисунку 6.7.

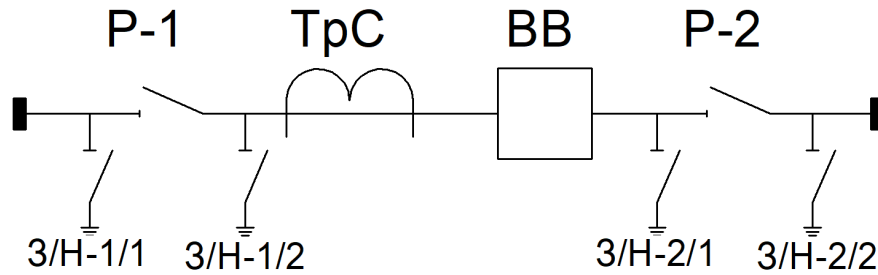


Рисунок 6.7 – Схема комірки високовольтного вимикача:

P-1, P-2 – роз'єднувачі; ТрС – трансформатор струму; ВВ – високовольтний вимикач; 3/Н – 1/1, 3/Н – 1/2, 3/Н – 2/1, 3/Н – 2/2 – заземлювальні ножі

6.2.1 Загальний спрацьований ресурс високовольтного елегазового вимикача

Дані діагностичних параметрів, за якими виконується оцінювання ТС високовольтного вимикача, наведено в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Спрацьований ресурс вузлів високовольтного вимикача за даними спостереження

Тип обладнання	Кількість механічних циклів ВКЛ.-ВІДКЛ.		Кількість комутаційних операцій, за $I_{відкл.} \leq 50$ кА		Надлишкова температурна різниця, Δt , °С		Тиск елегазу, P_g , бар		Загальний спрацьований ресурс, в.о.
	На момент спостереження	Нормоване*	На момент спостереження	Нормоване*, n_x	На момент спостереження	Нормоване*	На момент спостереження	Нормоване*	
Силовий вимикач 3AP2 FI SIEMENS	1380	6000	900	$n_x = f(I_{кз})$	0,0	≤ 50	5,88	5,0-6,0	Розраховано MATLAB Fuzzy Logic 0,367

*Нормативні дані наведено відповідно до інструкції з експлуатації цього типу вимикача, СОУ-Н ЕЕ 20.577:2007 [4, 140].

Відповідно до виміряних і нормативних значень переведемо виміряні показники з іменованих у відносні одиниці:

- спрацьований механічний ресурс $R_{мех.} = 0,23$ в.о.;

- спрацьований комутаційний ресурс $R_{ком.} = 0,15$ в.о.;
- тиск елегазу $P_{елег.} = 0,88$ в.о.;
- надлишкова температурна різниця $\Delta t_{ел.} = 0,0$ в.о.

Оцінювання загального спрацьованого ресурсу виконується за допомогою пакета MATLAB Fuzzy Logic Toolbox: результати подано на рисунку 6.8.

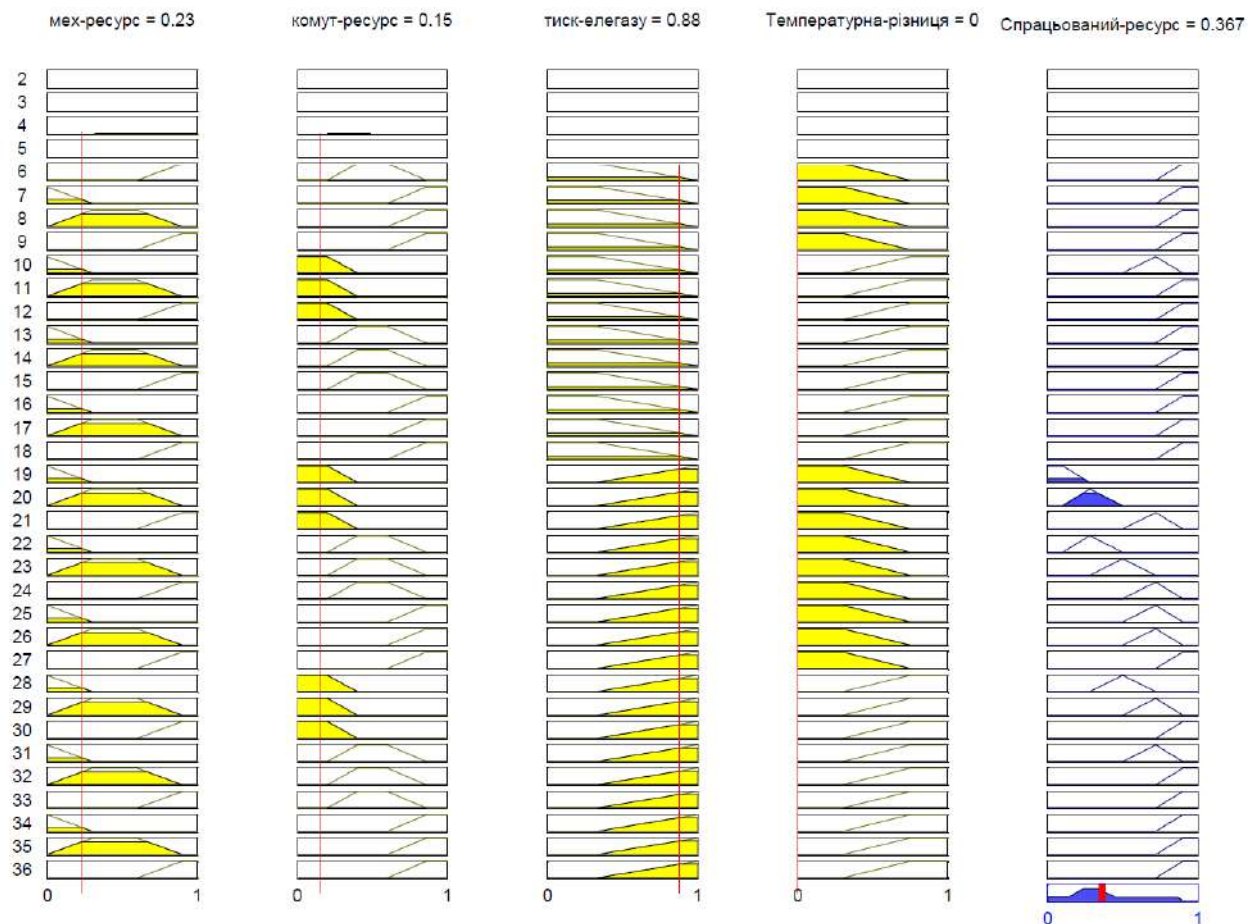


Рисунок 6.8 – Загальний спрацьований ресурс високовольтного вимикача типу 3AP2 FI SIEMENS комірки Л-229

На рис. 6.8 можна побачити, що загальний спрацьований ресурс високовольтного вимикача дорівнює

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i(s) \cdot S_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i(s)} = 0,367. \quad (6.18)$$

6.2.2 Загальний спрацьований ресурс трансформатора струму

Дані діагностичних параметрів, за якими виконується оцінювання ТС трансформатора струму, наведено в табл. 6.3–6.4.

Таблиця 6.3 – Значення діагностичних параметрів трансформатора струму за даними спостереження (на момент 07.12.2017 19:32:46)

Тип обладнання	Зміна модуля повної провідності, $\Delta I_{нб.}, \%$		Діелектричні втрати, $tg\delta, \%$		Ємність, $\pm\Delta C_x, \%$		Надлишкова температурна різниця, $\Delta t, ^\circ C$		Загальний спрацьований ресурс, в.о.
	На момент спостереження	Нормоване	На момент спостереження	Нормоване	На момент спостереження	Нормоване	На момент спостереження	Нормоване	
Трансформатор струму ТФКН-330	0,25	≤ 5	0,47	$\leq 0,6$	0,3	≤ 5	0,9	$\leq 2,0$	Розраховано MATLAB Fuzzy Logic 0,294

Згідно з вимірними і нормативними значеннями переведемо вимірні показники з іменованих у відносні одиниці:

- значення струму небалансу $I_{нб.} = 0,05$ в.о.;
- значення тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta_{isol} = 0,58$ в.о.;
- відхилення ємності $\pm\Delta C_x = 0,06$ в.о.;
- надлишкова температурна різниця $\Delta t_{ел.} = 0,45$ в.о.

Таблиця 6.4 – Значення діагностичних параметрів трансформатора струму за даними спостереження (на момент 10.12.2017 10:08:42)

Тип обладнання	Зміна модуля повної провідності, $\Delta I_{нб.}, \%$		Діелектричні втрати, $tg\delta, \%$		Ємність, $\pm\Delta C_x, \%$		Надлишкова температурна різниця, $\Delta t, ^\circ C$		Загальний спрацьований ресурс, в.о.
	На момент спостереження	Нормоване	На момент спостереження	Нормоване	На момент спостереження	Нормоване	На момент спостереження	Нормоване	
Трансформатор струму ТФКН-330	7,5	≤ 5	0,49	$\leq 0,6$	7,8	≤ 5	0,9	$\leq 2,0$	Розраховано MATLAB Fuzzy Logic 0,895

Відповідно до вимірних і нормативних значень переведемо вимірні

показники з іменованих у відносні одиниці:

- значення струму небалансу $I_{нб.} = 1,0$ в.о.;
- значення тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta_{isol} = 0,61$ в.о.;
- відхилення ємності $\pm\Delta C_x = 1,0$ в.о.;
- надлишкова температурна різниця $\Delta t_{ел.} = 0,45$ в.о.

На рис. 6.9–6.11 подано скриншоти даних, отриманих системою безперервного контролю «SAFE-T», основних діагностичних параметрів за якими виконується оцінювання ТС трансформатора струму ТФКН-330.

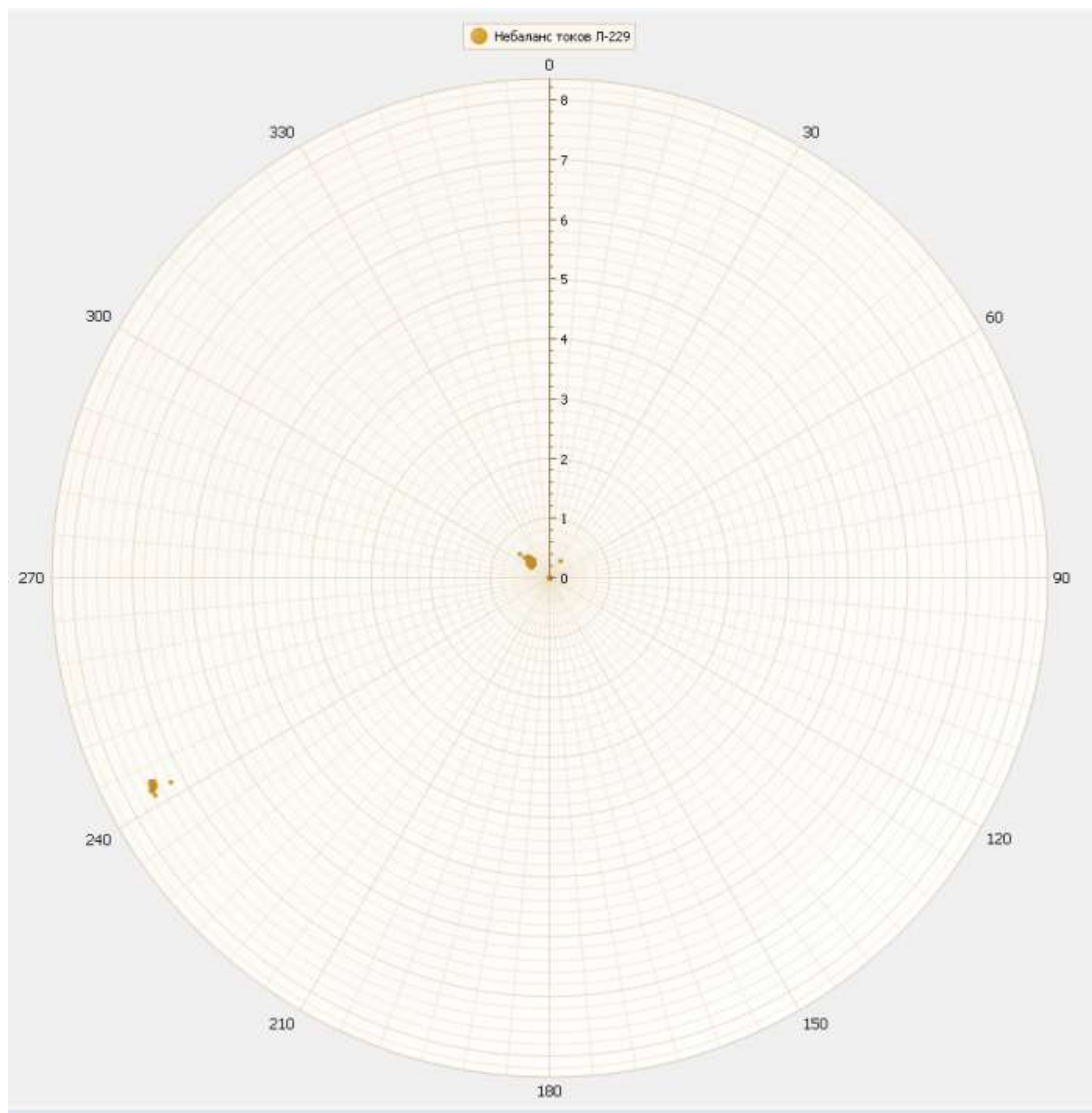


Рисунок 6.9 – Кругова діаграма небалансу струмів витоку трифазної трансформаторної групи



Рисунок 6.10 – Значення тангенса кута діелектричних втрат, приведеного до 20⁰С

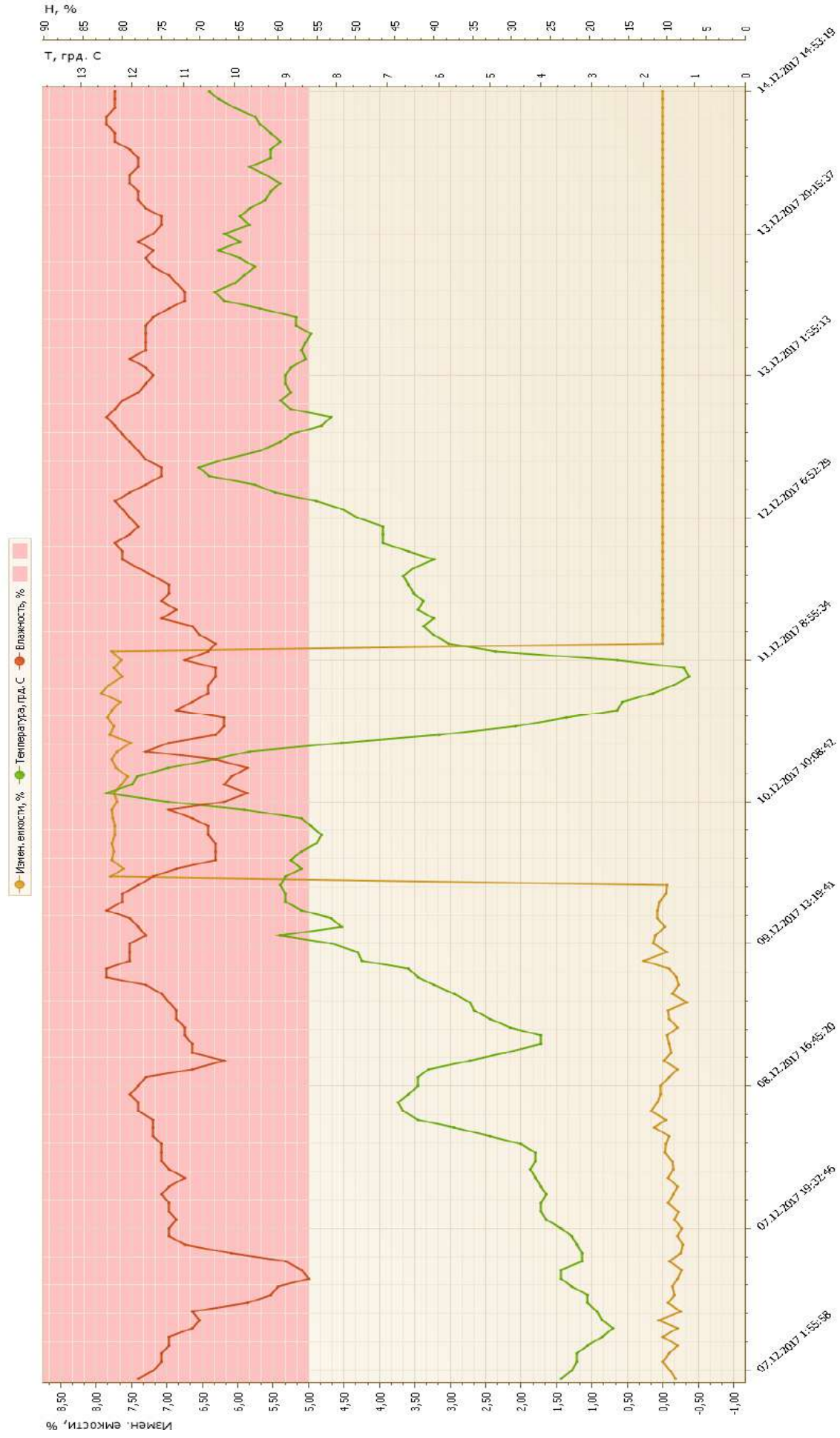


Рисунок 6.11 – Зміна ємності ізоляції трансформатора струму

Оцінювання загального спрацьованого ресурсу виконується за допомогою пакета MATLAB Fuzzy Logic Toolbox: результати подано на рис. 6.12–6.13.

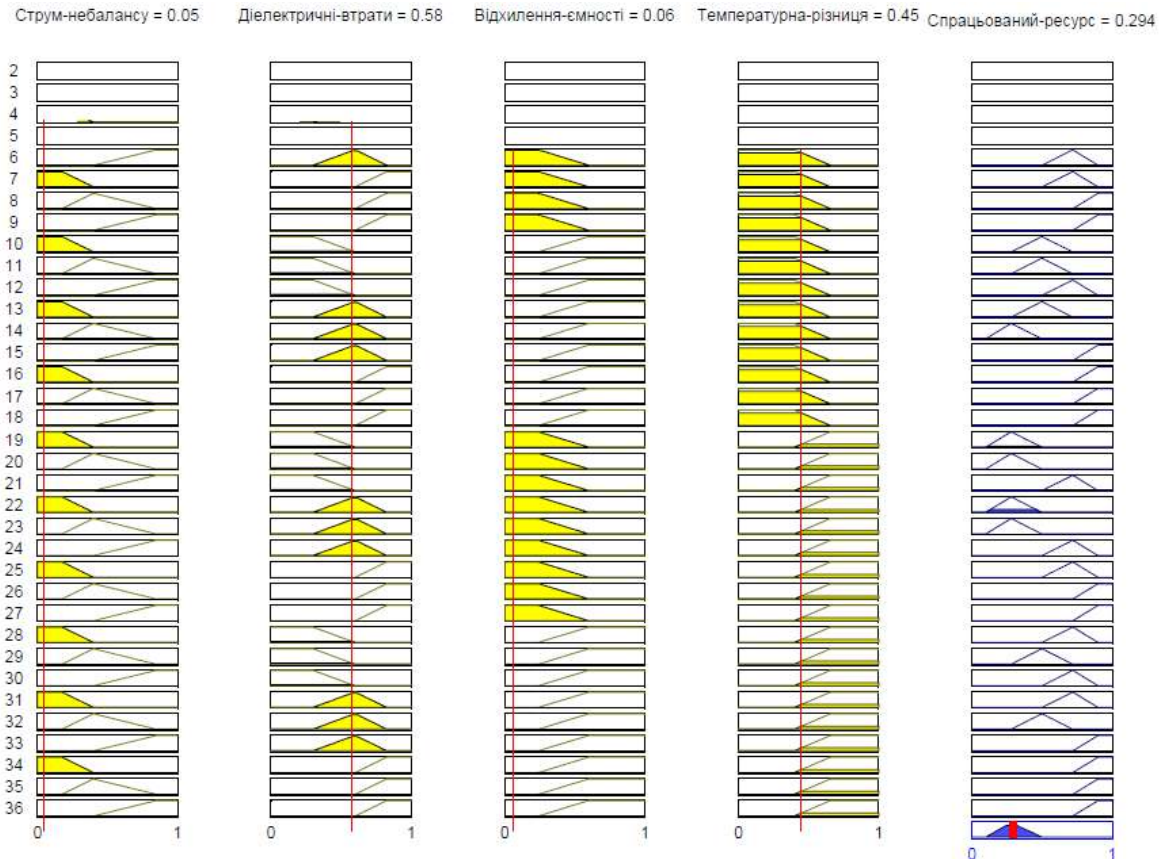


Рисунок 6.12 – Загальний спрацьований ресурс трансформатора струму типа ТФКН-330 комірки Л-229

На рис. 6.12 можна побачити, що на момент часу (07.12.2017 19:32:46), відповідно до даних спостереження системою безперервного контролю «SAFE-T» (рис. 6.9–6.11), загальний спрацьований ресурс дорівнював:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i(s) \cdot S_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i(s)} = 0,294 \quad . \quad (6.19)$$

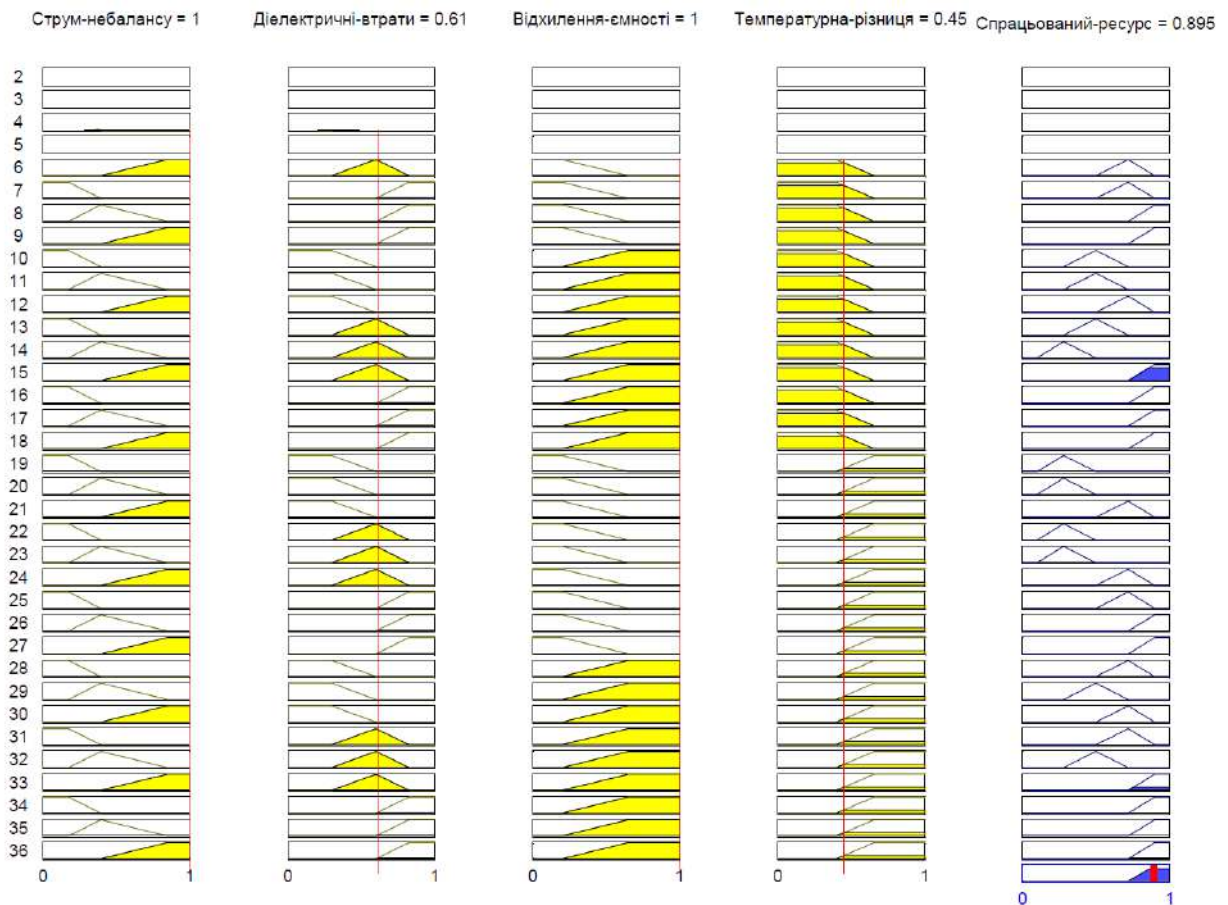


Рисунок 6.13 – Загальний спрацьований ресурс трансформатора струму типу ТФКН-330 комірки Л-229

На рис. 6.13 можна побачити, що на момент часу (10.12.2017 10:08:42) відповідно до даних спостереження системою безперервного контролю «SAFE-T» (рис. 6.9-6.11) загальний спрацьований ресурс дорівнював:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i(s) \cdot S_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i(s)} = 0,895. \quad (6.20)$$

Експериментально-модельне дослідження довело ефективність застосування нечіткої моделі оцінення ТС трансформатора струму, зафіксувавши збільшення спрацьованого ресурсу, що підтверджено аварійним виведенням з роботи комірки елегазового вимикача ЕВ Л-229 внаслідок відмови трансформатора струму ТФКН-330.

6.2.3 Загальний спрацьований ресурс високовольтних роз'єднувачів комірки

Дані діагностичних параметрів, за якими виконується оцінювання ТС високовольтних роз'єднувачів, наведено в табл. 6.5.

Таблиця 6.5 – Спрацьований ресурс вузлів роз'єднувача за даними спостереження

Тип обладнання	Кількість механічних циклів ВКЛ.-ВІДКЛ.		Надлишкова температурна різниця, Δt , °C		Загальний спрацьований ресурс, в.о.
	На момент спостереження	Нормоване*	На момент спостереження	Нормоване*	
Диспетчерське найменування					Розраховано MATLAB Fuzzy Logic
Роз'єднувач РНДЗ-330 Б/3150 МУХЛІ	176	1000	0,0	≤ 30	0,193
Роз'єднувач РНДЗ-330 Б/3150 МУХЛІ	124	1000	0,0	≤ 30	0,0994

*Норми наведено відповідно до заводської інструкції та ДСТУ EN 62271-102:2016 (EN 62271-102:202 IDT) [4, 142, 143].

Відповідно до вимірних і нормативних значень переведемо вимірні показники з іменованих в відносні одиниці:

- спрацьований механічний ресурс Л-229-1 $R_{mex.} = 0,193$ в.о.
- спрацьований механічний ресурс Л-229-2 $R_{mex.} = 0,0994$ в.о.
- надлишкова температурна різниця $\Delta t_{el.} = 0,0$ в.о.

Оцінювання загального спрацьованого ресурсу виконується за допомогою пакета MATLAB Fuzzy Logic Toolbox; результати подано на рис. 6.14–6.15.

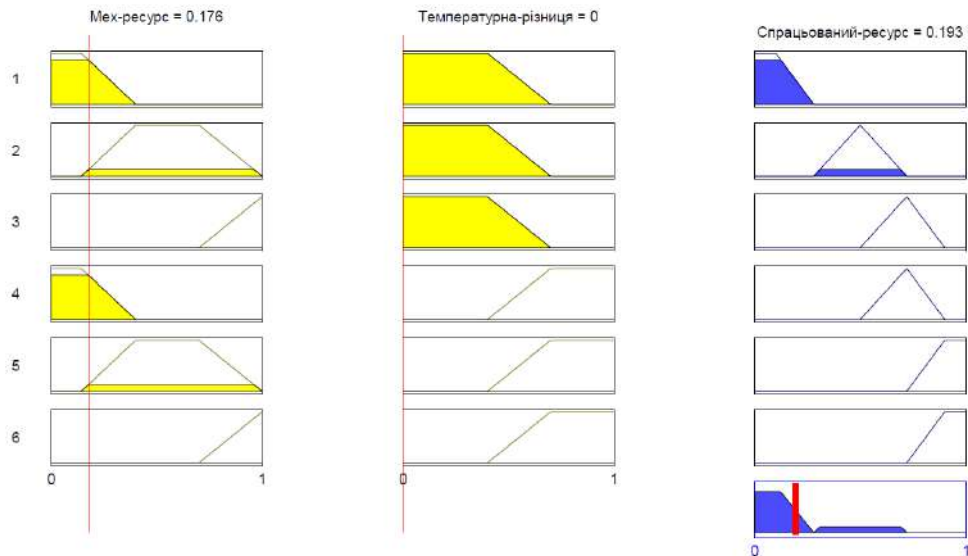


Рисунок 6.14 – Загальний спрацьований ресурс роз'єднувача Л-229-1 типу РНДЗ-330 Б/3150 МУХЛІ

На рис. 6.14 можна побачити, що загальний спрацьований ресурс роз'єднувача Л-229-1 дорівнює

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i(s) \cdot S_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i(s)} = 0,193. \quad (6.21)$$

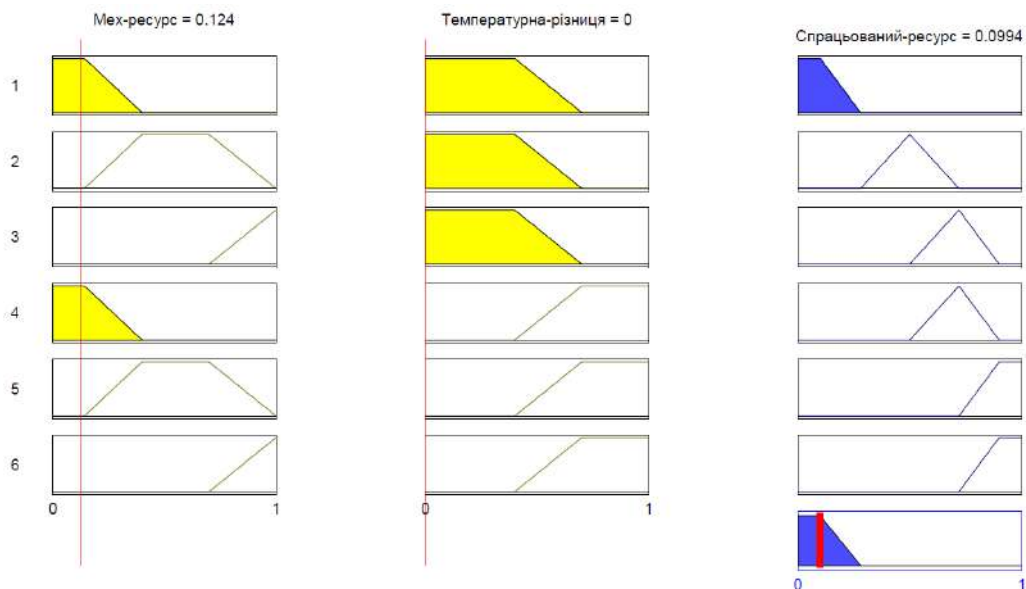


Рисунок 6.15 – Загальний спрацьований ресурс роз'єднувача Л-229-2 типу РНДЗ-330 Б/3150 МУХЛІ

На рис. 6.15 можна побачити, що загальний спрацьований ресурс роз'єднувача Л-229-2 дорівнює

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i(s) \cdot S_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i(s)} = 0,0994. \quad (6.22)$$

Ймовірність відмови високовольтного вимикача на інтервалі часу Δt визначається зі статистичної функції $F(t)$ [72 – 75] згідно з (5.23), (5.24) за даними табл. 6.6.

Таблиця 6.6 – Статистична функція розподілу ймовірності відмов високовольтного вимикача

t, рік	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F(t), в.о.	0,015	0,047	0,08	0,105	0,127	0,152	0,207	0,249	0,278	0,31
t, рік	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
F(t), в.о.	0,34	0,369	0,421	0,429	0,435	0,447	0,535	0,549	0,609	0,616
t, рік	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
F(t), в.о.	0,621	0,629	0,636	0,642	0,646	0,701	0,709	0,711	0,715	0,721

Розрахунок ймовірності відмови високовольтного вимикача на інтервалі дослідження подано у Додатку Г (Г.1).

Результати розрахунків за виразами (5.13–5.14), (5.26), за якими визначається ймовірність відмови високовольтного вимикача на інтервалі часу 1 рік, зведено до табл. 6.7.

Таблиця 6.7 – Результати розрахунків ймовірності відмови високовольтного вимикача на інтервалі 1 рік

Тип обладнання	Апріорна ймовірність події		Умовна ймовірність події		Ймовірність відмови на період прогнозу
	Ймовірність відмови	Ймовірність безвідмовної роботи	Ймовірність відмови	Ймовірність безвідмовної роботи	
	$p(H_1)$, в.о.	$p(H_2)$, в.о.	$p(B/H_1)$, в.о.	$p(B/H_2)$, в.о.	
Силовий вимикач 3AP2 FI SIEMENS	0,017	0,983	0,41	0,59	0,107

Ймовірність відмови трансформатора струму на інтервалі часу Δt визначається згідно з (5.23), (5.24) за даними функції $F(t)$ (рис. 6.16).

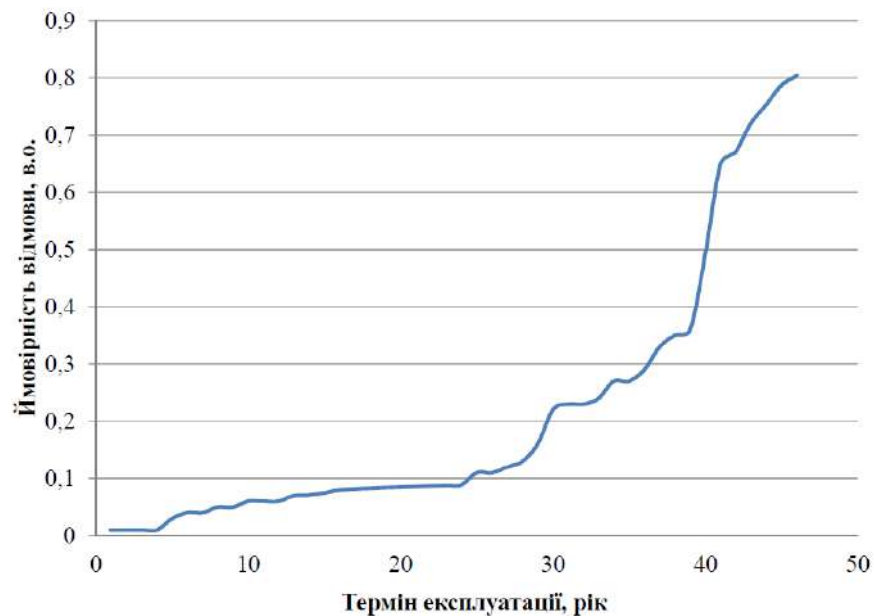


Рисунок 6.16 – Статистична функція розподілу ймовірності відмови трансформатора струму типу ТФКН-330

Розрахунок ймовірності відмови трансформатора струму на інтервалі дослідження подано у Додатку Г (Г.2).

Згідно з [149], за даними функції базової ЙБР (табл. 6.8) побудуємо матриці причинно-наслідкових відношень. Побудова матриць здійснюється експертом на основі оцінення функції базової ЙБР за 90-бальною шкалою Сааті [137]. Формалізація експертної оцінки виконується методом парних порівнянь Сааті [150 – 152], який враховує упередженість та суб'єктивність експерта в оцінюванні властивостей об'єкта. Деталізовану побудову матриці причинно-наслідкових відношень подано у Додатку Г.

Таблиця 6.8 – Значення функції базової ЙБР

Термін експлуатації, рік	0	4.09091	8.18182	12.27273	16.36364	20.45455	24.54545	28.63636	32.72727	36.81818	40.90909	45
--------------------------	---	---------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----

Продовження таблиці 6.8

ЙБР	1	0.995137	0.987683	0.987683	0.959	0.932922	0.89409	0.837351	0.756831	0.509179	0.509179	0.351438
-----	---	----------	----------	----------	-------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------

Гістограму функції базової ЙБР для групи досліджуваних трансформаторів зображено на рис. 6.17.

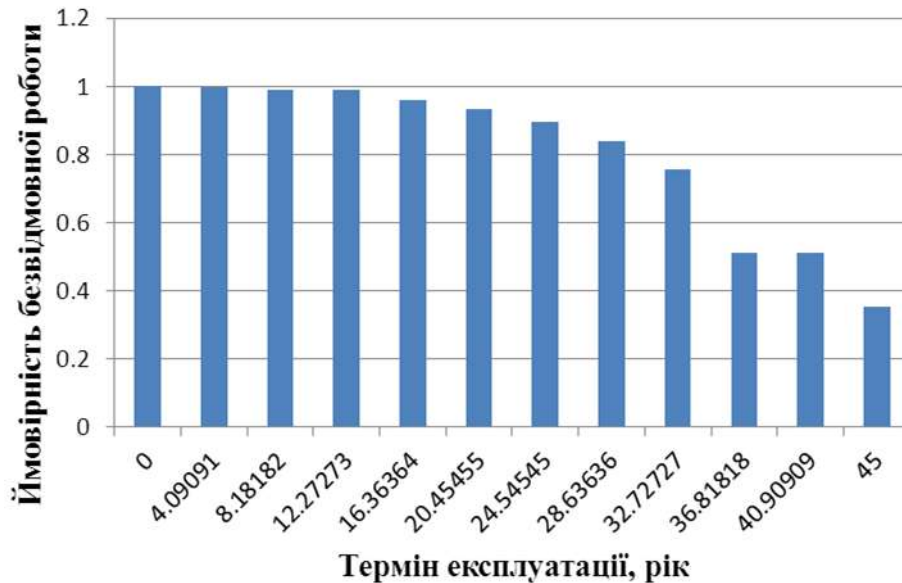


Рисунок 6.17 – Функція базової ЙБР для досліджуваної групи ТФКН

Результати розрахунків за виразами (5.13–5.14), (5.26), за якими визначається ймовірність відмови трансформатора струму на інтервалі часу 1 рік, зведено до таблиці 6.9.

Таблиця 6.9 – Результати розрахунків ймовірності відмови трансформатора струму на інтервалі 1 рік

Тип обладнання	Апріорна ймовірність події		Умовна ймовірність події		Ймовірність відмови на період прогнозу $p(H_1/B)$, в.о.
	Ймовірність відмови	Ймовірність безвідмовної роботи	Ймовірність відмови	Ймовірність безвідмовної роботи	
	$p(H_1)$, в.о.	$p(H_2)$, в.о.	$p(B/H_1)$, в.о.	$p(B/H_2)$, в.о.	
Трансформатор струму ТФКН - 330	0,31	0,69	0,844	0,162	0,921

Ймовірність відмови роз'єднувача на інтервалі часу Δt визначається із функції $F(t)$ [72 – 75] згідно з (5.23), (5.24) за даними таблиці 6.10.

Таблиця 6.10 – Статистична функція розподілу ймовірності відмов роз'єднувача

t, рік	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F(t), в.о.	0,016	0,034	0,073	0,091	0,098	0,102	0,11	0,18	0,21	0,281
t, рік	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
F(t), в.о.	0,303	0,355	0,36	0,382	0,394	0,404	0,417	0,43	0,444	0,489
t, рік	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
F(t), в.о.	0,503	0,534	0,572	0,59	0,623	0,68	0,695	0,711	0,726	0,744

Розрахунок ймовірності відмови роз'єднувачів на інтервалі дослідження подано у Додатку Г (Г.3).

Результати розрахунків за виразами (5.13–5.14), (5.26), за якими визначається ймовірність відмови роз'єднувачів на інтервалі часу 1 рік, зведено до таблиці 6.11.

Таблиця 6.11 – Результати розрахунків ймовірності відмови роз'єднувачів на інтервалі 1 рік

Тип обладнання	Апріорна ймовірність події		Умовна ймовірність події		Ймовірність відмови на період прогнозу
	Ймовірність відмови	Ймовірність безвідмовної роботи	Ймовірність відмови	Ймовірність безвідмовної роботи	
	$p(H_1)$, в.о.	$p(H_2)$, в.о.	$p(B/H_1)$, в.о.	$p(B/H_2)$, в.о.	
Роз'єднувач Л-229-1 РНДЗ-330 Б/3150 МУХЛІ	0,011	0,989	0,324	0,689	0,005
Роз'єднувач Л-229-2 РНДЗ-330 Б/3150 МУХЛІ	0,011	0,989	0,298	0,691	0,0048

Визначимо ймовірність відмови комірки високовольтного вимикача на інтервалі часу 1 рік з урахуванням ресурсу кожної одиниці обладнання, яке входить до складу комірки, тобто $n=4$. Згідно з (6.14) визначаємо

$$\begin{aligned}
Q\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) &= Q(A_1) + Q(A_2) + Q(A_3) + Q(A_4) - Q(A_1) \cdot Q(A_2) - Q(A_2) \cdot Q(A_3) - \dots \\
&\dots - Q(A_3) \cdot Q(A_4) - Q(A_1) \cdot Q(A_4) + Q(A_1) \cdot Q(A_2) \cdot Q(A_3) + Q(A_2) \cdot Q(A_3) \cdot Q(A_4) + \dots, \quad (6.23) \\
&\dots + Q(A_3) \cdot Q(A_4) \cdot Q(A_1) - Q(A_1) \cdot Q(A_2) \cdot Q(A_3) \cdot Q(A_4)
\end{aligned}$$

де $Q(A_1)$ – ймовірність відмови високовольтного вимикача на інтервалі 1 рік ($(p(H_1/B))_{\text{вим.}}=0,107$);

$Q(A_2)$ – ймовірність відмови трансформатора струму на інтервалі 1 рік ($(p(H_1/B))_{\text{ТРС.}}=0,92$);

$Q(A_3), Q(A_4)$ – ймовірності відмов роз'єднувачів комірки на інтервалі 1 рік ($(p(H_1/B))_{\text{роз. Л-229-1}}=0,005$), ($(p(H_1/B))_{\text{роз. Л-229-2}}=0,004$).

$$Q\left(\sum_{i=1}^4 A_i\right) = 0,934. \quad (6.24)$$

Результати розрахунків із визначення ймовірності відмови комірки високовольтного вимикача РПВН на інтервалі 1 рік зведено до таблиці 6.12.

Таблиця 6.12 – Ймовірність відмови комірки високовольтного вимикача

Силовий вимикач ЗАР2 FI SIEMENS	Трансформатор струму ТФКН - 330	Роз'єднувач Л-229-1 РНДЗ-330 Б/3150 МУХЛ1	Роз'єднувач Л-229-2 РНДЗ-330 Б/3150 МУХЛ1	Ймовірність відмови комірки Л-229 РПВН
0,107	0,921	0,005	0,0048	0,934

Можна зробити висновок, що висока ймовірність відмови комірки обумовлена аварійним станом трансформатора струму, який входить до складу комірки. Аналізуючи дані, наведені в табл. 6.12, можна зробити висновок, що прогнозування ймовірності відмови комірки в цілому дає більш точний прогноз, ніж прогнозування за окремою одиницею обладнання, яке входить до складу комірки. Також цей метод спрощує розрахунки із визначення ризиків порушення роботи РПВН через зменшення елементів схеми мережі.

6.3 Порівняльний аналіз методів оцінення спрацьованого ресурсу

Оцінювання спрацьованого ресурсу виконаємо за методикою [153, 154] на основі вимірювання визначального ресурсного параметра. Суть методу полягає в оцінюванні реального ТС, коли відсутні відмови, але можуть бути виміряні в процесі експлуатації (випробувань) значення ресурсного (визначального) параметра, досягнення яким свого граничного значення призводить до відмови.

Як теоретичну модель відмов механічного і тепломеханічного устаткування беруть функцію дифузійного монотонного розподілу (DM-розподілу), а в як теоретичну модель відмов електронного і електротехнічного устаткування беруть функцію дифузійного немонотонного розподілу (DN-розподілу). Тому теоретична база цієї моделі не передбачає поєднання діагностичних параметрів, різних за своєю природою походження.

Визначимо ряд припущень за цим методом:

- є можливість для періодичного вимірювання визначального параметра $\varphi(t)$;
- відомим є граничне значення визначального параметра $\varphi(t)=\Pi$;
- інтервал кореляції Δt визначають заздалегідь (відповідно до вимог нормативної документації).

За даними вимірювань обчислюють середню швидкість зміни визначального параметра.

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n [\varphi(t_{i+1}) - \varphi(t_i)] \quad (6.25)$$

де a – середня швидкість зміни визначального параметра;

Δt – інтервал кореляції;

n – кількість вимірів визначального параметра;

$\varphi(t_i)$ – значення визначального параметра.

Обчислюють коефіцієнти варіації приростів (швидкість зміни визначального параметра).

$$v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta\varphi_i - \overline{\Delta\varphi})^2}{\overline{\Delta\varphi}}}, \quad (6.26)$$

де v – коефіцієнт варіації;

$\Delta\varphi_i$ – зміна визначального параметра між сусідніми вимірами;

$\overline{\Delta\varphi}$ – зміна визначального параметра за весь період спостереження.

Оцінення середнього залишкового ресурсу.

$$\overline{\pi(\tau)} = \frac{(\Pi - \Pi_1)}{a} \cdot \left(1 + \frac{v^2}{2}\right) \quad (6.27)$$

де $\overline{\pi(\tau)}$ – середній залишковий ресурс;

Π – граничне значення визначального параметра;

Π_1 – значення визначального параметра, виміряне перед відмовою.

Значення залишкового ресурсу.

$$T_{\text{зал.}} = \frac{\overline{\pi(\tau)}}{T_1} \quad (6.28)$$

де T_1 – середнє напрацювання до першої відмови.

Визначимо, для порівняння, залишковий ресурс розрядника (РВМК – 750М) і трансформатора струму (ТФКН - 330) з дифузійним немонотонним розподілом (DN-розподіл) функції залишкового ресурсу. Параметри обумовлено нормативною документацією [4, 5], як визначальний параметр вибрано для розрядника струм провідності (I_{np}), для трансформатора струму – відхилення ємності ($\pm\Delta C_x$). Дані для розрахунків визначального параметра зведено до табл. 6.13 і табл. 6.15.

Таблиця 6.13 – Результати вимірів діагностичних параметрів розрядника РВМК – 750М

Інтервал кореляції, рік	Кількість комутацій граничних імпульсних струмів, N_k , од.	Струм провідності, I_{np} , мкА	Надлишкова температурна різниця, Δt , °С
3	2	260	0
6	3	274	0
9	3	275	0
12	7	283	0
15	10	290	0,5
18	12	310	1,2
21	12	326	12,6

Розрахункові дані для визначення спрацьованого ресурсу розрядника РВМК – 750М, за методикою [153, 154], зведено до таблиці 6.14.

Таблиця 6.14 – Результати розрахунків із визначення спрацьованого ресурсу розрядника РВМК – 750М

Інтервал кореляції, рік	Кількість вимірів, од.	Середня швидкість зміни визначального параметра, мкА/рік	Коефіцієнт варіації	Граничне значення визначального параметра, мкА	Значення визначального параметра, виміряне перед відмовою, мкА	Середній залишковий ресурс, рік	Значення залишкового ресурсу, в.о.	Спрацьований ресурс, в.о.
3	7	3,143	3,39	330	326	8,56	0,31	0,69

Таблиця 6.15 – Результати вимірів діагностичних параметрів трансформатора струму ТФКН – 330

Інтервал кореляції, рік	Зміна модуля повної провідності, $\Delta I_{нб}$, %	Діелектричні втрати, $\text{tg}\delta$, %	Ємність, $\pm\Delta C_x$, %	Надлишкова температурна різниця, Δt , °С
3	-	0,242	2,3	-
6	-	0,261	1,8	-
9	-	0,284	2,6	-
12	-	0,316	3,3	-
15	-	0,303	3,0	-
18	-	0,346	2,4	-
21	-	0,382	2,7	0,4
24	-	0,431	3,6	1,1
27	1,3	0,445	3,4	0,8
30	1,8	0,451	3,6	0,6
33	2,2	0,422	3,5	0,8
36	2,8	0,476	3,9	0,8
39	3,2	0,512	4,3	0,7
41	7,5	0,491	7,8	0,9

Розрахункові дані для визначення спрацьованого ресурсу трансформатора струму ТФКН – 330, за методикою [153, 154], зведено до таблиці 6.16.

Таблиця 6.16 – Результати розрахунків із визначення спрацьованого ресурсу трансформатора струму ТФКН – 330

Інтервал кореляції, рік	Кількість вимірів, од.	Середня швидкість зміни визначального параметра, %/рік	Коефіцієнт варіації	Граничне значення визначального параметра, %	Значення визначального параметра виміряне перед відмовою, %	Середній залишковий ресурс, рік	Значення залишкового ресурсу, в.о.	Спрацьований ресурс, в.о.
3	14	1,3	6,12	5	4,3	10,613	0,258	0,742

Таблиця 6.17 – Порівняльна таблиця у разі визначення ресурсів

Тип обладнання	Значення спрацьованого ресурсу розрахованого за методикою [153, 154] S_1 , в.о.	Значення спрацьованого ресурсу розрахованого за нечіткою моделлю S_2 , в.о.	Розрахункова різниця $\Delta S = (S_2 - S_1) \times 100$, % (За умови відмови електрообладнання $S=1$)
Розрядник РВМК – 750М	0,69	0,901	+21
Трансформатор струму ТФКН – 330	0,742	0,895	+15,3

Аналізуючи результати розрахунків, внесених до таблиці 6.17, можна зробити висновок, що визначення спрацьованого ресурсу за нечіткою моделлю дало більш високу точність:

для РВМК – 750М на 21%,

для ТФКН – 330 на 15,3 %.

Це обумовлено тим, що за нечіткою моделлю можна визначати спрацьований ресурс за декількома параметрами (природа походження параметрів немає значення). За методом [153, 154] спрацьований ресурс розраховується тільки за визначальним параметром (електричним або тепло-механічним), яким може бути будь-який діагностичний параметр.

6.4 Висновки до розділу 6

В цьому розділі отримано такі науково-практичні результати:

1. Розраховано експертно-статистичним методом ймовірність відмови, на інтервалі 1 рік, розрядника РВМК – 750М одного з енергетичних об'єктів ЕЕС за визначеним ТС апарата. ТС розрядника розраховано за побудованою нечіткою математичною моделлю за діагностичними параметрами, визначеними нормативною та заводською документацією. Високий спрацьований ресурс (90,1%) підтвердився результатами обстеження, за виведення обладнання для ТО протягом прогнозованого періоду.

2. Розраховано експертно-статистичним методом ймовірність відмови, на інтервалі 1 рік, комірки елегазового вимикача одного з енергетичних об'єктів ЕЕС. Розрахунок проводився за даними ТС всіх апаратів, які входять до складу комірки елегазового вимикача, і визначався за побудованими нечіткими моделями за діагностичними параметрами, визначеними нормативною та заводською документацією. Похибка розрахунку становила 6,6% – відмова комірки відбулась в прогнозований період.

3. Порівняльний аналіз методів розрахунку спрацьованого ресурсу показав більш високу точність застосування нечітких моделей (на 15–20%), за рахунок оцінення технічного стану електрообладнання РПВН за декількома параметрами (незалежно від своєї природи походження), які впливають на залишковий ресурс.

РОЗДІЛ 7

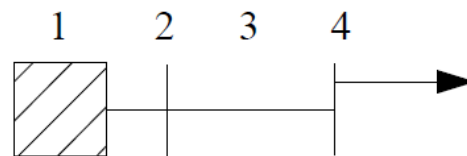
РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ РИЗИКІВ ПОРУШЕННЯ РОБОТИ РПВН

7.1 Постановка задачі

Оцінення ризиків порушення роботи розподільчих пристроїв має важливе значення, оскільки від надійної роботи розподільчих установок залежить рівень надійності живлення електроспоживачів. Останнім часом, з появою у споживачів нових електроприймачів з підвищеними вимогами до надійності та якості електроенергії, виникла необхідність удосконалення та розвитку методів розрахунку надійності розподільчих електричних мереж [155, 156]. Інший бік проблеми полягає в зручній формалізації задачі під час розрахунків надійності складної розподільчої мережі, яка б враховувала всі фактори впливу на надійність роботи розподільчої електроустановки. Складна структура та велика кількість елементів електроенергетичних систем ускладнює аналіз надійної експлуатації систем електропостачання. Існуючі методи, які використовують для розрахунку надійності розподільчих електроустановок, ефективні у разі вирішення тієї чи іншої конкретної задачі [157 – 160]. Більшість методів аналізу надійності електричних мереж присвячено частковим випадкам, які не підходять до розподільчих установок [161 – 165]. Під час оцінювання якості роботи розподільчого пристрою важливим моментом стає моделювання всіх процесів, які можуть відбутися в досліджуваній електроустановці, та можливі наслідки цих процесів. Тому можна зробити висновок, що існуючі методи визначення ризику порушення роботи РПВН не дозволяють коректно оцінити надійність роботи таких електроустановок, а розроблення нових методів оцінення надійності електроустановок є досить актуальною задачею.

7.2 Матрично-топологічний метод визначення ризиків порушення роботи електричної мережі

Для вирішення задачі оцінення поточного стану електричної мережі, до складу яких входять розподільчі установки високої напруги, взято відображення мережі у вигляді матриці [16, 20]. Метод, розроблений Р. Біллінтоном та Н. Аланом, полягає в переході від структури мережі до матриці. Цей перехід спрощує математичне моделювання розподільчих пристроїв будь-якої конфігурації, від простих до складнозамкнених (тупикових або транзитних). На рис. 7.1 зображено перехід структури мережі до матриці, яка характеризує топологію цієї мережі.



(7.1)

$$C = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Рисунок 7.1 – Перехід від структури мережі до топологічної матриці:

1, 2, 3, 4 – елементи електричної мережі; C – топологічна матриця з елементами: 2 – характеризує роботоздатний стан елемента електричної мережі; 1 – означає електричний зв'язок між сусідніми елементами електроустановки; 0 – нероботоздатний стан елемента електроустановки.

В [37] запропоновано методичний підхід до дослідження та забезпечення надійної роботи розподільчих електричних мереж, особливості якої такі:

– моделювання відмов силових елементів розподільчої електричної мережі (РЕМ);

- моделювання відмов силових елементів РЕМ з використанням правил надійності $n-1$ та $n-2$;
- врахування режимів роботи РЕМ;
- опосередкований облік відмов вимикачів та засобів захисту в показниках надійності ліній, трансформаторів, вимикачів, розподільчих пристроїв;
- визначення показників надійності елементів (частота відмов, тривалість відмов, ймовірність відмов, середня готовність);
- розрахунок умовного недовідпуску електричної енергії.

Для реалізації розрахунків пропонується створення матричної топології мережі, яка дозволить здійснити оцінення стану розподільчої мережі, зокрема:

- роботоздатність елемента мережі;
- взаємозв'язок між елементами, які входять до складу мережі;
- можливість реконфігурації мережі.

Для розрахунку станів мережі за критерієм $n - 1$, відповідно до методу [38], складається матриця відмов елементів електроустановки і таблиця поодиноких відмов (табл. 7.1), на основі якої проводиться оцінювання ризиків порушення роботи РПВН.

Таблиця 7.1 – Матриця станів елементів у разі відмови кожного (одного) елемента

	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	0	1	1	1
3	1	0	1	1
4	1	1	0	1
5	1	1	1	0

Таблиця 7.1 формується, виходячи з конфігурації мережі. В стовпцях таблиці подано інформацію про стан елемента, а рядки інформують про стан елементів згідно з конфігурацією мережі. Для схеми з 4 елементами (рис. 7.1)

за критерієм $n - 1$ можливими є 5 варіантів стану мережі. Для оцінення роботоздатності елементів в різних випадках складається топологічна матриця (табл. 7.2). Топологічна матриця формується як результат поодиноких відмов елементів відповідно до табл. 7.1, а також з врахуванням топологічного зв'язку між елементами (рис. 7.1).

Таблиця 7.2 – Топологічна матриця станів елементів у разі відмови кожного (одного) елемента

	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	0	0	0	0
3	1	0	0	0
4	1	1	0	0
5	1	1	1	0

За цією методикою визначення непошкодженої ділянки мережі, в діагональ матриці ставиться 0 – у випадку пошкодження елемента електроустановки і оцінюється роботоздатний стан інших елементів відповідно до топологічного зв'язку. Роботоздатний стан позначається як 1.

Для кожної досліджуваної електроустановки проводиться ситуаційне пояснення:

– в разі відмови енергосистеми (елемент 1), у разі одностороннього живлення електроустановки (рис. 7.1), відбудеться відмова всіх елементів електроустановки (2, 3, 4);

– за відмови системи шин (елемент 2) відбудеться відмова елементів (3, 4);

– за відмови лінії зв'язку (елемент 3) відмовить елемент (4);

– поодинока відмова розподільчих шин (4).

За такою спрощеною «тупиковою» схемою живлення, у разі відмови кожного елемента схеми, відбувається знеструмлення споживачів.

7.3 Ймовірісно-топологічний метод визначення ризиків порушення роботи РПВН

Роботоздатний стан елемента РПВН залежить від його ТС. В складно-замкнених мережах роботоздатний стан розподільчої електроустановки залежить від топології електричного зв'язку між елементами та ТС елементів більш високого рівня. Потрібно зазначити, що нероботоздатний стан – це не тільки фізичне пошкодження елемента електроустановки, але і перевищення нормованих показників ТС електроапаратів, таких як стан ізоляції, тепловий стан, механічне спрацювання рухомих вузлів, зміна стану газовмісного середовища [128].

Основні особливості побудови математичної моделі оцінення порушення роботи РПВН такі:

- визначення ТС електричних апаратів, які входять до складу розподільчої установки;
- за даними ТС визначення ймовірності відмови елемента електроустановки на прогнозованому інтервалі часу;
- перехід від структури мережі до топологічної матриці;
- визначення топологічного зв'язку між елементами РПВН;
- відповідно до топології електроустановки та стану електрообладнання визначення ризиків порушення роботи РПВН;
- згідно з ризиками порушення роботи РПВН визначення терміну відновлення нормальної роботи розподільчої електроустановки.

Ймовірність відмови елемента електроустановки на інтервалі часу визначається згідно з (5.26), тому в топологічну матрицю для мережі (рис. 7.1), замість елемента «2», який означає роботоздатний стан елемента, поставимо дані про ймовірність відмови цього елемента. Тоді топологічна матриця буде мати такий вигляд:

$$C_P = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} p(H_1/B)_i & 1 & 0 & 0 \\ 1 & p(H_1/B)_i & 1 & 0 \\ 0 & 1 & p(H_1/B)_i & 1 \\ 0 & 0 & 1 & p(H_1/B)_i \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (7.2)$$

де $p(H_1/B)_i$ – ймовірність відмови i -го елемента розподільчої електроустановки.

З топологічної матриці складемо матрицю відновлень

$$C_B = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} t_g & 1 & 0 & 0 \\ 1 & t_g & 1 & 0 \\ 0 & 1 & t_g & 1 \\ 0 & 0 & 1 & t_g \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (7.3)$$

де t_g – час відновлення елемента.

Для оцінювання роботоздатності елементів в різних випадках, з урахуванням ТС кожного елемента та його впливу на надійність роботи РПВН, складається ймовірнісно-топологічна матриця (табл. 7.3). Ймовірнісно-топологічна матриця формується відповідно до методу (п. 7.2) з урахуванням топологічного зв'язку між елементами (рис. 7.1).

Таблиця 7.3 – Ймовірнісно-топологічна матриця станів елементів у випадку відмови кожного (одного) елемента

	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	$p(H_1/B)_1$	$p(H_1/B)_1$	$p(H_1/B)_1$	$p(H_1/B)_1$
3	1	$p(H_1/B)_2$	$p(H_1/B)_2$	$p(H_1/B)_2$
4	1	1	$p(H_1/B)_3$	$p(H_1/B)_3$
5	1	1	1	$p(H_1/B)_4$

За розробленою методикою визначення ризику порушення роботи РПВН, в діагональ матриці замість «0» (відмова елемента) ставиться $p(H_1/B)_i$ (ймовірність відмови i -го елемента електроустановки) і оцінюється

ймовірність роботоздатного стану інших елементів відповідно до топологічного зв'язку. Роботоздатний стан позначається як 1.

Згідно з ймовірнісно-топологічною матрицею стану елементів складається матриця часу відновлення нормальної роботи електроустановки. Замість ймовірності відмови (табл. 7.3) ставиться час відновлення кожного елемента схеми, враховуючи топологічний вплив (табл. 7.4). Час відновлення визначається за довідковою літературою [46] або нормативною [3] та виробничою документацією.

Таблиця 7.4 – Матриця часу відновлення нормальної роботи електроустановки

	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	$t_{г1}$	$t_{г1}$	$t_{г1}$	$t_{г1}$
3	1	$t_{г2}$	$t_{г2}$	$t_{г2}$
4	1	1	$t_{г3}$	$t_{г3}$
5	1	1	1	$t_{г4}$

В основу алгоритму розрахунку надійності електричної мережі покладено формування послідовності топологічних матриць, які відображають стадії роботи алгоритму. Використовуючи експертно-статистичний метод визначення ймовірності відмови електрообладнання на інтервалі часу та алгоритм послідовності формування ймовірнісно-топологічних матриць та матриць відновлень, на прикладі ВРП–750 кВ електроенергетичної системи України визначимо ризики порушення роботи РПВН.

7.4 Визначення ризиків порушення роботи РПВН на прикладі електроенергетичного об'єкта ЕЕС України

Однолінійну схему з досліджуваним обладнанням ВРП-750 кВ, однієї з понижувальних підстанцій 750 кВ ОЕС України [128], зображено на рис. 7.2. Оцінення надійності РПВН виконаємо ймовірнісно-топологічним

методом. Цим методом можна визначити ймовірність відмови елементів схеми, які мають топологічну залежність, та тривалість відновлення обладнання. Також за топологією місця відключення можна зробити висновок про втрату РПВН транзитної функції або функції живлення системи нижчої напруги. Схема містить в собі такі елементи: енергосистеми вищої та нижчої напруги, комірку автотрансформатора зв'язку між енергосистемами, секції шин, комірки вимикачів, до складу яких входять вимірювальні трансформатори та роз'єднувачі.

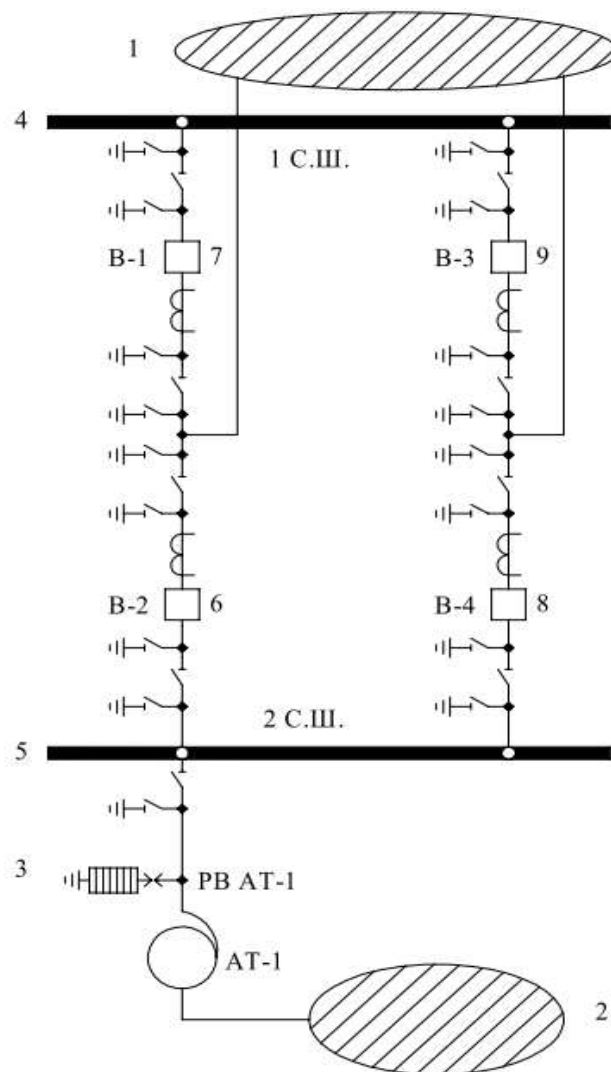


Рисунок 7.2 – Однолінійна схема РПВН: 1 – енергосистема вищої напруги; 2 – енергосистема нижчої напруги; 3 – комірка автотрансформатора; 4, 5 – системи шин РПВН; 6, 7, 8, 9 – комірки високовольтних вимикачів

Ймовірність відмови розрядника РВ АТ-1 на інтервалі часу 1 рік (п. 6.2) становить 0,751 в.о. або 75,1%. Аналогічним чином згідно з [81, 82, 103] визначено за діагностичними параметрами та нечіткими моделями ТС і ймовірність відмови на інтервалі часу комірок вимикачів В-1, В-2, В-3, В-4.

Дані розрахунків занесено в таблицю 7.5.

Таблиця 7.5 – Результати розрахунків ймовірності відмови обладнання ВРП – 750 кВ

Найменування електрообладнання РПВН	Ймовірність відмови на інтервалі часу 1 рік $p(H_i/B)$ в.о.
Комірка автотрансформатора АТ-1 розрядник РВАТ-1	0,751
Комірка елегазового вимикача В-1	0,093
Комірка елегазового вимикача В-2	0,101
Комірка елегазового вимикача В-3	0,064
Комірка елегазового вимикача В-4	0,086

За цією схемою (рис. 7.2) будується вихідна матриця [13], яка характеризує топологію розподільчої установки

$$C = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}. \quad (7.4)$$

На основі топологічної матриці для схеми з 9-ма елементами проводиться розрахунок ризиків порушення роботи розподільчої установки. В складнозамкнених мережах роботоздатний стан елемента залежить від ресурсу елементів більш високого рівня. Ризик порушення функціонування

електроустановки потребує окремого аналізу для конкретної схеми. Аналізуючи схему ВРП–750 кВ (рис. 7.2) можна зробити такі пояснення:

- відмова енергосистеми вищої напруги призведе до відмови всієї розподільчої електроустановки;
- відмова в комірці автотрансформатора призведе до зупинення перетоку потужності через відповідні коміртки вимикачів та систему збірних шин в енергосистему нижчої напруги;
- аварійна відмова коміртки вимикача призведе до відмови системи збірних шин, яку вона живить;
- відмова системи збірних шин призведе до зупинення перетоку потужності через коміртки вимикачів, які до неї приєднані.

Для розрахунку ризиків порушення роботи електроустановки за критерієм $(n-1)$ складаємо топологічну матрицю (табл. 7.6). Ця матриця характеризує робочий стан або стан відмови елементів, враховуючи аналіз та пояснення до цієї схеми.

Таблиця 7.6 – Топологічна матриця станів елементів за відмови кожного (одного) елемента

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	1	1	1	1	1	1	1
4	1	0	0	1	0	0	1	0	1
5	1	1	1	0	1	1	0	1	0
6	1	0	0	1	0	0	1	0	1
7	1	1	1	1	0	0	1	1	1
8	1	1	1	0	1	1	0	1	1
9	1	1	1	1	0	1	1	0	1
10	1	1	1	0	1	1	1	1	0

Дані про ймовірність відмови електрообладнання отримуються за методикою, запропонованою в РОЗДІЛІ 5, та за довідковими даними [46]. За

довідковими та розрахунковими даними (табл. 7.5) складемо ймовірнісно-топологічну матрицю станів елементів схеми (табл. 7.7).

Таблиця 7.7 – Ймовірнісно-топологічна матриця станів елементів за відмови кожного (одного) елемента

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1.00 E ⁻¹²	1.00 E ⁻¹²	1.00 E ⁻¹²	1.00 E ⁻¹²	1.00 E ⁻¹²	1.00 E ⁻¹²	1.00 E ⁻¹²	1.00 E ⁻¹²	1.00 E ⁻¹²
3	0	1.00 E ⁻¹²	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0,751	0,751	0	0,751	0,751	0	0,751	0
5	0	0	0	0,01	0	0	0,01	0	0,01
6	0	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0
7	0	0	0	0	0,101	0,101	0	0	0
8	0	0	0	0,093	0	0	0,093	0	0
9	0	0	0	0	0,086	0	0	0,086	0
10	0	0	0	0,064	0	0	0	0	0,064

Завершальним кроком є формування матриці часу відновлення нормальної роботи електроустановки (табл. 7.8).

Таблиця 7.8 – Матриця часу відновлення нормальної роботи електроустановки

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
3	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0
4	0	32	32	0	6	6	0	6	0
5	0	0	0	6	0	0	6	0	6
6	0	6	6	0	6	6	0	6	0
7	0	0	0	0	6	125	0	0	0
8	0	0	0	6	0	0	125	0	0
9	0	0	0	0	6	0	0	125	0
10	0	0	0	6	0	0	0	0	125

Час відновлення залежить від наслідків відмови та типу пошкодженого обладнання. Час відновлення обладнання вибирається за довідковою літературою.

Гістограми, які характеризують ризики порушення роботи РПВН на прикладі ВРП-750 кВ, зображено на рис. 7.3 – 7.4.

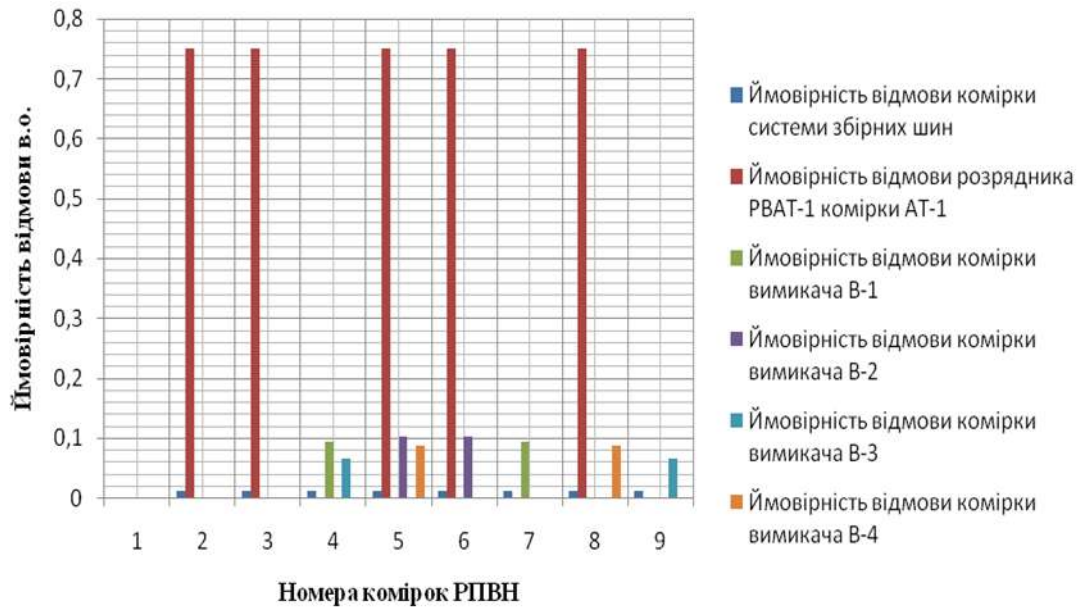


Рисунок 7.3 – Гістограма ризиків порушення роботи ВРП-750 кВ

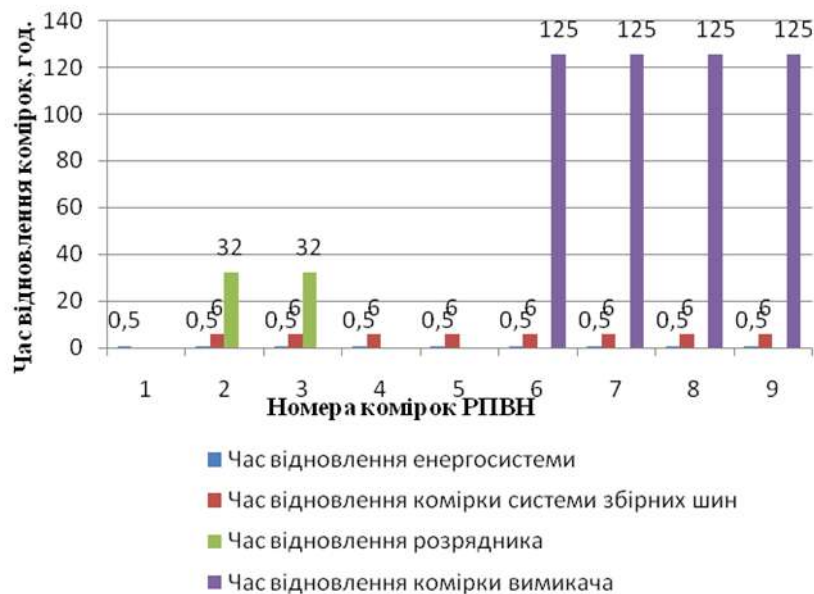


Рисунок 7.4 – Гістограма часу відновлення нормальної роботи комірок ВРП-750 кВ

Аналізуючи графіки (рис. 7.4 – 7.5) можна зробити висновок, що найбільша ймовірність пошкодження у розрядника (ймовірність 0,751 в.о.). Час відновлення електрообладнання комірки буде залежати від наслідків аварії. Якщо було супутнє пошкодження автотрансформатора, час відновлення буде становити 490 годин [46]. У випадку, якщо пошкодження зазнав лише розрядник, час відновлення становитиме 32 години. Ця відмова може призвести до втрати зв'язку з енергосистемою нижчої напруги, аварійного простою комірок системи збірних шин та комірок високовольтних вимикачів В2, В4, час відновлення яких визначається часом введення в роботу системи збірних шин. ВРП-750 кВ на час відновлення буде працювати в транзитному режимі.

За даними [8 – 14] середньостатистичне значення збитків у разі аварійного пошкодження комірки ВРП-750 кВ становить $V_p=250000$ грн, фінансові збитки за час відновлення становлять $V_w=177094$ грн та $V_T=150000$ грн.

Згідно з (1.10) визначимо ризики під час відмов комірок елегазових вимикачів

$$Z_{\Sigma EB} = \begin{bmatrix} P_{P_{B1}} & P_{W_{B1}} & P_{T_{B1}} \\ P_{P_{B2}} & P_{W_{B2}} & P_{T_{B2}} \\ P_{P_{B3}} & P_{W_{B3}} & P_{T_{B3}} \\ P_{P_{B4}} & P_{W_{B4}} & P_{T_{B4}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_p \\ V_w \\ V_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 53670 \\ 58286 \\ 36934 \\ 49630 \end{bmatrix}. \quad (7.5)$$

Відповідно до (1.10) визначимо ризик у разі відмови розрядника

$$Z_{\Sigma PB} = \begin{bmatrix} P_{P_{PB}} & P_{W_{PB}} & P_{T_{PB}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_p \\ V_w \\ V_T \end{bmatrix} = [433398]. \quad (7.6)$$

Загальний ризик порушення роботи РПВН

$$Z_{\Sigma} = Z_{\Sigma EB} + Z_{\Sigma PB} = 631918 \text{ грн.} \quad (7.7)$$

Згідно з (7.9) на прогнозований рік потрібно передбачити на усунення можливих порушень роботи РПВН у розмірі 631918 грн. Такий метод прогнозування дає можливість уникнення непередбачуваних аварійних подій за зниження витрат на поточне ТО електрообладнання розподільчих електроустановок ЕЕС. Також застосування СБК для діагностування поточного спрацьованого ресурсу електрообладнання дає можливість передчасно виявити аварійні дефекти та уникнути великих фінансових втрат на відновлення нормальної роботи РПВН.

7.5 Висновки до розділу 7

В цьому розділі отримано такі наукові та науково-практичні результати:

1. Розроблено новий ймовірнісно-топологічний метод визначення ризиків порушення роботи РПВН, який поєднує матричний метод побудови топології мережі з ймовірнісним методом прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання

2. Для оцінення ризику порушення роботи РПВН досліджується ймовірність відмови окремої одиниці обладнання і топологічний вплив обладнання на роботу електроустановки. Ймовірність відмови на інтервалі часу визначається експертно-статистичним методом за даними про ТС окремої одиниці обладнання. ТС відповідального обладнання визначається за побудованими нечіткими математичними моделями, за основними чинниками впливу, контрольованими СБК. Це дає можливість оцінювання ризиків порушення роботи РПВН в реальному часі на прогнозному інтервалі в 1 рік.

3. Застосування удосконаленого методу визначення ризиків порушення роботи РПВН дозволить оптимізувати розподілення фінансових активів електроенергетичних підприємств. Ймовірно-топологічний метод ґрунтується на ТС окремої одиниці обладнання, за яким вираховується спрацьований ресурс, на відміну від існуючих, які базуються на узагальнених ймовірнісних показниках електрообладнання.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичне завдання із підвищення ефективності визначення ризиків порушення роботи РПВН за певним ТС та топологічним впливом окремої одиниці обладнання. Під час вирішення задачі використано засоби нечіткої логіки, евристичний метод, положення теорії ймовірностей та ймовірнісно-статистичні підходи. Основні наукові та практичні результати, які отримано в роботі, полягають в такому:

1. Визначено основну номенклатуру відповідального електрообладнання, від якого залежить функціонування РПВН. Визначено основні чинники впливу на ТС відповідального обладнання, які можна контролювати без виведення обладнання з роботи засобами СБК.

2. Використовуючи апарат нечіткої логіки, на базі розробленої узагальненої нечіткої моделі визначення ТС обладнання РПВН, розроблено нечіткі моделі, за певними діагностичними параметрами, такого відповідального обладнання: апарата захисту від перенапруг, елегазового вимикача, трансформатора струму, роз'єднувача. Обробка і параметризація чинників впливу виконувались евристичним методом.

3. Запропоновано експертно-статистичний метод прогнозування ймовірності відмови електрообладнання. На основі цього методу розроблено моделі прогнозування ресурсу на певному інтервалі часу відповідального обладнання для прогнозування ризику порушення роботи РПВН.

4. Застосовано метод модифікації, за даними СБК про поточний ТС контрольованого електрообладнання, статистичної функції розподілу ймовірності відмови відповідального обладнання РПВН з метою уточнення ризику порушення роботи електроустановки.

5. Обґрунтовано підхід до визначення ймовірності відмови комірки в цілому, а не за окремим обладнанням комірки. Розрахункова точність нечітких моделей визначення ТС відповідального обладнання РПВН, під час

прогнозування залишкового ресурсу, за результатами впровадження сягає 90–95%, що перевищує існуючі методи на 15–20%.

6. Вперше розроблено ймовірно-топологічний метод визначення ризику порушення роботи РПВН, який враховує ТС окремої одиниці обладнання і топологію мережі електроустановки. Розроблений метод дозволяє оптимізувати розподілення фінансових активів енергетичних підприємств. Виконано експериментальне дослідження ризику порушення роботи РПВН з прогнозом фінансового забезпечення функціонування електроенергетичного об'єкта.

7. Виконано експериментально-модельні дослідження під час прогнозування ймовірності відмови відповідального обладнання РПВН на об'єктах ЕЕС, які довели адекватність розроблених методів і моделей, за рахунок підвищення точності прогнозу залишкового ресурсу. Для дослідження використано дані, отримані з періодичних випробувань електрообладнання та діагностичні дані, отримані з СБК ТОВ «Енергоавтоматизація». Похибка на прогнозному інтервалі в 1 рік становить 6,6%, що на 15,3% менше похибки прогнозу за визначальним діагностичним параметром, за даними періодичних випробувань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. РД. 34.20.578 – 77. Методические указания по определению устойчивости энергосистем. Часть II. : утв. Минэнерго СССР 24.03.1977. – М. : Сюзтехэнерго, 1977. – 138 с.
2. Бургучев С. А. Электрические станции, подстанции и системы. Изд. второе, перераб. и дополн. – М. : изд-во «Колос», 1966. – 688 с.
3. Идельчик В. И. Электрические системы и сети : Учебник для вузов. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
4. Техническая эксплуатация электрических станций и сетей правила: ГКД 34.20.507-2003. – Офіц. вид. – К. : ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2003. – 354 с. – (Керівний документ Мінпаливенерго України).
5. Норми випробування електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 – офіц. вид., наказ Мінпаливенерго 2007-01-15 г. № 13. – К. : ОЕП «ГРІФРЕ» : М-во палива та енергетики України, 2007. – 262 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України).
6. Техническое диагностирование электрооборудования и контактных соединений электроустановок и воздушных линий электропередачи средствами инфракрасной техники: СОУ-Н ЕЕ 20.577:2007: Затв. М-вом палива та енергетики України 15.02.2007. – К. : ГП НЭК «Укрэнерго», 2007. – 123 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України).
7. Діагностування електроустановок 0,4–750 кВ засобами інфрачервоної техніки : навч.-методичний посібник до СОУ-Н ЕЕ 20.577:2007 [Текст] / Р. Гобрей, В. Чернов, Є. Удод. – К. : «КВІЦ», 2007. – 374с.
8. РІЧНИЙ ЗВІТ. ANNUALREPORT 2010. [Електронний ресурс]: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго». – Київ, 2011 р. – 96 с. – Режим доступу: <https://ua.energy/diyalnist/zvitnist/ricni-zvity/>. (дата звернення: 05.10.2018).

9. РІЧНИЙ ЗВІТ. ANNUALREPORT 2011. [Електронний ресурс]: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго». – Київ, 2012 р. – 81 с. – Режим доступу: <https://ua.energy/diyalnist/zvitnist/richnizvity/>. (дата звернення: 05.10.2018).
10. РІЧНИЙ ЗВІТ. ANNUALREPORT 2012. [Електронний ресурс]: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго». – Київ, 2013 р. – 114 с. – Режим доступу: <https://ua.energy/diyalnist/zvitnist/richnizvity/>. (дата звернення: 05.10.2018).
11. РІЧНИЙ ЗВІТ. ANNUALREPORT 2013. [Електронний ресурс]: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго». – Київ, 2014 р. – 115 с. – Режим доступу: <https://ua.energy/diyalnist/zvitnist/richnizvity/>. (дата звернення: 05.10.2018).
12. РІЧНИЙ ЗВІТ. ANNUALREPORT 2014. [Електронний ресурс]: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго». – Київ, 2015 р. – 107 с. – Режим доступу: <https://ua.energy/diyalnist/zvitnist/richnizvity/>. (дата звернення: 05.10.2018).
13. РІЧНИЙ ЗВІТ. ANNUALREPORT 2015. [Електронний ресурс]: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго». – Київ, 2016 р. – 105 с. – Режим доступу: <https://ua.energy/diyalnist/zvitnist/richnizvity/>. (дата звернення: 05.10.2018).
14. РІЧНИЙ ЗВІТ. ANNUALREPORT 2016. [Електронний ресурс]: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго». – Київ, 2017 р. – 103 с. – Режим доступу: <https://ua.energy/diyalnist/zvitnist/richnizvity/>. (дата звернення: 05.10.2018).

15. Kwok S., «Reliability Evaluation of Distribution Systems», A dissertation submitted to the Victoria University of Manchester for the degree of Master of Science, November 1988.
16. Billinton R., «Historic Performance-Based Distribution System Risk Assessment», IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, pp. 1759–1765, October 2004.
17. Janjic A. D. and Popovic D. S., «Selective Maintenance Schedule of Distribution Network Based on Risk Management Approach», IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, pp. 597–604, May 2007.
18. Bertling L., «Reliability-Centered Maintenance for Electric Power Distribution Systems», Doctoral thesis, Royal Institute of Technology (KTH), School of Electrical Engineering, ISBN 91-7283-345-9, Stockholm 2002.
19. Billinton R. and A. Sankarakrishnan, Adequacy Assessment of Composite Power Systems with HVDC Links Using Monte Carlo Simulations, IEEE Transaction Power System, Vol. 9, Issue 3, Aug. 1994.
20. Billinton R. and Allan R., Reliability Evaluation of Power Systems, New York, US (2nd Edition, Plenum) 1996.
21. Wallnerström C. J. On Risk Management of Electrical Distribution Systems and the Impact of Regulation. Licentiate Thesis in Electrical Systems. Royal Institute of Technology, Stockholm, TRITA-EE 2008:023, ISSN 1653-5146, ISBN 978-91-7178-954-9, EE, KTH, Sweden. 2008.
22. Wallnerström C. J., Bertling L. Risk Management Applied to Electrical Distribution Systems. 20th International Conference on Electricity Distribution, Prague, 8-11 June 2009.
23. D. E. Nordgård, K. Sand, I. Wangensteen. Risk assessment methods applied to electricity distribution system asset management. SINTEF Energy Research and Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.

24. Shmuel S. Oren. Risk Management vs. Risk Avoidance in Power Systems Planning and Operation. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. 24-28 June 2007. Tampa, FL, USA. doi:10.1109/PES.2007.385877.
25. Yu Shiwen et al.. Review on Risk Assessment of Power System. Procedia Computer Science 109C (2017), pp. 1200–1205.
26. Wenyuan Li. Risk Assessment of Power Systems: Models, Methods, and Applications. Wiley-IEEE Press (2014), P.560. doi: 10.1002/9781118849972.
27. E. Handschin, I. Jurgens, C. Neumann. Long term optimization for risk-oriented asset management. 16th Power Systems Computation Conference. 2008, Glasgow.
28. Zicker U. Asset Management in distribution systems considering new knowledge on component reliability and damage costs / U. Zickler, A. Machkin, M. Schwan // 15th Power Systems Computation Conference. – Liege, 2005.
29. Zicker U. Statistical approach for component state evaluation implemented in asset management of distribution systems / U. Zickler, A. Schnettler, X. Zhang // 19th International Conference of Electricity Distribution. – Vienna, 2007.
30. Rubanenko, O. E., Kazmiruk, O. I., Zyska, T., Gromaszek, K., Junisbekov, M. Study of the impact of the technical state of the transformers with the LTC on the parameters of the EES modes optimal control. Recent Advances in Information Technology. – 2017. – pp. 173-191.
31. Сиченко, В. Г. Оцінка ефективності автоматизованої системи моніторингу технічного стану обладнання тягових підстанцій / В. Г. Сиченко, Д. В. Міронов // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика : зб. наук. пр. – Харків, 2017. – № 27 (1249). – С. 440–444.
32. Костерев М. В., Літвінов В. В. Оцінювання рівня припустимого ризику виникнення аварійної ситуації в електроенергетичній системі за

- допомогою нечітких моделей. Електротехніка та електроенергетика. – 2019. – № 2. – С. 43-50. **doi: 10.15588/1607-6761-2019-2-4.**
33. Бардик Є. І. Моделювання та оцінка ризику відмов електрообладнання електроенергетичних систем з урахуванням рівня відновлення ресурсу після ремонту // Науковий вісник НГУ. – 2014. – № 3. – С. 82–90.
34. M. Kosterev, V. Litvinov. Priority events determination for the risk-oriented management of electric power system. «EUREKA: Physics and Engineering». – 2018. – № 3. – P. 21–32. **doi: 10.21303/2461–4262.2018.00643.**
35. Kosterev M. V., Bardyk E. I., Litvinov V. V. Risk Estimation of Induction Motor Fault in Power System // WSEAS Transactions on Power Systems, Issue 4, Volume 8, October 2013. – P. 217–226.
36. Костерев М. В. Оцінка ризику порушення стійкості синхронного двигуна при відмові вимикача в схемі електропостачання / М. В. Костерев, В. В. Літвінов, О. К. Ярощук // Зб. доп. міжнар. наук. – техн. конф. «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – К., 2010. – С. 152–154.
37. Шушпанов И. Н. Разработка методов оценки надежности распределительной электрической сети и выбора мероприятий по ее повышению: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.02 – Иркутск, 2013. – 25 с.
38. Шушпанов И. Н., Суслов К. В., Воропай Н. И. Математическая модель и топологический метод расчета надежности распределительной электрической сети // Весник ИрГТУ, 2012. – № 6(65). – С. 137–141.
39. Шушпанов И. Н., Воропай Н. И. Разработка и исследование метода расчета надежности радиальной распределительной сети // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – СПб. : ПЭИПК, 2010. – Вып. 60. – С 95–105.
40. Billinton R., Allan N. Reliability evaluation of engineering systems. Concept and techniques. New York: Plenum Publ. Corp, 1992. – 312 p.

41. INTERNATIONAL STANDARD, «System and software engineering – Life cycle processes – Risk management», ISO/IEC 16085:2006(E), IEEE Std 16085-2006, Second edition 2006–12–15.
42. Костюков А. Ф., Черкасова Н. И., Никольский О. К. Основы вероятностного анализа риска электроустановок с учетом фактора неопределенности // Технологии и средства механизации сельского хозяйства. – 2014. – № 3 (113). – С. 102–106.
43. Рассказчиков А. В., Шульпин А. А., Шомов П. А. Кулагин С. М., Гоголюк В. В., Житомирский Б. Л. Определение риска возникновения ущерба при отказе электрооборудования подстанций // Вестник ИГЭУ. – Вып. № 1. – 2013. – С. 1–6.
44. Никольский О. К., Черкасова Н. И. Алгоритм управления сельских электрических сетей. Технологии и средства механизации сельского хозяйства // Вестник алтайского государственного аграрного университета. – № 7 (105). – 2013. – С. 86–90.
45. Черкасова Н. И., Костюков А. Ф., Никольский О. К. Проблема неопределенности при анализе рисков электроустановок // Ползуновский вестник. – № 4. – Т. 1. – 2014. – С. 140–146.
46. Гук Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике. – Ленинград. : Энергоатомиздат, 1990. – 206 с.
47. Назарычев А. Н. Модели расчета эксплуатационной надежности и управления техническим состоянием электрооборудования / А. Н. Назарычев, А. И. Таджикибаев. – СПб. : ПЭИПК, 2002. – 39 с.
48. Назарычев А. Н. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования / А. Н. Назарычев, Д. А. Андреев. – Иваново : ИГЭУ, 2005. – 224 с.
49. Li Z. Failure event prediction using the Cox proportional hazard model driven by frequent failure signatures / Zhiguo Li, Shiyu Zhou, Suresh Choubey, Crispian Sievenpiper // IEE Transactions. – 2007. – № 39. – С. 303 – 315.

50. Hong Y. Prediction of remaining life of power transformers based on left truncated and right censored lifetime data / Y. Hong, W. Q. Meeker, J. D. Mc Calley // *Annals of Applied Statistics*. – 2009. – № 2, т. 3. – С. 857–879.
51. Nordman D. Weibull Prediction Intervals for a Future Number of Failures. / Daniel J. Nordman and William Q. Meeker // *Technometrics*. – 2002. – № 1, т. 44. – С. 15–23.
52. Mirzai M. Failures Analysis and Reliability Calculation for Power Transformers / M. Mirzai, A. Gholami, F. Aminifar // *Jornal Electrical Systems*. – 2006. – № 1–2. – С. 1–12.
53. Андреев Д. А. Совершенствование методов расчета эксплуатационной надежности электрооборудования электростанций и подстанций: автореф. дис. на соиск. науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.14.02 «Электростанции и электроэнергетические системы» / Д. А. Андреев. – Иваново, 2006. – 23 с.
54. He J. Transformer real-time reliability model based on operating condition / He Jian, Cheng Lin, Sun Yuan-Zhang // *Jornal Zhejiang University – Science A*. – 2007. – № 8(3). – С. 378–383.
55. Ситников В. Ф. Вероятностно-статистический подход к оценке ресурсов электросетевого оборудования в процессе эксплуатации / В. Ф. Ситников, В. А. Скопинцев // *Электричество*. – 2007. – № 11. – С. 9–15.
56. H. L. S. Younes, R. G. Simmons. Statistical Probabilistic Model Checking with a Focus on Time-Bounded Properties. School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 15213, USA, 2006. – 50 p.
57. Бардик Є. І. Параметрична ідентифікація нечітких моделей електрообладнання енергосистем / Є. І. Бардик, М. В. Костерев, В. В. Літвінов // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2011. – № 1. – С. 78–79.

58. Костерев М. В. Оцінка ймовірності відмови електрообладнання при керуванні режимами електричної системи енергосистем / М. В. Костерев, Є. І. Бардик, В. В. Літвінов // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер.: «Електротехніка і енергетика». – Вип. 11 (186). – Донецьк, 2011. – С. 199–204.
59. Літвінов В. В. Нечітко-статистичний метод оцінки ризику порушення стійкості двигунового навантаження в підсистемі ЕЕС / В. В. Літвінов, М. В. Костерев, Є. І. Бардик // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2011. – № 2. – С. 88–95.
60. Літвінов В. В. Оцінка ризику порушення стійкості двигунового навантаження при відмовах електрообладнання в підсистемі ЕЕС : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : (05.14.02 – електричні станції, мережі та системи) / Літвінов Володимир Валерійович; МОНМС України, НТУУ «КПІ». – Київ, 2012. – 234 с.
61. Чунихин А. А. Электрические аппараты высокого напряжения: Выключатели Т.2: Справочник. [Текст] / Чунихин А. А. – М. : ИНФОРМЭЛЕКТРО, 1996. – 211 с.
62. Справочник по проектированию электрических сетей [Текст] / под. ред. Д. Л. Файбисовича. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2009. – 392 с.
63. Неклепаев Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования : учеб. пособие для вузов / Б. Н. Неклепаев, П. И. Крючков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоавтоиздат, 1989. – 608 с.
64. Афанасьев В. В. Приводы к выключателям и разъединителям высокого напряжения [Текст] / В. В. Афанасьев, Э. Н. Якунин. – Л. : Энергоатомиздат, 1982. – 224 с.
65. Richard Thomas. Controlled Switching of High Voltage SF6 Circuit Breakers for Fault Interruption. Thesis for the degree of licentiate of engineering. Sweden 2004. – P. 259.

66. Maricel Adam. Monitoring and diagnostic system for high voltage circuit breakers. International conference on electromechanical and power systems. October 4–6, 2007. – Moldova. / Marciel Adam, Adrian Baraboi, Catalin Pancu // p. 55 – 60.
67. Working Group A3.07, «Controlled Switching of HV AC Circuit Breakers: Guidance for further applications including unloaded transformer switching, load and fault interruption and circuit-breaker uprating», Jan 2004, CIGRQ, Paris.
68. Кутін В. М. Визначення діагностичних параметрів оцінки технічного стану високовольтного вимикача / Кутін В. М., Рубаненко О. Є., Мисенко С. В. // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – № 3. – С. 33–39.
69. Кутін В. М. Визначення технічного стану елегазових високовольтних вимикачів в умовах експлуатації / В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, С. В. Мисенко // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – № 60 (1102). – С. 57–68.
70. Кутін В. М. Особливості експлуатації та випробування елегазових вимикачів / В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, С. В. Мисенко // Міжнародна конференція. Тези доповіді. Контроль і управління в складних системах (КУСС–2012), 9–11 жовтня 2012 р. – С. 159.
71. Кутін В. М. Комплексний метод визначення технічного стану елегазових вимикачів / В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, С. В. Мисенко // Материали XI міжнародної научно-практичної конференції «ключевые аспекты научной деятельности – 2015», 07–15 января 2015 г. – С. 60–64.
72. Абдурахманов А. М. Еще раз о составляющих модели отказа выключателя / А. М. Абдурахманов, М. Ш. Мисриханов, Б. Н. Неклепаев // Электрические станции. – 2005. – № 4. – С. 41–48.
73. Абдурахманов А. М. Об особенностях структуры параметра потока отказов выключателя / А. М. Абдурахманов, М. Ш. Мисриханов, Б. Н. Неклепаев // Электрические станции. – 2005. – № 5. – С. 54–57.

74. Абдурахманов А. М. Анализ моделей отказа выключателей в схемах коммутации электроустановок / А. М. Абдурахманов, М. Ш. Мисриханов, А. В. Шунтов // Электричество. – 2007. – № 4. – С. 2–11.
75. Абдурахманов А. М. Влияние продолжительности эксплуатации на отказы выключателей в высоковольтных электрических сетях / А. М. Абдурахманов, М. Ш. Мисриханов, А. В. Шунтов // Электрические станции. – 2007. – № 7. – С. 59–63.
76. Choonhapran P. Applications of High Voltage Circuit-Breakers and Development of Aging Models: genehmigte Dissertation / Phuwanart Choonhapran. – Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universitat Darmstadt. – Darmstadt, 2007. – 171 p.
77. Balzer G. Evaluation of failure data of HV circuit-breakers for condition based maintenance / G. Balzer, D. Drescher, F. Heil // CIGRE. – 2004. – Pap. A3–305.
78. Choonhapran P. Cascading reliability model for HV circuit-breakers / P. Choonhapran, G. Balzer // Proc. of the Power Tech. – Lausanne, 2007.
79. Stanek M. Model-Aided Diagnosis for High Voltage Circuit Breakers: a dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Michael Stanek. – Swiss Federal Institute of Technology. – Zurich, 2000. – 165 p.
80. Назарычев А. Н. Анализ основных преимуществ применения вакуумных выключателей / А. Н. Назарычев // Энергоэксперт. – 2007. – № 4–5. – С. 58–63.
81. Доморощин С. В., Махлін П. В. Визначення спрацьованого ресурсу елегазового вимикача типу HGF 100/2 В,С GEC ALSTOM за нечіткою моделлю // Електротехніка та електроенергетика. – 2016. – № 2. – С. 72–81. **doi: 10.15588/1607-6761-2016-2-8.**
82. Доморощин С. В., Літвінов В. В. Оцінювання ймовірності відмови елегазових вимикачів «GEC ALSTOM» на інтервалі часу // Гідроенергетика України. – 2018. – № 1-2. – С. 39–44.

83. Сви П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П. М. Сви. — М. : Энергоатомиздат, 1992 — 240 с.
84. Перевірка ізоляції трансформаторів струму 330 – 750 кВ під робочою напругою: СОУ-Н МПЕ 40.1.46.301-2006. – Офіц. вид. — К. : ГРІФРЕ : М-во палива та енергетики України, 2006. – 31 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Інструкція).
85. Сви П. М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения / П. М. Сви. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 128 с.
86. Verma P. Condition Monitoring of Transformer Oil and Paper : a Thesis Submitted for the Award of the Degree of Doctor of Philosophy / Piush Verma. – Patiala, India, 2005. – 172 с.
87. Сахно А. А. Алгоритм измерения тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции трансформаторов тока и вводов 330–750 кВ при непрерывном контроле, под рабочим напряжением / А. А. Сахно // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 2. – С. 54–56.
88. Рассальский А. Н. Анализ методов непрерывного контроля характеристик изоляции трансформаторов тока и вводов на подстанциях 330 — 750 кВ / А. Н. Рассальский, А. А. Сахно, С. П. Конограй, А. Г. Спица, А. А. Гук // Вісник КДПУ ім. Михайла Остроградського. – 2009. – № 3 (56), часть 1. – С. 67—70.
89. Сахно А. А. Математическая модель прогноза остаточного ресурса трансформаторов тока 330–750 кВ с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа / А. А. Сахно // Вісник НТУ «ХП». – Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2010. – № 55. – С. 97–106.
90. Андриенко П. Д. Результаты внедрения системы непрерывного контроля характеристик основной изоляции высоковольтных трансформаторов

тока на ПС «Днепр – Донбасс 330» / П. Д. Андриенко, А. А. Сахно // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2011. – № 2. – С. 63–68.

91. Сахно А. А. Температурная зависимость диэлектрических потерь бумажно-масляной изоляции конденсаторного типа для диагностирования высоковольтных аппаратов в непрерывном режиме / А. А. Сахно, Л. С. Скрупская // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2017. – № 4. – С. 52–59. – doi: **10.30929/2072-2052.2017.4.40**.
92. Скрупская Л. С. Построение моделей диагностирования бумажно-масляной изоляции измерительных трансформаторов тока / Л. С. Скрупская, А. А. Олейник, А. А. Сахно // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2014. – № 2. – С. 48-52. doi: **10.20998/2074-272X.2014.2.10**.
93. Беляев В. К. Определение диэлектрических параметров изоляции трансформаторов тока при множественных измерениях в системах контроля под рабочим напряжением / В. К. Беляев, Е. Н. Паненко // *Електротехніка и електромеханіка*. – 2016. – № 5. – С. 40–47. doi: **10.20998/2074-272X.2016.5.06**.
94. Шинкаренко Г. В. Контроль опорных трансформаторов тока и вводов силовых трансформаторов под рабочим напряжением в энергосистемах Украины // *Электрические станции*. – 2001. – № 5. – С. 55–62.
95. Stirl T. Condition Monitoring and Diagnosis for Power Transformers their Bushings, Tap Changer and Insulation System [Электронный ресурс] / Tobias Stirl, Raimund Skrzypek, Stefan Tenbohlen [at al]// CMD,Changwong, Korea. – 2006. – 6 s. – Резюме доступа: <http://www.uni-stuttgart.de/ieh/forschung/veroeffentlichungen/On-line>.
96. Мордкович А. Г. О построении подсистем мониторинга, управления и диагностики оборудования подстанций сверхвысокого напряжения и интеграции в АСУТП ПС. / А. Г. Мордкович, Р. А. Горожанкин // *Электрические станции*. – 2007. – № 7. – С. 30–38.

97. Sakhno A. A., Skrupskaya L. S., Domoroshchyn S. V. Improvement of the nonequilibrium-compensation method for state diagnostics of high-voltage apparatus with condenser insulation. *Electrical engineering and power engineering*. – 2019. – № 4. – P. 56–64. DOI: 10.15588/1607-6761-2019-4-5.
98. T. W. Krieg, M. Napolitano. (2000). Implementation of On-Line Transformer Monitoring and Fault Diagnosis in Electra Net SA, proceedings of ICMEP. Wuhan, PR China, 25-26.
99. H. Borsi. (2000). Gassing behavior of different insulating liquids for transformers. *Electra*, no.188, 20-41.
100. O. Reyes, H. Lara, E. Robles. Abnormal failure rate on high voltage current transformers affected by environmental condition. Conference record of the 2008 IEEE international symposium on electrical insulation. Vancouver, BC, Canada, 243.
101. Y. Fei, X.–Q. Wang, C.–J. Luo. (2012). Type selection and structure of ± 1000 kV ultra HVDC instrument transformer. *Gaoya Dianqi/High Voltage Apparatus*. no 54(6), 184-188. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2018.06.028.
102. C. Sun, L. Zhang, C. Yan, C. Li. (2018). On-site Error Calibration Technology Under High Current for 1 000 kV Current Transformer. *Gaoya Dianqi/High Voltage Apparatus*. no 48(1), 7–12.
103. S. Domoroshchyn, O. Sakhno. Estimating the failure probability of an instrument transformer cell in the high voltage distributing device using an expert-statistical method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – № 4/2. – P. 70–81.
104. Засоби захисту від перенапруг у електроустановках 6–750 кВ. Інструкція з монтажу та експлуатації [Текст]: ГКД 34.35.512-2002: затв. М-вом палива та енергетики України 20.02.2002. – К. : ОЕП «ГРІФРЕ», 2002. – 138 с.
105. Лебедка С. Н. Математическое моделирование режимов работы электросетей с ОПН [Текст] / Ю. Н. Веприк, С. Н. Лебедка // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2012. – № 3/8. – С. 25–29.

106. Гриб О. Г. Работа средств защиты от перенапряжения в энергосистемах при наличии высших гармоник [Текст] / О. Г. Гриб, С. Ю. Шевченко, Д. А. Гапон [и др.] / Вісник НТУ «ХП». – 2014. – № 41(1084). – С. 78-86.
107. Шевченко С. Ю. Особенности защиты оборудования подстанций от перенапряжений [Текст] / С. Ю. Шевченко, О. Н. Довгалюк, А. Е. Пиротти / Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». – 2013. – № 1(14). – С. 308–312.
108. C. Heinrich ; V. Hinrichsen. Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage networks-comparison of existing and newly developed procedures / IEEE Transactions on Power Delivery (Volume: 16, Issue: 1, Jan 2001) – 2001, Page(s): 138 – 143. – DOI: 10.1109/61.905619.
109. Yu-ting XU, Xiao-hua YUAN, Ya-li MO, Guo-tai DONG and De-cheng ZHU. Research on On-line Monitoring of Insulation of Metal Oxide Surge Arrester - 2016 International Conference on Material Science and Civil Engineering (MSCE 2016) – 2016, pages: 328 – 336.
110. Ibrahim A. Metwally, Mohamed Eladawy, E. A. Feilat. Online condition monitoring of surge arresters based on third-harmonic analysis of leakage current - IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (Volume: 24, Issue: 4, 2017) – 2017. – Page(s): 2274 – 2281. DOI: 10.1109/TDEI.2017.006334/.
111. Доморошин С. В. Нечітке моделювання ймовірності відмови апаратів захисту від перенапруг / С. В. Доморошин, О. А. Сахно // Електротехніка та електроенергетика. – 2018. – № 3. – С. 39–51. **doi: 10.15588/1607-6761-2018-3-5.**
112. Taotao Zhou, Jiangjun Ruan, Yufei Liu, Shiyi Peng. (2020). Defect Diagnosis of Disconnecter Based on Wireless Communication and Support Vector Machine. IEEE Access 8:1-1. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2972010.
113. Jinrui Shi, Tianyang Xu, Shuixian Yang, Buoyang Li. (2017). Design and realization of high voltage disconnecter condition monitoring system. Journal

of Physics: Conf. Series 887(1):012011. DOI: 10.1088/1742-6596/887/1/012011.

114. Zhibin Qiu, Jianajun Ruan, Daochun Huang, Yuchen Huang. (2014). Mechanical fault diagnosis of high voltage outdoor disconnecter based on motor current signal analysis. IEEE. 2014 international conference on power system technology. Chengdu, China, 206.
115. X. Lin, Q. Cai, J.-Y. Xu, S. Li. (2011). Large scale of electric field calculation of 1100 kV disconnecter based on domain decomposition method. Gaoya Diangi/High Voltage Apparatus, no. 47(2), 1–6.
116. Z. Qiu, Dengpan Huang, Edison Zhang, Jiayi Ruan, Y. Zhang. (2015). Mechanical faults analysis of high voltage disconnectors and review of diagnosis technology. Gaoya Diangi/High Voltage Apparatus, no. 51(8), 171–179. doi: 10.13296/j.1001-1609.hva.2015.08.029.
117. Jinriu Shi, Tianyang Xu, Shuixian Yang, Buoyang Li. (2017). Design and realization of high voltage disconnecter condition monitoring system. Journal of Physics: Conf. Series 887(2017)012011, 1-6. doi: 10.1088/1742-6596/887/1/012011.
118. Никта – переносной прибор для диагностики и оценки остаточного ресурса высоковольтных выключателей [Электронный ресурс.] URL: <https://dimrus.ru/nikta.html>. (дата звернения: 10.11.2019).
119. BDM – система мониторинга и оценки технического состояния КРУ и коммутационного оборудования [Электронный ресурс.] URL: <https://dimrus.ru/bdm.html>. (дата звернения: 12.11.2019).
120. Устройства мониторинга высоковольтного выключателя АВМ-В [Электронный ресурс.] URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/63923-16-avm-v-73908>. (дата звернения: 13.11.2019).
121. Система мониторинга высоковольтных выключателей АББ OLM2 [Электронный ресурс.] URL: <https://leg.co.ua/info/vyklyuchатели/sistema-monitoringa-vysokovoltnyh-vyklyuchateley-abb-olm2.html> (дата звернения: 15.11.2019).

122. OPN-Monitor – система мониторинга технического состояния ограничителей перенапряжения [Электронный ресурс.] URL: <https://dimrus.ru/opn.html>. (дата звернення: 14.12.2019).
123. Surge counters and surge monitors for surge arresters [Электронный ресурс.] URL: <https://www.hitachiabb-powergrids.com/offering/product-and-system/surge-arresters/high-voltage-surge-arresters/excount>. (дата звернення: 10.12.2019).
124. Системы мониторинга [Электронный ресурс.] URL: <http://earu.ru/products/SAFE-T/>. (дата звернення: 18.12.2019).
125. Disconnectors [Электронный ресурс.] URL: <https://www.hitachiabb-powergrids.com/offering/product-and-system/disconnectors> (дата звернення: 18.12.2019).
126. ZVCM-1001 Bushing Monitor [Электронный ресурс.] URL: <https://www.ztzservices.us/zvcm-bushing-monitor/> (дата звернення: 20.12.2019).
127. ADS-3 – система мониторинга технического состояния элегазовых трансформаторов тока [Электронный ресурс.] URL: <https://dimrus.ru/ads3.html>. (дата звернення: 12.11.2019).
128. Доморошин С. В. Метод ризик-аналізу порушення функціонування розподільчих пристроїв високої напруги // С. В. Доморошин, О. А. Сахно // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2020. – № 3 (51). – С. 41–52. doi: **10.30929/2072-2052.2020.3.51.41–52**.
129. Костерев М. В. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем [Текст]: монографія / М. В. Костерев, Є. І. Бардик. – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 148 с.
130. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / Штовба С. Д. – М. : Горячая линия – телеком, 2007. – 288 с.
131. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH / Леоненков А. В. – СПб. : БХВ – Петербург, 2005. – 736 с.

132. Штовба С. Д. Обеспечение точности и прозрачности нечеткой модели Мамдани при обучении по экспериментальным данным // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 4. – С. 1–13.
133. Riid A. Transparent Fuzzy Systems: Modeling and Control: PhD Thesis / Riid Arno. – Tallinn Techical University: Dpartment of Computer Control. – Tallinn, 2002. – 227 p.
134. Ременников В. Б. Управленческие решения / Ременников В. Б. – Минск : Юнити, 2005. – 144 с.
135. Медиковський М. О. Дослідження ефективності методів визначення вагових коефіцієнтів важливості / М. О.Медиковський, О. Б. Шуневич // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 5. – С. 176–182.
136. Літвінов В. В. Використання методів парного порівняння для визначення пріоритетності способів забезпечення статичної стійкості асинхронних двигунів в умовах багатокритеріального вибору / В. В. Літвінов, М. В. Костерев, П. Л. Денисюк // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2010. – № 2. – С. 24–29.
137. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Саати Т.– М. : Радио и связь, 1993. – 278 с.
138. Марченко Г. Н. Использование экспертного метода при формировании набора показателей конкурентоспособности энергетических предприятий / Г. Н. Марченко, Р. Е. Мансуров, И. Г. Ахметова // Проблемы энергетики. – 2005. – № 5–6. – С. 68–78.
139. Operating instruction. Surge Arrester Type 3EL2. Order-No.: 928 00047 176. Published by: Siemens AG Power Transmission and Distribution Group High Voltage Division PTD H4 D-13623 Berlin.
140. Betriebsanleitung. Leistungsschalter 3AP2 FI für Bemessungs-Spannung 363 kV Fabriknummer: 35091564. Herausgegeben von: Siemens AG Power Transmission and Distribution Group High Voltage Division D-13623 Berlin.

141. Application Guide. ABB Instrument Transformers. ABB AB High Voltage Products. SE-771 80 Ludvika, Sweden.
142. ДСТУ EN 62271-102:2016 (EN 62271-102:202, IDT). Пристрої контрольні розподільчі високовольтні. Частина 102. Роз'єднувачі та уземлювальні перемикачі змінного струму. [Чинний від 2016-09-15] Вид. офіц. Київ, 2016. 27 с.
143. Разъединители высоковольтные типов РНДЗ-330/3150 МУХЛ1, РНДЗ-330Б/3150 МУХЛ1, РНДЗ-500/3150 МУХЛ1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ИВЕЖ.674216.012 ТО.
144. Ситников В. Ф. Вероятностно-статистический подход к оценке ресурсов электросетевого оборудования в процессе эксплуатации / В. Ф. Ситников, В. А. Скопинцев // Электричество. – 2007. – № 11. – С. 9–15.
145. F. Doshi, J. Pineau, N. Roy. Reinforcement Learning with Limited Reinforcement: Using Bayes Risk for Active Learning in POMDPs. 25th International Conference on Machine Learning. 2008, pp. 256–263.
146. Фокин Ю. А. Вероятностно-статистические методы в расчетах надежности систем электроснабжения / Фокин Ю. А. – Москва. : Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
147. Руденко Ю. Н. Надежность систем энергетики / Ю. Н. Руденко, И. А. Ушаков. – Новосибирск : Наука, 1989. – 328 с.
148. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Вентцель Е. С. – 4-е изд. стер. – Москва : Наука, 1972. – 576 с.
149. Сахно А. А. Система непрерывного контроля и прогноза остаточного ресурса высоковольтных трансформаторов тока : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : (05.14.02 – электрические станции, сети и системы) / Сахно Александр Анатольевич; МОНМС Украины, ЗНТУ. – Запорожье, 2011. – 179 с.
150. Saaty T. L. Eigenweightor an logarithmic lease squares / T. L. Saaty // Eur. J. Oper. Res. –1990. – 48, № 1. – P. 156–160.

151. Литвак Б. Г. Экспертные технологии в управлении / Литвак Б. Г. – М. : Дело, 2004. – 400 с.
152. Чеботарев П. Ю. Метод строчных сумм и приводящие к нему модели / П. Ю. Чеботарев // Сб. тр. ВНИИ системных исслед. –1989. – № 3. – С. 94-110.
153. ДСТУ 2862–94. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. [Чинний від 1994-12-08] Вид. офіц. Київ, 1994. 39 с.
154. ДСТУ 8646:2016. Надійність техніки. Оцінювання і прогнозування залишкового ресурсу (терміну служби) технічних систем. [Чинний від 2017-07-01] Вид. офіц. ДП «УкрНДНЦ», 2017. 63 с.
155. Сінчук О. М. Приватний коментар до проблеми енергетичної безпеки України / О. М. Сінчук, І. О. Сінчук, Т. М. Берідзе // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2018. – № 1 (41). – С. 53–60. **doi: 10.30929/2072-2052.2018.1.41.53–60.**
156. Дерев'янку Д. Г. Особливості режимів функціонування інтегрованих систем енергозабезпечення споживачів / Д. Г. Дерев'янку, О. С. Ярмолук, О. А. Беспалий // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2018. – № 2 (42). – С. 61–67. **doi: 10.30929/2072-2052.2018.2.42.61–67.**
157. Gaoyang Li, Xiaohua Wang, Aijun Yang, Mingzhe Rong. Failure prognosis of high voltage circuit breakers with temporal latent dirichlet allocation. In Proceedings of the International Conference on Prognostics and Health Management (PHM-Harbin 2017), Harbin, China. 2017. P. 9–12. **doi: 10.3390/en10111913.**
158. Панов А. В. Актуальні питання моніторингу і технічного обслуговування високовольтних вимикачів / А. В.Панов, В. І. Паньків, М. Ф. Сопель, Б. С. Стогній, Є. М. Танкевич // *Технічна Електродинаміка*. – 2018. – № 2. – С. 75–85. **doi: <http://doi.org/10.15407/techned2018.02.075>.**

159. Xiang Zhang, Ernst Gockenbach, Zhaolin Liu, Haibo Chen, Linghui Yang. Reliability estimation of high voltage SF₆ circuit breakers by statistical analysis on the basis of the field data. *Electric power systems research*. 2013. vol. 103, P. 105–113. doi: <http://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.04.014>.
160. Ming Ren, Jierui Zhou, Shujing Yang, Tianxin Zhuang, Ning Dong, Ricardo Albarracin. Optical partial discharge diagnosis in SF₆ gas-insulated system with SiPM-based sensor array. *IEEE Sensors Journal*. 2018. vol. 18, P. 5532–5540. doi: [10.1109/JSEN.2018.2836423](https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2836423).
161. Alvarez Gomez F, Albarracin-Sanchez R, Garnacho Vecino F, Granizo Arrabe R. Diagnosis of insulation condition of MV switchgears by application of different partial discharge measuring methods and sensors. *Sensor (Basel)*. 2018. 18(3):720. doi: [10.3390/s18030720](https://doi.org/10.3390/s18030720).
162. Uwe Riechert, Andrija Djurdjic, Matthias Kudoke, Michael Stanek. Monitoring and diagnostics of gas-insulated switchgear – development trends and range of applications. Conference: FGH-Fachtagung: Assetmanagement in verteilungsnetzen – Methoden, Daten, Praxiserfahrungen, at Heidelberg. Germany. September 2006.
163. Deepak Kanumuri, Veena Sharma, O.P. Rahi. Analysis using various approaches for residual life estimation of power transformers. *International journal on electrical engineering and informatics*. 2019. Vol. 11, No. 2, P. 389–407. doi: [10.15676/ijeei.2019.11.2.11](https://doi.org/10.15676/ijeei.2019.11.2.11).
164. Yu L Zhukovskiy, N A Korolev, I S Babanova, A V Boikov. The prediction of the residual life of electromechanical equipment based on the artificial neural network. *IOP Conf. Series: Earth and environmental science*. 2017. P. 1–6. doi: [10.1088/1755-1315/87/3/032056](https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/3/032056).
165. Siyu Wang. Residual life assessment of power transformer based on random fuzzy theory. ISSN: 1662-8985. 2015. Vols. 1070-1072, P. 1127–1132. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.1070-1072.1127](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1070-1072.1127).

Додаток А

**Побудова ФН термів вхідних лінгвістичних змінних нечіткої моделі для
оцінення ТС елегазового вимикача**

Результати обробки експертних опитувань наведено в табл. А.1.

Таблиця А.1 – Результати обробки експертних оцінок

<i>A</i> ₁ = «Спрацьований механічний ресурс»						
<i>R</i> _{мех.} , в.о.	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
<i>Π</i> ₁ = «Припрацювальний»	9	3	0	0	0	0
<i>Δ</i> ₁ = «Допустимий»	0	6	9	9	3	0
<i>В</i> ₁ = «Відпрацьований»	0	0	0	0	6	9
<i>A</i> ₂ = «Спрацьований комутаційний ресурс»						
<i>R</i> _{ком.} , в.о.	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
<i>Π</i> ₂ = «Припрацювальний»	9	8	0	0	0	0
<i>Δ</i> ₂ = «Допустимий»	0	1	9	9	2	0
<i>В</i> ₂ = «Відпрацьований»	0	0	0	0	7	9
<i>A</i> ₃ = «Тиск елегазу»						
<i>P</i> _{елег.} , в.о.	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
<i>Н</i> ₃ = «Низький»	9	9	3	0	0	0
<i>Δ</i> ₃ = «Допустимий»	0	0	6	9	9	9
<i>A</i> ₄ = «Надлишкова температурна різниця»						
<i>Δt</i> _{лім.} , в.о.	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
<i>Π</i> ₄ = «Початкова»	9	9	9	7	0	0
<i>P</i> ₄ = «Розвинена»	0	0	0	2	9	9

Побудова ФН термів змінної *A*₁ = «Спрацьований механічний ресурс»

Якщо вимикач не здійснював механічних операцій включення-відключення, то *R*_{мех.} = 0, а його механічний ресурс належить до терма *Π*₁ = «Припрацювальний» зі ступенем належності $\mu_{\Pi_1}(0)=1$. Якщо апарат здійснив нормативну кількість механічних операцій *R*_{мех.} = 1, то його механічний ресурс належить до терма *В*₁ = «Відпрацьований» зі ступенем належності $\mu_{V_1}(1)=1$. За правилом Руспіні можна стверджувати, що

$$\mu_{\Delta_1}(0)=1-\mu_{\Pi_1}(0)=0; \quad \mu_{\Delta_1}(1)=1-\mu_{V_1}(1)=0.$$

Експертне опитування показало, що належність $R_{mex.}=0,2$ до множини «Допустимий» має проміжне значення переваги, між істотним та дуже сильним, над належністю $R_{mex.}=0,0$ до цієї ж множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 6 балів. Належність $R_{mex.}=0,4$ до множини «Допустимий» має абсолютну перевагу над належністю $R_{mex.}=0,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $R_{mex.}=0,6$ до множини «Допустимий» має абсолютну перевагу над належністю $R_{mex.}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $R_{mex.}=0,8$ до множини «Допустимий» має деяку перевагу над належністю $R_{mex.}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється на 3 бали.

За отриманими балами складено матриці парних порівнянь Сааті для визначення границь ФН

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_1/\lambda_2 \\ \lambda_2/\lambda_1 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 6/9 \\ 9/6 & 1-\lambda \end{bmatrix}; \quad (A.1)$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_3/\lambda_4 \\ \lambda_4/\lambda_3 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/3 \\ 3/9 & 1-\lambda \end{bmatrix}. \quad (A.2)$$

Визначаємо для матриць Λ_1 та Λ_2 найбільші власні числа λ

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 6/9 \\ 9/6 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2; \quad (A.3)$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/3 \\ 3/9 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2. \quad (A.4)$$

Ступені належності входної лінгвістичної змінної «Спрацьований механічний ресурс» до нечіткої терм-множини «Допустимий» визначаються за рівняннями

$$\Lambda_1 \Omega_1 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 0,667 \\ 1,5 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (A.5)$$

$$\Lambda_2 \Omega_2 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 3 \\ 0,333 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.6})$$

Другі рівняння в системах (А.5) та (А.6) згідно з (3.20) замінюються умовою нормування $\sum_i \omega_i = 1$. Знаходимо вектори, які є розв'язанням цих рівнянь

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} 0,4 \\ 0,6 \end{bmatrix}; \quad (\text{A.7})$$

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} 0,75 \\ 0,25 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.8})$$

Нормалізацію отриманих ступенів належності виконаємо шляхом ділення векторів Ω_1 та Ω_2 на відповідні максимальні елементи

$$\Omega_1^N = \frac{\Omega_1}{\max\{\Omega_1\}} = \begin{bmatrix} 0,4/0,6 \\ 0,6/0,6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,667 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (\text{A.9})$$

$$\Omega_2^N = \frac{\Omega_2}{\max\{\Omega_2\}} = \begin{bmatrix} 0,75/0,75 \\ 0,25/0,75 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,333 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.10})$$

ФН нечіткої терм множини «Допустимий» має форму трапеції (3.4) і будується за такими значеннями: $\mu(0,2)=0,667$, $\mu(0,4)=1$, $\mu(0,6)=1$, $\mu(0,8)=0,333$. Значення ФН «Припрацювальний», «Відпрацьований» будуюмо згідно з правилом Руспіні.

Побудова ФН термів змінної $A_2 = \text{«Спрацьований комутаційний ресурс»}$

Якщо вимикач не здійснював відключень струмів КЗ, тобто комутаційних операцій $R_{ком.}=0$, то його комутаційний ресурс належить до терма $\Pi_2 = \text{«Припрацювальний»}$ зі ступенем належності $\mu_{\Pi_2}(0)=1$. Якщо апарат здійснив нормативну кількість комутаційних операцій $R_{ком.}=1$, то його комутаційний ресурс належить до терма $B_2 = \text{«Відпрацьований»}$ зі ступенем належності $\mu_{B_2}(1)=1$. За правилом Руспіні можна стверджувати, що

$$\mu_{\Pi_2}(0)=1 - \mu_{\Pi_2}(0)=0; \quad \mu_{B_2}(1)=1 - \mu_{B_2}(1)=0.$$

Експертне опитування показало, що належність $R_{ком.}=0,2$ до множини «Допустимий» має практично однакову значущість з належністю $R_{ком.}=0,0$ до

цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 1 бал. Належність $R_{ком.}=0,4$ до множини «Допустимий» має абсолютну перевагу над належністю $R_{ком.}=0,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $R_{ком.}=0,6$ до множини «Допустимий» має абсолютну перевагу над належністю $R_{ком.}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $R_{ком.}=0,8$ до множини «Допустимий» деяку перевагу над належністю $R_{ком.}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 2 бали.

За отриманими балами складено матриці парних порівнянь Сааті для визначення границь ФН

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_1/\lambda_2 \\ \lambda_2/\lambda_1 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 1/9 \\ 9/1 & 1-\lambda \end{bmatrix}; \quad (\text{A.11})$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_3/\lambda_4 \\ \lambda_4/\lambda_3 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/2 \\ 2/9 & 1-\lambda \end{bmatrix}. \quad (\text{A.12})$$

Визначаємо для матриць Λ_1 та Λ_2 найбільші власні числа λ

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 1/9 \\ 9/1 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2; \quad (\text{A.13})$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/2 \\ 2/9 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2. \quad (\text{A.14})$$

Ступені належності входної лінгвістичної змінної «Спрацьований комутаційний ресурс» до нечіткої терм-множини «Допустимий» визначаються за рівняннями

$$\Lambda_1 \Omega_1 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 0,111 \\ 9 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (\text{A.15})$$

$$\Lambda_2 \Omega_2 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 4,5 \\ 0,222 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.16})$$

Другі рівняння в системах (А.15) та (А.16) згідно з (3.20) замінюються умовою нормування $\sum_i \omega_i = 1$. Знаходимо вектори, які є розв'язанням цих рівнянь

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} 0,1 \\ 0,9 \end{bmatrix}; \quad (\text{A.17})$$

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} 0,818 \\ 0,182 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.18})$$

Нормалізацію отриманих ступенів належності виконаємо шляхом ділення векторів Ω_1 та Ω_2 на відповідні максимальні елементи

$$\Omega_1^N = \frac{\Omega_1}{\max\{\Omega_1\}} = \begin{bmatrix} 0,1/0,9 \\ 0,9/0,9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,111 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (\text{A.19})$$

$$\Omega_2^N = \frac{\Omega_2}{\max\{\Omega_2\}} = \begin{bmatrix} 0,818/0,818 \\ 0,182/0,818 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,222 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.20})$$

ФН нечіткої терм-множини «Допустимий» має форму трапеції (3.4) і будується за такими значеннями: $\mu(0,2)=0,111$, $\mu(0,4)=1$, $\mu(0,6)=1$, $\mu(0,8)=0,222$. Значення ФН «Припрацьовальний», «Відпрацьований» будуюмо згідно з правилом Руспіні.

Побудова ФН термів змінної $A_3 = \text{«Тиск елегазу»}$

Якщо тиск елегазу опустився до нижньої межі, обумовленої нормативною документацією, $P_{елег.}=0$, то тиск в дугогасильній камері належить до терма $H_3 = \text{«Низький»}$ зі ступенем належності $\mu_{H_3}(0)=1$. Якщо тиск елегазу має нормативне робоче значення $P_{елег.}=1$, то його тиск належить до терма $D_3 = \text{«Допустимий»}$ зі ступенем належності $\mu_{D_3}(1)=1$. За правилом Руспіні можна стверджувати, що $\mu_{H_3}(0)=1 - \mu_{D_3}(0)=0$.

Експертне опитування показало, що належність $P_{елег.}=0,2$ до множини «Низький» має абсолютну перевагу над належністю $P_{елег.}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $P_{елег.}=0,4$ до множини «Низький» має деяку перевагу над належністю $P_{елег.}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 3 бали.

За отриманими балами складено матрицю парних порівнянь Сааті для визначення границь ФН

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_1/\lambda_2 \\ \lambda_2/\lambda_1 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/3 \\ 3/9 & 1-\lambda \end{bmatrix}. \quad (\text{A.21})$$

Визначаємо для матриці Λ_1 найбільше власне число λ

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/3 \\ 3/9 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2. \quad (\text{A.22})$$

Ступені належності вхідної лінгвістичної змінної «Тиск елегазу» до нечіткої терм множини «Низький» визначаються за рівнянням

$$\Lambda_1 \Omega_1 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 3 \\ 0,333 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.23})$$

Друге рівняння в системі (A.23) згідно з (3.20) замінюється умовою нормування $\sum_i \omega_i = 1$. Знаходимо вектор, який є розв'язанням цього рівняння

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} 0,75 \\ 0,25 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.24})$$

Нормалізацію отриманих ступенів належності виконаємо шляхом ділення вектора Ω_1 на відповідні максимальні елементи

$$\Omega_1^N = \frac{\Omega_1}{\max\{\Omega_1\}} = \begin{bmatrix} 0,75/0,75 \\ 0,25/0,75 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,333 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.25})$$

ФН нечіткої терм множини «Низький» має форму трапеції (3.4) і будується за такими значеннями: $\mu(0,2)=1$, $\mu(0,4)=0,333$, $\mu(0,6)=0$, $\mu(0,8)=0$. Значення ФН «Допустимий» будемо згідно з правилом Руспіні.

Побудова ФН термів змінної A_4 = «Надлишкова температурна різниця»

Якщо надлишкова температурна різниця дорівнює нулю $\Delta t_{lim} = 0$, то надлишкова температурна різниця належить до терма P_4 = «Початкова» зі ступенем належності $\mu_{P_4}(0)=1$. Якщо надлишкова температурна різниця досягла верхньої межі за нормативними значеннями $\Delta t_{lim} = 1$, то вона

належить до терма $P_4 = \text{«Розвинена»}$ зі ступенем належності $\mu_{P_4}(1)=1$. За правилом Руспіні можна стверджувати, що $\mu_{P_4}(0)=1 - \mu_{P_4}(1)=0$.

Експертне опитування показало, що належність $\Delta t_{lim}=0,2$ до множини «Початкова» має абсолютну перевагу над належністю $\Delta t_{lim}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $\Delta t_{lim}=0,4$ до множини «Початкова» має абсолютну перевагу над належністю $\Delta t_{lim}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $\Delta t_{lim}=0,6$ до множини «Початкова» має очевидну перевагу над належністю $\Delta t_{lim}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 7 балів.

За отриманими балами складено матрицю парних порівнянь Сааті для визначення границь ФН

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_1/\lambda_2 \\ \lambda_2/\lambda_1 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/7 \\ 7/9 & 1-\lambda \end{bmatrix}. \quad (\text{A.26})$$

Визначаємо для матриці Λ_1 найбільше власне число λ

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/7 \\ 7/9 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2. \quad (\text{A.27})$$

Ступені належності вхідної лінгвістичної змінної «Надлишкова температурна різниця» до нечіткої терм-множини «Початкова» визначаються за рівнянням

$$\Lambda_1 \Omega_1 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 1,286 \\ 0,778 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.28})$$

Друге рівняння в системі (A.28) згідно з (3.20) замінюється умовою нормування $\sum_i \omega_i = 1$. Знаходимо вектор, який є розв'язанням цього рівняння

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} 0,563 \\ 0,437 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.29})$$

Нормалізацію отриманих ступенів належності виконаємо шляхом ділення вектора Ω_1 на відповідні максимальні елементи

$$\Omega_1^N = \frac{\Omega_1}{\max\{\Omega_1\}} = \begin{bmatrix} 0,563/0,563 \\ 0,437/0,563 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,776 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.30})$$

ФН нечіткої терм–множини «Початкова» має форму трапеції (3.4) і будується за такими значеннями: $\mu(0,2)=1$, $\mu(0,4)=1$, $\mu(0,6)=0,776$, $\mu(0,8)=0$.
Значення ФН «Розвинена» будуюмо згідно з правилом Руспіні.

Результати розрахунків зведено в таблиці А.2 – А.5.

Графічне зображення ФН нечітких термів лінгвістичних змінних подано на рис. А.1–А.4.

Таблиця А.2 – Ступені належності нечітким термам значень вхідної величини «Спрацьований механічний ресурс»

$R_{\text{мех.}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{\text{припрацьовальний}}(R_{\text{мех.}})$	1	0,333	0	0	0	0
$\mu_{\text{допустимий}}(R_{\text{мех.}})$	0	0,667	1	1	0,333	0
$\mu_{\text{відпрацьований}}(R_{\text{мех.}})$	0	0	0	0	0,778	1

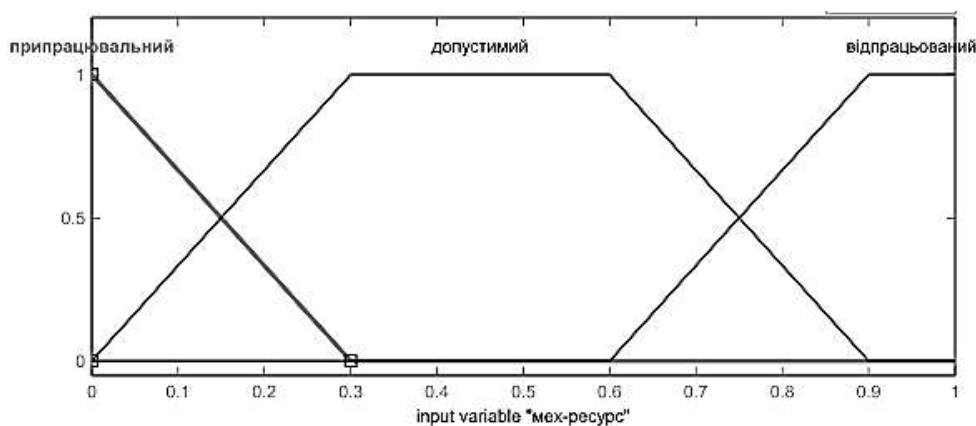


Рисунок А.1 – ФН термів вхідної лінгвістичної змінної «Спрацьований механічний ресурс»

Таблиця А.3 – Ступені належності нечітким термам значень вхідної величини «Спрацьований комутаційний ресурс»

$R_{\text{ком.}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{\text{припрацьовальний}}(R_{\text{ком.}})$	1	0,889	0	0	0	0
$\mu_{\text{допустимий}}(R_{\text{ком.}})$	0	0,111	1	1	0,222	0
$\mu_{\text{відпрацьований}}(R_{\text{ком.}})$	0	0	0	0	0,778	1

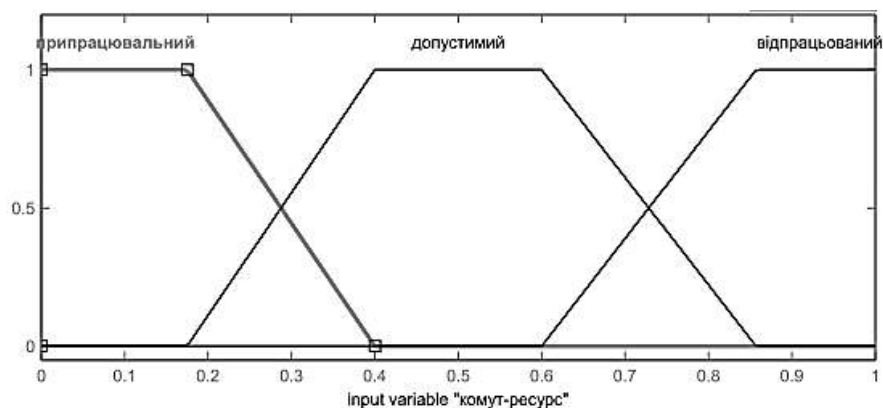


Рисунок А.2 – ФН термів вхідної лінгвістичної змінної «Спрацьований комутаційний ресурс»

Таблиця А.4 – Ступені належності нечітким термам значень вхідної величини «Тиск елегазу»

$P_{\text{елег.}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{\text{низький}}(P_{\text{елег.}})$	1	1	0,333	0	0	0
$\mu_{\text{допустимий}}(P_{\text{елег.}})$	0	0	0,667	1	1	1

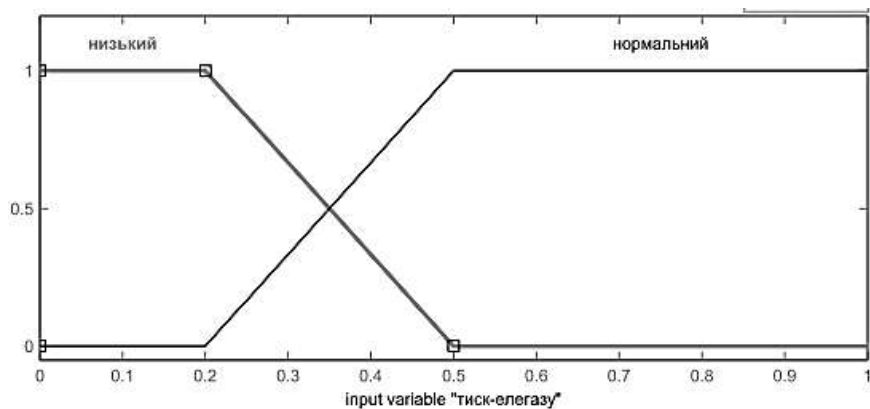


Рисунок А.3 – ФН термів вхідної лінгвістичної змінної «Тиск елегазу».

Таблиця А.5 – Ступені належності нечітким термам значень вхідної величини «Надлишкова температурна різниця»

$\Delta t_{\text{лим.}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{\text{початкова}}(\Delta t_{\text{лим.}})$	1	1	1	0,224	0	0
$\mu_{\text{розвинена}}(\Delta t_{\text{лим.}})$	0	0	0	0,776	1	1

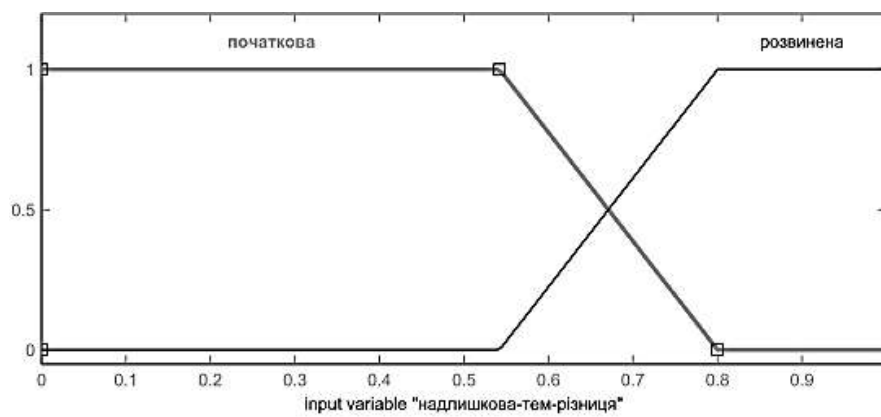


Рисунок А.4 – ФН термів вхідної лінгвістичної змінної «Надлишкова температурна різниця».

Додаток Б

Побудова ФН термів вхідних лінгвістичних змінних нечіткої моделі для оцінення ТС трансформатора струму

Результати обробки експертних опитувань наведено в таблиці Б.1.

Таблиця Б.1 – Результати обробки експертних оцінок

$A_1 = \text{«Струм небалансу»}$						
$I_{нб.}, \text{ в.о.}$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$H_1 = \text{«Нормальний»}$	9	8	0	0	0	0
$D_1 = \text{«Допустимий»}$	0	1	9	5	1	0
$AB_1 = \text{«Аварійно високий»}$	0	0	0	4	8	9
$A_2 = \text{«Діелектричні втрати»}$						
$R_{ком.}, \text{ в.о.}$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$H_2 = \text{«Нормальний»}$	9	9	6	0	0	0
$D_2 = \text{«Допустимий»}$	0	0	3	9	1	0
$AB_2 = \text{«Аварійно високий»}$	0	0	0	0	8	9
$A_3 = \text{«Відхилення ємності»}$						
$P_{елег.}, \text{ в.о.}$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$H_3 = \text{«Допустиме»}$	9	9	5	0	0	0
$D_3 = \text{«Аварійно високе»}$	0	0	4	9	9	9
$A_4 = \text{«Надлишкова температурна різниця»}$						
$\Delta t_{lim.}, \text{ в.о.}$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$P_4 = \text{«Початкова»}$	9	9	9	2	0	0
$R_4 = \text{«Розвинена»}$	0	0	0	7	9	9

Побудова ФН термів змінної $A_1 = \text{«Струм небалансу»}$

Якщо струм небалансу трифазної групи трансформаторів струму дорівнює нулю, $I_{нб.} = 0$, то струм небалансу належить до терма $H_1 = \text{«Нормальний»}$ зі ступенем належності $\mu_{H_1}(0) = 1$. Якщо струм небалансу досяг верхньої межі відповідно до нормативної документації $I_{нб.} = 1$, то струм небалансу належить до терма $AB_1 = \text{«Аварійно високий»}$ зі ступенем належності $\mu_{AB_1}(1) = 1$. За правилом Руспіні можна стверджувати, що

$$\mu_{H_1}(0) = 1 - \mu_{D_1}(0) = 0; \quad \mu_{D_1}(1) = 1 - \mu_{AB_1}(1) = 0.$$

Експертне опитування показало, що належність $I_{нб.}=0,2$ до множини «Допустимий» має практично однакову значущість з належністю $I_{нб.}=0,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 1 бал. Належність $I_{нб.}=0,4$ до множини «Допустимий» має абсолютну перевагу над належністю $I_{нб.}=0,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $I_{нб.}=0,4$ до множини «Допустимий» має абсолютну перевагу над належністю $I_{нб.}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $I_{нб.}=0,8$ до множини «Допустимий» має практично однакову значущість з належністю $I_{нб.}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 1 бал.

За отриманими балами складено матриці парних порівнянь Сааті для визначення границь ФН

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_1/\lambda_2 \\ \lambda_2/\lambda_1 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 1/9 \\ 9/1 & 1-\lambda \end{bmatrix}; \quad (\text{Б.1})$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_3/\lambda_4 \\ \lambda_4/\lambda_3 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/1 \\ 1/9 & 1-\lambda \end{bmatrix}. \quad (\text{Б.2})$$

Визначаємо для матриць Λ_1 та Λ_2 найбільші власні числа λ

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 1/9 \\ 9/1 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2; \quad (\text{Б.3})$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/1 \\ 1/9 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2. \quad (\text{Б.4})$$

Ступені належності вхідної лінгвістичної змінної «Струм небалансу» до нечіткої терм-множини «Допустимий» визначаються за рівняннями

$$\Lambda_1 \Omega_1 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 0,111 \\ 9 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (\text{Б.5})$$

$$\Lambda_2 \Omega_2 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 9 \\ 0,111 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{Б.6})$$

Другі рівняння в системах (Б.5) та (Б.6) згідно з (3.20) замінюються умовою нормування $\sum_i \omega_i = 1$. Знаходимо вектори, які є розв'язанням цих рівнянь

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} 0,1 \\ 0,9 \end{bmatrix}; \quad (\text{Б.7})$$

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} 0,9 \\ 0,1 \end{bmatrix}. \quad (\text{Б.8})$$

Нормалізацію отриманих ступенів належності виконаємо шляхом ділення векторів Ω_1 та Ω_2 на відповідні максимальні елементи

$$\Omega_1^N = \frac{\Omega_1}{\max\{\Omega_1\}} = \begin{bmatrix} 0,1/0,9 \\ 0,9/0,9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,111 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (\text{Б.9})$$

$$\Omega_2^N = \frac{\Omega_2}{\max\{\Omega_2\}} = \begin{bmatrix} 0,9/0,9 \\ 0,1/0,9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,111 \end{bmatrix}. \quad (\text{Б.10})$$

ФН нечіткої терм-множини «Допустимий» має форму трикутника (3.3) і будується за такими значеннями: $\mu(0,2)=0,111$, $\mu(0,4)=1$, $\mu(0,6)=0,556$, $\mu(0,8)=0,111$. Значення ФН «Нормальний», «Аварійно високий» будуюмо згідно з правилом Руспіні.

Побудова ФН термів змінної A_2 «Діелектричні втрати»

Якщо трансформатор струму має діелектричні втрати близько нуля, але ненульове значення $tg\delta_{i3} > 0$, то тангенс діелектричних втрат належить до терма H_2 = «Нормальний» зі ступенем належності $\mu_{H_2}(0)=1$. Якщо діелектричні втрати ізоляції трансформатора струму досягли верхньої межі відповідно до нормативних значень $tg\delta_{i3}=1$, то його тангенс діелектричних втрат належить до терма AB_2 = «Аварійно високий» зі ступенем належності $\mu_{AB_2}(1)=1$. За правилом Руспіні можна стверджувати, що

$$\mu_{D_2}(0)=1 - \mu_{H_2}(0)=0 \text{ та } \mu_{D_2}(1)=1 - \mu_{AB_2}(1)=0.$$

Експертне опитування показало, що належність $tg\delta_{i3}=0,4$ до множини «Допустимий» має деяку перевагу над належністю $tg\delta_{i3}=0,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 3 бали. Належність $tg\delta_{i3}=0,6$ до множини «Допустимий» має абсолютну перевагу над

належністю $tg\delta_{із.}=0,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $tg\delta_{із.}=0,6$ до множини «Допустимий» має абсолютну перевагу над належністю $tg\delta_{із.}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $tg\delta_{із.}=0,8$ до множини «Допустимий» має практично однакову значущість з належністю $tg\delta_{із.}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 1 бал.

За отриманими балами складено матриці парних порівнянь Сааті для визначення границь ФН

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_1/\lambda_2 \\ \lambda_2/\lambda_1 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 3/9 \\ 9/3 & 1-\lambda \end{bmatrix}; \quad (\text{Б.11})$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_3/\lambda_4 \\ \lambda_4/\lambda_3 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/1 \\ 1/9 & 1-\lambda \end{bmatrix}. \quad (\text{Б.12})$$

Визначаємо для матриць Λ_1 та Λ_2 найбільші власні числа λ

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 3/9 \\ 9/3 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2; \quad (\text{Б.13})$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/1 \\ 1/9 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2. \quad (\text{Б.14})$$

Ступені належності вхідної лінгвістичної змінної «Діелектричні втрати» до нечіткої терм-множини «Допустимий» визначаються за рівняннями

$$\Lambda_1 \Omega_1 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 0,333 \\ 3 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (\text{Б.15})$$

$$\Lambda_2 \Omega_2 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 9 \\ 0,111 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{Б.16})$$

Другі рівняння в системах (Б.15) та (Б.16) згідно з (3.20) замінюються умовою нормування $\sum_i \omega_i = 1$. Знаходимо вектори, які є розв'язанням цих рівнянь

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} 0,25 \\ 0,75 \end{bmatrix}; \quad (\text{Б.17})$$

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} 0,9 \\ 0,1 \end{bmatrix}. \quad (\text{Б.18})$$

Нормалізацію отриманих ступенів належності виконаємо шляхом ділення векторів Ω_1 та Ω_2 на відповідні максимальні елементи

$$\Omega_1^N = \frac{\Omega_1}{\max\{\Omega_1\}} = \begin{bmatrix} 0,25/0,75 \\ 0,75/0,75 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,333 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (\text{Б.19})$$

$$\Omega_2^N = \frac{\Omega_2}{\max\{\Omega_2\}} = \begin{bmatrix} 0,9/0,9 \\ 0,1/0,9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,111 \end{bmatrix}. \quad (\text{Б.20})$$

ФН нечіткої терм-множини «Допустимий» має форму трикутника (3.3) і будується за такими значеннями: $\mu(0,2)=0$, $\mu(0,4)=0,333$, $\mu(0,6)=1$, $\mu(0,8)=0,111$. Значення ФН «Нормальний», «Аварійно високий» будуюмо відповідно до правила Руспіні.

Побудова ФН термів змінної A_3 = «Відхилення ємності»

Якщо відхилення ємності відсутнє $\pm\Delta C_{i3}=0$, то відхилення ємності належить до терма D_3 = «Допустиме» зі ступенем належності $\mu_{D3}(0)=1$. Якщо відхилення ємності перевищило допустиме нормативне значення $\pm\Delta C_{i3}=1$, то відхилення ємності належить до терма AB_3 = «Аварійно високе» зі ступенем належності $\mu_{AB3}(1)=1$. За правилом Руспіні можна стверджувати, що

$$\mu_{D3}(0)=1 - \mu_{AB3}(0)=0.$$

Експертне опитування показало, що належність $\pm\Delta C_{i3}=0,2$ до множини «Допустиме» має абсолютну перевагу над належністю $\pm\Delta C_{i3}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $\pm\Delta C_{i3}=0,4$ до множини «Допустиме» має істотну перевагу над належністю $\pm\Delta C_{i3}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 5 балів.

За отриманими балами складено матрицю парних порівнянь Сааті для визначення границь ФН

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_1/\lambda_2 \\ \lambda_2/\lambda_1 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/5 \\ 5/9 & 1-\lambda \end{bmatrix}. \quad (\text{Б.21})$$

Визначаємо для матриці Λ_1 найбільше власне число λ

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/5 \\ 5/9 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2. \quad (\text{Б.22})$$

Ступені належності вхідної лінгвістичної змінної «Відхилення ємності» до нечіткої терм-множини «Низький» визначаються за рівнянням

$$\Lambda_1 \Omega_1 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 1,8 \\ 0,555 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{Б.23})$$

Друге рівняння в системі (Б.23) згідно з (3.20) замінюється умовою нормування $\sum_i \omega_i = 1$. Знаходимо вектор, який є розв'язанням цього рівняння

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} 0,643 \\ 0,357 \end{bmatrix}. \quad (\text{Б.24})$$

Нормалізацію отриманих ступенів належності виконаємо шляхом ділення вектора Ω_1 на відповідні максимальні елементи

$$\Omega_1^N = \frac{\Omega_1}{\max\{\Omega_1\}} = \begin{bmatrix} 0,643/0,643 \\ 0,357/0,643 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,555 \end{bmatrix}. \quad (\text{Б.25})$$

ФН нечіткої терм-множини «Допустиме» має форму трапеції (3.4) і будується за такими значеннями: $\mu(0,2)=1$, $\mu(0,4)=0,555$, $\mu(0,6)=0$, $\mu(0,8)=0$. Значення ФН «Аварійно високе» будуюмо згідно з правилом Руспіні.

Побудова ФН термів змінної A_4 = «Надлишкова температурна різниця»

Якщо надлишкова температурна різниця дорівнює нулю $\Delta t_{lim} = 0$, то надлишкова температурна різниця належить до терма P_4 = «Початкова» зі ступенем належності $\mu_{P_4}(0)=1$. Якщо надлишкова температурна різниця досягла верхньої межі за нормативними значеннями $\Delta t_{lim} = 1$, то вона належить до терма P_4 = «Розвинена» зі ступенем належності $\mu_{P_4}(1)=1$. За правилом Руспіні можна стверджувати, що $\mu_{P_4}(0)=1 - \mu_{P_4}(1)=0$.

Експертне опитування показало, що належність $\Delta t_{lim}=0,4$ до множини «Початкова» має абсолютну перевагу над належністю $\Delta t_{lim}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $\Delta t_{lim}=0,6$ до множини «Початкова» має деяку перевагу над належністю $\Delta t_{lim}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 2 бали.

За отриманими балами складено матрицю парних порівнянь Сааті для визначення границь ФН

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_1/\lambda_2 \\ \lambda_2/\lambda_1 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/2 \\ 2/9 & 1-\lambda \end{bmatrix}. \quad (\text{Б.26})$$

Визначаємо для матриці Λ_1 найбільше власне число λ

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/2 \\ 2/9 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2. \quad (\text{Б.27})$$

Ступені належності вхідної лінгвістичної змінної «Надлишкова температурна різниця» до нечіткої терм-множини «Початкова» визначаються за рівнянням

$$\Lambda_1 \Omega_1 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 4,5 \\ 0,222 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{Б.28})$$

Друге рівняння в системі (Б.28) згідно з (3.20) замінюється умовою нормування $\sum_i \omega_i = 1$. Знаходимо вектор, який є розв'язанням цього рівняння

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} 0,818 \\ 0,182 \end{bmatrix}. \quad (\text{Б.29})$$

Нормалізацію отриманих ступенів належності виконаємо шляхом ділення вектора Ω_1 на відповідні максимальні елементи

$$\Omega_1^N = \frac{\Omega_1}{\max\{\Omega_1\}} = \begin{bmatrix} 0,818/0,818 \\ 0,182/0,818 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,222 \end{bmatrix}. \quad (\text{Б.30})$$

ФН нечіткої терм-множини «Початкова» має форму трапеції (3.4) і будується за такими значеннями: $\mu(0,2)=1$, $\mu(0,4)=1$, $\mu(0,6)=0,222$, $\mu(0,8)=0$. Значення ФН «Розвинена» будемо відповідно до правила Руспіні.

Результати розрахунків зведено в таблиці Б.2–Б.5.

Графічне зображення ФН нечітких термів лінгвістичних змінних подано на рис. Б.1–Б.4.

Таблиця Б.2 – Ступені належності нечітким термам значень вхідної величини «Струм небалансу»

$I_{\text{неб.}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{\text{нормальний}}(I_{\text{неб.}})$	1	0,889	0	0	0	0
$\mu_{\text{допустимий}}(I_{\text{неб.}})$	0	0,111	1	0,556	0,111	0
$\mu_{\text{аварійно-високий}}(I_{\text{неб.}})$	0	0	0	0,444	0,889	1

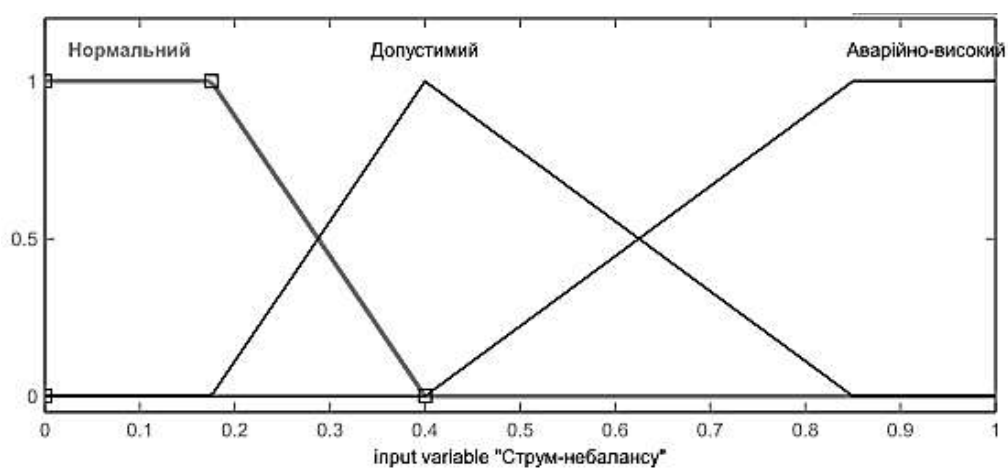


Рисунок Б.1 – ФН термів вхідної лінгвістичної змінної «Струм небалансу»

Таблиця Б.3 – Ступені належності нечітким термам значень вхідної величини «Діелектричні втрати»

$tg\delta_{iz.}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{\text{нормальний}}(tg\delta_{iz.})$	1	1	0,667	0	0	0
$\mu_{\text{допустимий}}(tg\delta_{iz.})$	0	0	0,333	1	0,111	0
$\mu_{\text{аварійно-високий}}(tg\delta_{iz.})$	0	0	0	0	0,889	1

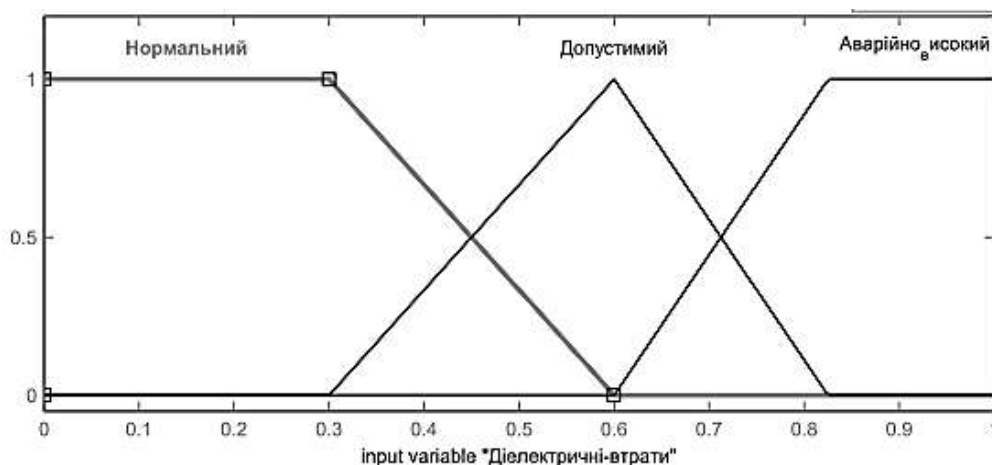


Рисунок Б.2 – ФН термів вхідної лінгвістичної змінної «Діелектричні втрати»

Таблиця Б.4 – Ступені належності нечітким термам значень вхідної величини «Відхилення ємності»

$\pm\Delta C_{із.}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{\text{допустиме}}(\pm\Delta C_{із.})$	1	1	0,555	0	0	0
$\mu_{\text{аварійно-високе}}(\pm\Delta C_{із.})$	0	0	0,445	1	1	1

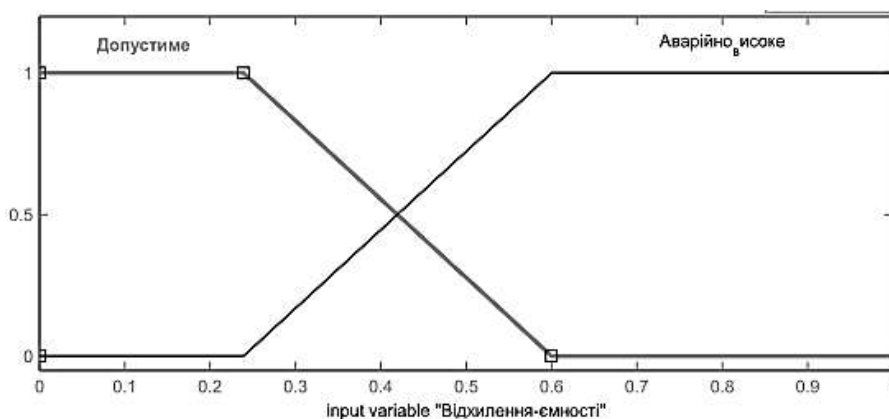


Рисунок Б.3 – ФН термів вхідної лінгвістичної змінної «Відхилення ємності»

Таблиця Б.5 – Ступені належності нечітким термам значень вхідної величини «Надлишкова температурна різниця»

$\Delta t_{\text{lim.}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{\text{початкова}}(\Delta t_{\text{lim.}})$	1	1	1	0,222	0	0
$\mu_{\text{розвинена}}(\Delta t_{\text{lim.}})$	0	0	0	0,778	1	1

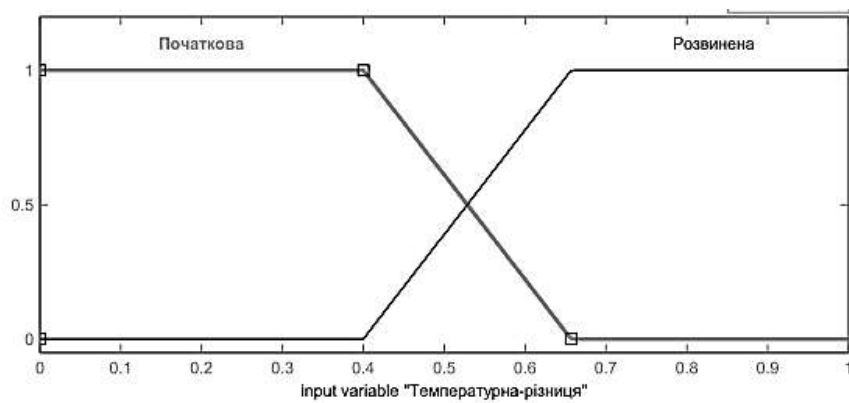


Рисунок Б.4 – ФН термів вхідної лінгвістичної змінної «Надлишкова температурна різниця»

Додаток В

Побудова ФН термів вхідних лінгвістичних змінних нечіткої моделі для оцінення ТС роз'єднувача

Результати обробки експертних опитувань наведено в таблиці В.1.

Таблиця В.1 – Результати обробки експертних оцінок

$A_1 = \text{«Спрацьований механічний ресурс»}$						
$R_{мех.}$, в.о.	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\Pi_1 = \text{«Припрацювальний»}$	9	7	0	0	0	0
$D_1 = \text{«Допустимий»}$	0	2	9	9	6	0
$B_1 = \text{«Відпрацьований»}$	0	0	0	0	3	9
$A_2 = \text{«Надлишкова температурна різниця»}$						
$\Delta t_{lim.}$, в.о.	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\Pi_2 = \text{«Початкова»}$	9	9	9	3	0	0
$P_2 = \text{«Розвинена»}$	0	0	0	6	9	9

Побудова ФН термів змінної $A_1 = \text{«Спрацьований механічний ресурс»}$

Якщо роз'єднувач не здійснював механічних операцій включення-відключення то $R_{мех.} = 0$, то його механічний ресурс належить до терма $\Pi_1 = \text{«Припрацювальний»}$ зі ступенем належності $\mu_{\Pi_1}(0) = 1$. Якщо апарат здійснив нормативну кількість механічних операцій $R_{мех.} = 1$, то його механічний ресурс належить до терма $B_1 = \text{«Відпрацьований»}$ зі ступенем належності $\mu_{B_1}(1) = 1$. За правилом Руспіні можна стверджувати, що

$$\mu_{D_1}(0) = 1 - \mu_{\Pi_1}(0) = 0 \quad \text{та} \quad \mu_{D_1}(1) = 1 - \mu_{B_1}(1) = 0.$$

Експертне опитування показало, що належність $R_{мех.} = 0,2$ до множини «Допустимий» має проміжне значення переваги, між деякою перевагою та однаковою значущістю, над належністю $R_{мех.} = 0,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 2 бали. Належність $R_{мех.} = 0,4$ до множини «Допустимий» має абсолютну перевагу над належністю $R_{мех.} = 0,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $R_{мех.} = 0,6$ до множини «Допустимий» має

абсолютну перевагу над належністю $R_{max}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $R_{max}=0,8$ до множини «Допустимий» має проміжне значення між істотною та очевидною перевагою над належністю $R_{max}=1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється на 6 балів.

За отриманими балами складено матриці парних порівнянь Сааті для визначення границь ФН

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_1/\lambda_2 \\ \lambda_2/\lambda_1 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 2/9 \\ 9/2 & 1-\lambda \end{bmatrix}; \quad (B.1)$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_3/\lambda_4 \\ \lambda_4/\lambda_3 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/6 \\ 6/9 & 1-\lambda \end{bmatrix}. \quad (B.2)$$

Визначаємо для матриць Λ_1 та Λ_2 найбільші власні числа λ

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 2/9 \\ 9/2 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2; \quad (B.3)$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/6 \\ 6/9 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2. \quad (B.4)$$

Ступені належності входної лінгвістичної змінної «Спрацьований механічний ресурс» до нечіткої терм-множини «Допустимий» визначаються за рівняннями

$$\Lambda_1 \Omega_1 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 0,222 \\ 4,5 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (B.5)$$

$$\Lambda_2 \Omega_2 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 1,5 \\ 0,667 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (B.6)$$

Другі рівняння в системах (B.5) та (B.6) згідно з (3.20) замінюються умовою нормування $\sum_i \omega_i = 1$. Знаходимо вектори, які є розв'язанням цих рівнянь

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} 0,182 \\ 0,818 \end{bmatrix}; \quad (B.7)$$

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} 0,6 \\ 0,4 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.8})$$

Нормалізацію отриманих ступенів належності виконаємо шляхом ділення векторів Ω_1 та Ω_2 на відповідні максимальні елементи

$$\Omega_1^N = \frac{\Omega_1}{\max\{\Omega_1\}} = \begin{bmatrix} 0,4/0,6 \\ 0,6/0,6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,222 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (\text{B.9})$$

$$\Omega_2^N = \frac{\Omega_2}{\max\{\Omega_2\}} = \begin{bmatrix} 0,75/0,75 \\ 0,25/0,75 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,667 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.10})$$

ФН нечіткої терм-множини «Допустимий» має форму трапеції (3.4) і будується за такими значеннями: $\mu(0,2)=0,222$, $\mu(0,4)=1$, $\mu(0,6)=1$, $\mu(0,8)=0,667$. Значення ФН «Припрацювальний», «Відпрацьований» будуюмо відповідно до правила Руспіні.

Побудова ФН термів змінної $A_2 = \text{«Надлишкова температурна різниця»}$

Якщо надлишкова температурна різниця дорівнює нулю $\Delta t_{lim} = 0$, то надлишкова температурна різниця належить до терма $P_2 = \text{«Початкова»}$ зі ступенем належності $\mu_{P_2}(0)=1$. Якщо надлишкова температурна різниця досягла верхньої межі за нормативними значеннями $\Delta t_{lim} = 1$, то вона належить до терма $P_2 = \text{«Розвинена»}$ зі ступенем належності $\mu_{P_2}(1)=1$. За правилом Руспіні можна стверджувати, що $\mu_{P_2}(0)=1 - \mu_{P_2}(1)=0$.

Експертне опитування показало, що належність $\Delta t_{lim} = 0,2$ до множини «Початкова» має абсолютну перевагу над належністю $\Delta t_{lim} = 1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $\Delta t_{lim} = 0,4$ до множини «Початкова» має абсолютну перевагу над належністю $\Delta t_{lim} = 1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 9 балів. Належність $\Delta t_{lim} = 0,6$ до множини «Початкова» має деяку перевагу над належністю $\Delta t_{lim} = 1,0$ до цієї самої множини. За шкалою парних порівнянь Сааті перевага оцінюється в 3 бали.

За отриманими балами складено матрицю парних порівнянь Сааті для визначення границь ФН

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda_1/\lambda_2 \\ \lambda_2/\lambda_1 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/3 \\ 3/9 & 1-\lambda \end{bmatrix}. \quad (\text{B.11})$$

Визначаємо для матриці Λ_1 найбільше власне число λ

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 9/3 \\ 3/9 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda = 2. \quad (\text{B.12})$$

Ступені належності вхідної лінгвістичної змінної «Надлишкова температурна різниця» до нечіткої терм-множини «Початкова» визначаються за рівнянням

$$\Lambda_1 \Omega_1 = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 3 \\ 0,333 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.13})$$

Друге рівняння в системі (B.13) згідно з (3.20) замінюється умовою нормування $\sum_i \omega_i = 1$. Знаходимо вектор, який є розв'язанням цього рівняння

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} 0,75 \\ 0,25 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.14})$$

Нормалізацію отриманих ступенів належності виконаємо шляхом ділення вектора Ω_1 на відповідні максимальні елементи

$$\Omega_1^N = \frac{\Omega_1}{\max\{\Omega_1\}} = \begin{bmatrix} 0,75/0,75 \\ 0,25/0,75 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,333 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.15})$$

ФН нечіткої терм-множини «Початкова» має форму трапеції (3.4) і будується за такими значеннями: $\mu(0,2)=1$, $\mu(0,4)=1$, $\mu(0,6)=0,333$, $\mu(0,8)=0$. Значення ФН «Розвинена» будуюмо згідно з правилом Руспіні.

Результати розрахунків зведено в табл. В.2–В.3. Графічне зображення ФН нечітких термів лінгвістичних змінних подано на рис. В.1–В.2.

Таблиця В.2 – Ступені належності нечітким термам значень вхідної величини «Спрацьований механічний ресурс»

$R_{\text{мех.}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{\text{припрацьований}}(R_{\text{мех.}})$	1	0,778	0	0	0	0
$\mu_{\text{допустимий}}(R_{\text{мех.}})$	0	0,222	1	1	0,667	0
$\mu_{\text{відпрацьований}}(R_{\text{мех.}})$	0	0	0	0	0,333	1

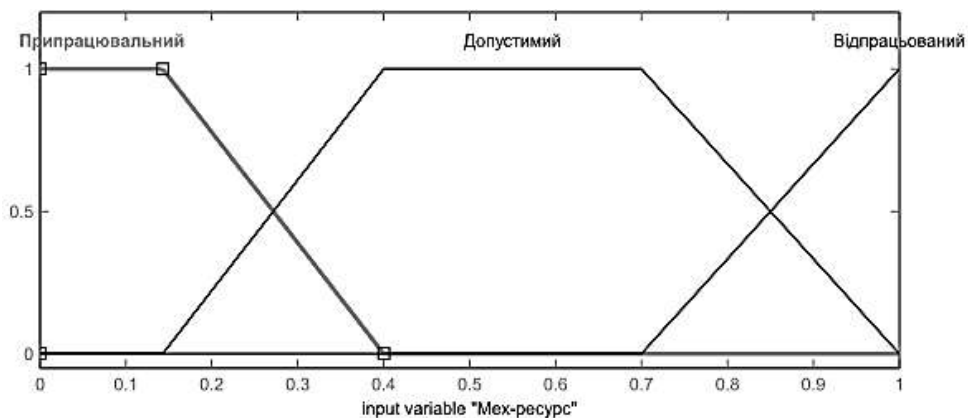


Рисунок В.1 – ФН термів вхідної лінгвістичної змінної «Спрацьований механічний ресурс»

Таблиця В.3 – Ступені належності нечітким термам значень вхідної величини «Надлишкова температурна різниця»

Δt_{lim}	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{\text{початкова}}(\Delta t_{\text{lim}})$	1	1	1	0,333	0	0
$\mu_{\text{розвинена}}(\Delta t_{\text{lim}})$	0	0	0	0,667	1	1

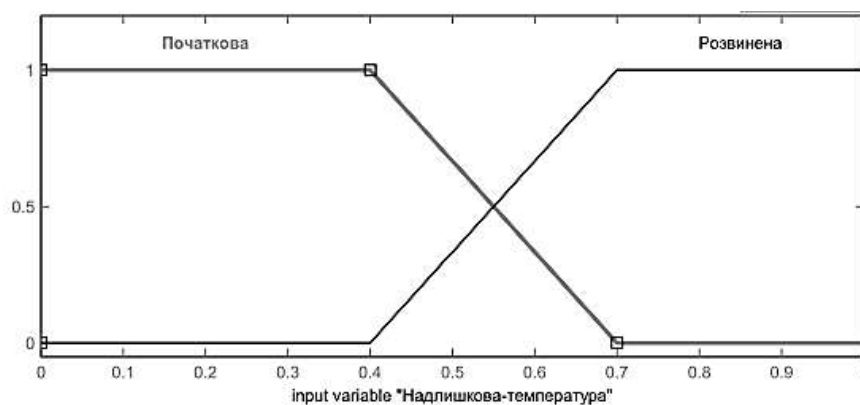


Рисунок В.2 – ФН термів вхідної лінгвістичної змінної «Надлишкова температурна різниця»

Додаток Г

**Розрахунок ймовірності відмови електрообладнання комірки
високовольтного вимикача**

**Г.1 Розрахунок ймовірності відмови високовольтного вимикача
на інтервалі 1 рік**

Апріорна ймовірність відмови та безвідмовної роботи високовольтного вимикача

$$p(H_1) = \frac{0,642 - 0,636}{1 - 0,636} = 0,017; \quad (\text{Г.1.1})$$

$$p(H_2) = 1 - p(H_1) = 0,983. \quad (\text{Г.1.2})$$

За виразами (4.40)–(4.44) знайдемо ступені належності $\mu(S)$ до вхідної множини $S = \{x_1, x_2, \dots, x_5\}$

$$\mu_H(S) = \begin{cases} 1 - \frac{0,28 - S}{0,18}; & 0,28 \geq S \geq 0,1; \\ 1 - \frac{S - 0,28}{0,22}; & 0,28 < S \leq 0,5; \\ 0; & 0,1 > S > 0,5. \end{cases} \Rightarrow \mu_H(S) = 0,605; \quad (\text{Г.1.3})$$

$$\mu_C(S) = \begin{cases} 1 - \frac{0,5 - S}{0,22}; & 0,5 \geq S \geq 0,28; \\ 1 - \frac{S - 0,5}{0,22}; & 0,5 < S \leq 0,72; \\ 0; & 0,28 > S > 0,72. \end{cases} \Rightarrow \mu_C(S) = 0,395; \quad (\text{Г.1.4})$$

Згідно з (5.7)–(5.8) знайдемо

$$\begin{bmatrix} y_{p5} \\ y_{p4} \\ y_{p3} \\ y_{p2} \\ y_{p1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,407 & 0,291 & 0,072 & 0,047 & 0,035 \\ 0,254 & 0,398 & 0,166 & 0,092 & 0,092 \\ 0,226 & 0,167 & 0,486 & 0,212 & 0,144 \\ 0,082 & 0,111 & 0,203 & 0,432 & 0,312 \\ 0,031 & 0,033 & 0,073 & 0,216 & 0,417 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,395 \\ 0,605 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,072 \\ 0,166 \\ 0,395 \\ 0,432 \\ 0,216 \end{bmatrix}; \quad (\text{Г.1.5})$$

$$\begin{bmatrix} y_{q5} \\ y_{q4} \\ y_{q3} \\ y_{q2} \\ y_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,03 & 0,04 & 0,063 & 0,243 & 0,39 \\ 0,1 & 0,105 & 0,215 & 0,402 & 0,292 \\ 0,19 & 0,166 & 0,462 & 0,197 & 0,187 \\ 0,274 & 0,403 & 0,192 & 0,121 & 0,101 \\ 0,406 & 0,286 & 0,067 & 0,037 & 0,03 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,395 \\ 0,605 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,243 \\ 0,402 \\ 0,395 \\ 0,192 \\ 0,067 \end{bmatrix}. \quad (\text{Г.1.6})$$

Числові значення y_{p0} та y_{q0} знайдемо за виразами (5.11)–(5.12).

$$y_{p0} = \frac{0,216 \cdot 0,1 + 0,432 \cdot 0,28 + 0,395 \cdot 0,5 + 0,166 \cdot 0,72 + 0,072 \cdot 0,9}{0,216 + 0,432 + 0,395 + 0,166 + 0,072} = 0,41; \quad (\text{Г.1.7})$$

$$y_{q0} = \frac{0,067 \cdot 0,1 + 0,192 \cdot 0,28 + 0,395 \cdot 0,5 + 0,402 \cdot 0,72 + 0,243 \cdot 0,9}{0,067 + 0,192 + 0,395 + 0,402 + 0,243} = 0,59. \quad (\text{Г.1.8})$$

Умовні значення ймовірності відмови $p(B/H_1)$ та безвідмовної роботи $p(B/H_2)$ за певним ТС знайдемо за виразами (5.13)–(5.14):

$$y_{p0} = P_p = p(B/H_1) = 0,41; \quad (\text{Г.1.9})$$

$$y_{q0} = P_q = p(B/H_2) = 0,59. \quad (\text{Г.1.10})$$

За визначеними апіорними (6.2)–(6.3) та умовними (6.11)–(6.12) ймовірностями відмови та безвідмовної роботи високовольтного вимикача визначимо за теоремою Байєса (5.26) апостеріорну ймовірність відмови високовольтного вимикача на інтервалі часу Δt :

$$p(H_1/B) = \frac{p(H_1) \cdot p(B/H_1)}{p(H_1) \cdot p(B/H_1) + p(H_2) \cdot p(B/H_2)} = \frac{0,436 \cdot 0,803}{0,436 \cdot 0,803 + 0,564 \cdot 0,206} = 0,107. \quad (\text{Г.1.11})$$

Г.2 Розрахунок ймовірності відмови трансформатора струму на інтервалі 1 рік

Апіорна ймовірність відмови та безвідмовної роботи трансформатора струму

$$p(H_1) = \frac{0,649 - 0,491}{1 - 0,491} = 0,31; \quad (\text{Г.2.1})$$

$$p(H_2) = 1 - p(H_1) = 0,69. \quad (\text{Г.2.2})$$

За виразами (4.40)–(4.44) знайдемо ступені належності $\mu(S)$ до вхідної множини $S = \{x_1, x_2, \dots, x_5\}$

$$\mu_B(S) = \begin{cases} 1 - \frac{0,72 - S}{0,22}; & 0,72 \geq S \geq 0,5; \\ 1 - \frac{S - 0,72}{0,18}; & 0,72 < S \leq 0,9; \\ 0; & 0,5 > S > 0,9. \end{cases} \Rightarrow \mu_B(S) = 0,028; \quad (\Gamma.2.3)$$

$$\mu_{ДВ}(S) = \begin{cases} 1; & S > 0,9; \\ 1 - \frac{0,9 - S}{0,18}; & 0,72 \leq S \leq 0,9; \\ 0; & S < 0,72. \end{cases} \Rightarrow \mu_{ДВ}(S) = 0,972; \quad (\Gamma.2.4)$$

Згідно з (5.7)–(5.8) знайдемо

$$\begin{bmatrix} y_{p5} \\ y_{p4} \\ y_{p3} \\ y_{p2} \\ y_{p1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,817 & 0,149 & 0,004 & 0,004 & 0,003 \\ 0,114 & 0,753 & 0,091 & 0,043 & 0,025 \\ 0,047 & 0,072 & 0,735 & 0,115 & 0,061 \\ 0,016 & 0,021 & 0,155 & 0,74 & 0,148 \\ 0,005 & 0,005 & 0,017 & 0,098 & 0,764 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 0,972 \\ 0,028 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,817 \\ 0,114 \\ 0,047 \\ 0,021 \\ 0,005 \end{bmatrix}; \quad (\Gamma.2.5)$$

$$\begin{bmatrix} y_{q5} \\ y_{q4} \\ y_{q3} \\ y_{q2} \\ y_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,005 & 0,004 & 0,004 & 0,164 & 0,814 \\ 0,022 & 0,042 & 0,088 & 0,732 & 0,113 \\ 0,064 & 0,111 & 0,726 & 0,083 & 0,048 \\ 0,144 & 0,742 & 0,159 & 0,017 & 0,019 \\ 0,765 & 0,099 & 0,022 & 0,006 & 0,005 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 0,972 \\ 0,028 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,005 \\ 0,028 \\ 0,064 \\ 0,144 \\ 0,765 \end{bmatrix}. \quad (\Gamma.2.6)$$

Числові значення y_{p0} та y_{q0} знайдемо за виразами (5.11)–(5.12).

$$y_{p0} = \frac{0,005 \cdot 0,1 + 0,021 \cdot 0,28 + 0,047 \cdot 0,5 + 0,114 \cdot 0,72 + 0,817 \cdot 0,9}{0,005 + 0,021 + 0,047 + 0,114 + 0,817} = 0,844; \quad (\Gamma.2.7)$$

$$y_{q0} = \frac{0,765 \cdot 0,1 + 0,144 \cdot 0,28 + 0,064 \cdot 0,5 + 0,028 \cdot 0,72 + 0,005 \cdot 0,9}{0,765 + 0,144 + 0,064 + 0,028 + 0,005} = 0,162. \quad (\Gamma.2.8)$$

Умовні значення ймовірності відмови $p(B/H_1)$ та безвідмовної роботи $p(B/H_2)$ за певним ТС знайдемо за виразами (5.13)–(5.14):

$$y_{p0} = P_p = p(B/H_1) = 0,844; \quad (\Gamma.2.9)$$

$$y_{q0} = P_q = p(B/H_2) = 0,162. \quad (\Gamma.2.10)$$

За певними апіорними (6.2)–(6.3) та умовними (6.11)–(6.12) ймовірностями відмови та безвідмовної роботи трансформатора струму визначимо за теоремою Байєса (5.26) апостеріорну ймовірність відмови трансформатора струму на інтервалі часу Δt :

$$p(H_1/B) = \frac{p(H_1) \cdot p(B/H_1)}{p(H_1) \cdot p(B/H_1) + p(H_2) \cdot p(B/H_2)} = \frac{0,69 \cdot 0,844}{0,69 \cdot 0,844 + 0,31 \cdot 0,162} = 0,921. \quad (\text{Г.2.11})$$

Г.3 Розрахунок ймовірності відмови роз'єднувачів на інтервалі 1 рік

Апіорна ймовірність відмови та безвідмовної роботи роз'єднувача

$$p(H_1) = \frac{0,435 - 0,429}{1 - 0,429} = 0,011; \quad (\text{Г.3.1})$$

$$p(H_2) = 1 - p(H_1) = 0,989. \quad (\text{Г.3.2})$$

За виразами (4.40)–(4.44) знайдемо ступені належності $\mu(S)$ до вхідної множини $S = \{x_1, x_2, \dots, x_5\}$

Роз'єднувач Л-229-1

$$\mu_{\text{дн}}(S) = \begin{cases} 1; & S \leq 0,1; \\ 1 - \frac{S - 0,1}{0,18}; & 0,1 \leq S \leq 0,28; \\ 0; & S \geq 0,28. \end{cases} \Rightarrow \mu_{\text{дн}}(S) = 0,483; \quad (\text{Г.3.3})$$

$$\mu_{\text{н}}(S) = \begin{cases} 1 - \frac{0,28 - S}{0,18}; & 0,28 \geq S \geq 0,1; \\ 1 - \frac{S - 0,28}{0,22}; & 0,28 < S \leq 0,5; \\ 0; & 0,1 > S > 0,5. \end{cases} \Rightarrow \mu_{\text{н}}(S) = 0,517; \quad (\text{Г.3.4})$$

Згідно з (5.7)–(5.8) знайдемо

$$\begin{bmatrix} y_{p5} \\ y_{p4} \\ y_{p3} \\ y_{p2} \\ y_{p1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,493 & 0,291 & 0,072 & 0,047 & 0,035 \\ 0,389 & 0,498 & 0,266 & 0,122 & 0,092 \\ 0,263 & 0,227 & 0,486 & 0,212 & 0,144 \\ 0,112 & 0,115 & 0,203 & 0,432 & 0,312 \\ 0,091 & 0,033 & 0,073 & 0,216 & 0,417 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,517 \\ 0,483 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,047 \\ 0,122 \\ 0,212 \\ 0,432 \\ 0,417 \end{bmatrix}; \quad (\text{Г.3.5})$$

$$\begin{bmatrix} y_{q5} \\ y_{q4} \\ y_{q3} \\ y_{q2} \\ y_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,03 & 0,04 & 0,063 & 0,243 & 0,454 \\ 0,1 & 0,105 & 0,215 & 0,403 & 0,283 \\ 0,19 & 0,206 & 0,462 & 0,197 & 0,186 \\ 0,274 & 0,463 & 0,192 & 0,121 & 0,106 \\ 0,476 & 0,266 & 0,067 & 0,037 & 0,04 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,517 \\ 0,483 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,454 \\ 0,403 \\ 0,197 \\ 0,121 \\ 0,04 \end{bmatrix}. \quad (\text{Г.3.6})$$

Числові значення y_{p0} та y_{q0} знайдемо за виразами (5.11)–(5.12).

$$y_{p0} = \frac{0,417 \cdot 0,1 + 0,432 \cdot 0,28 + 0,212 \cdot 0,5 + 0,122 \cdot 0,72 + 0,047 \cdot 0,9}{0,417 + 0,432 + 0,212 + 0,122 + 0,047} = 0,324; \quad (\text{Г.3.7})$$

$$y_{q0} = \frac{0,04 \cdot 0,1 + 0,121 \cdot 0,28 + 0,197 \cdot 0,5 + 0,403 \cdot 0,72 + 0,454 \cdot 0,9}{0,04 + 0,121 + 0,197 + 0,403 + 0,454} = 0,689. \quad (\text{Г.3.8})$$

Умовні значення ймовірності відмови $p(B/H_1)$ та безвідмовної роботи $p(B/H_2)$ за певним ТС знайдемо за виразами (5.13)–(5.14):

$$y_{p0} = P_p = p(B/H_1) = 0,324; \quad (\text{Г.3.9})$$

$$y_{q0} = P_q = p(B/H_2) = 0,689. \quad (\text{Г.3.10})$$

За певними апіорними (6.2)–(6.3) та умовними (6.11)–(6.12) ймовірностями відмови та безвідмовної роботи роз'єднувача, визначимо за теоремою Байєса (5.26) апостеріорну ймовірність відмови роз'єднувача на інтервалі часу Δt

$$p(H_1/B) = \frac{p(H_1) \cdot p(B/H_1)}{p(H_1) \cdot p(B/H_1) + p(H_2) \cdot p(B/H_2)} = \frac{0,011 \cdot 0,324}{0,011 \cdot 0,324 + 0,989 \cdot 0,689} = 0,005. \quad (\text{Г.3.11})$$

Роз'єднувач Л-229-2

$$\mu_{дн}(S) = \begin{cases} 1; & S \leq 0,1; \\ 1 - \frac{S - 0,1}{0,18}; & 0,1 \leq S \leq 0,28; \\ 0; & S \geq 0,28. \end{cases} \Rightarrow \mu_{дн}(S) = 1. \quad (\text{Г.3.12})$$

Згідно з (5.7)–(5.8) знайдемо

$$\begin{bmatrix} y_{p5} \\ y_{p4} \\ y_{p3} \\ y_{p2} \\ y_{p1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,493 & 0,291 & 0,072 & 0,047 & 0,035 \\ 0,389 & 0,498 & 0,266 & 0,122 & 0,092 \\ 0,263 & 0,227 & 0,486 & 0,212 & 0,144 \\ 0,112 & 0,115 & 0,203 & 0,432 & 0,312 \\ 0,091 & 0,033 & 0,073 & 0,216 & 0,417 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,035 \\ 0,092 \\ 0,144 \\ 0,312 \\ 0,417 \end{bmatrix}; \quad (\text{Г.3.13})$$

$$\begin{bmatrix} y_{q5} \\ y_{q4} \\ y_{q3} \\ y_{q2} \\ y_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,03 & 0,04 & 0,063 & 0,243 & 0,454 \\ 0,1 & 0,105 & 0,215 & 0,403 & 0,283 \\ 0,19 & 0,206 & 0,462 & 0,197 & 0,186 \\ 0,274 & 0,463 & 0,192 & 0,121 & 0,106 \\ 0,476 & 0,266 & 0,067 & 0,037 & 0,04 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,454 \\ 0,283 \\ 0,186 \\ 0,106 \\ 0,04 \end{bmatrix}. \quad (\text{Г.3.14})$$

Числові значення y_{p0} та y_{q0} знайдемо за виразами (5.11)–(5.12)

$$y_{p0} = \frac{0,417 \cdot 0,1 + 0,312 \cdot 0,28 + 0,144 \cdot 0,5 + 0,092 \cdot 0,72 + 0,035 \cdot 0,9}{0,417 + 0,312 + 0,144 + 0,092 + 0,035} = 0,298; \quad (\text{Г.3.15})$$

$$y_{q0} = \frac{0,04 \cdot 0,1 + 0,106 \cdot 0,28 + 0,186 \cdot 0,5 + 0,283 \cdot 0,72 + 0,454 \cdot 0,9}{0,04 + 0,106 + 0,186 + 0,283 + 0,454} = 0,691. \quad (\text{Г.3.16})$$

Умовні значення ймовірності відмови $p(B/H_1)$ та безвідмовної роботи $p(B/H_2)$ за певним ТС знайдемо за виразами (5.13)–(5.14).

$$y_{p0} = P_p = p(B/H_1) = 0,298; \quad (\text{Г.3.17})$$

$$y_{q0} = P_q = p(B/H_2) = 0,691. \quad (\text{Г.3.18})$$

За певними апіорними (6.2)–(6.3) та умовними (6.11)–(6.12) ймовірностями відмови та безвідмовної роботи роз'єднувача, визначимо за формулою Байеса (5.26) апостеріорну ймовірність відмови роз'єднувача на інтервалі часу Δt

$$p(H_1/B) = \frac{p(H_1) \cdot p(B/H_1)}{p(H_1) \cdot p(B/H_1) + p(H_2) \cdot p(B/H_2)} = \frac{0,011 \cdot 0,324}{0,011 \cdot 0,324 + 0,989 \cdot 0,689} = 0,0048. \quad (\text{Г.3.19})$$

Додаток Д

Побудова причинно-наслідкових матриць для оцінення умовних ймовірностей $p(B/H_1)$ та $p(B/H_2)$

Д.1 Побудова причинно-наслідкової матриці R_p для оцінення ймовірності $p(B/H_1)$

Будуємо за аналогією [60, С. 173] згідно з (5.7)–(5.8) причинно-наслідкові матриці для кожної вхідної ознаки та вихідних альтернатив Y_p .

а) За дуже великого загального спрацьованого ресурсу x_1 трансформатора струму умовна ймовірність $p(B/H_1)$ буде дуже високою (y_{p1}). За повною шкалою Харрінгтона [134,137] складається матриця парного оцінювання Сааті.

x_1	y_{p1}	y_{p2}	y_{p3}	y_{p4}	y_{p5}	Σ	r_{i1}
y_{p1}	1	17	42	73	96	229	0,817
y_{p2}	0,059	1	5	9	17	32,059	0,114
y_{p3}	0,024	0,2	1	4	8	13,224	0,047
y_{p4}	0,014	0,111	0,25	1	3	4,375	0,016
y_{p5}	0,01	0,059	0,125	0,333	1	1,527	0,005
Σ						280,185	1

б) За великому великого загального спрацьованого ресурсу x_2 трансформатора струму умовна ймовірність $p(B/H_1)$ буде високою (y_{p2}). Складемо матрицю парного оцінювання Сааті.

x_2	y_{p1}	y_{p2}	y_{p3}	y_{p4}	y_{p5}	Σ	r_{i2}
y_{p1}	1	0,056	4	12	21	38,056	0,149
y_{p2}	18	1	26	53	94	192	0,753
y_{p3}	0,25	0,038	1	5	12	18,288	0,072
y_{p4}	0,083	0,019	0,2	1	4	5,302	0,021
y_{p5}	0,048	0,011	0,083	0,25	1	1,392	0,005
Σ						255,038	1

в) За середнього загального спрацьованого ресурсу x_3 трансформатора струму умовна ймовірність $p(B/H_1)$ буде середньою (y_{p3}). Складемо матрицю парного оцінювання Сааті.

x_3	y_{p1}	y_{p2}	y_{p3}	y_{p4}	y_{p5}	Σ	r_{i3}
y_{p1}	1	0,059	0,011	0,048	0,2	1,318	0,004
y_{p2}	17	1	0,024	0,077	15	33,101	0,091
y_{p3}	89	41	1	43	92	266	0,735
y_{p4}	21	13	0,023	1	21	56,023	0,155
y_{p5}	5	0,067	0,011	0,048	1	6,126	0,017
Σ						362,568	1

г) За малого загального спрацьованого ресурсу x_4 трансформатора струму умовна ймовірність $p(B/H_1)$ буде низькою (y_{p4}). Складемо матрицю парного оцінювання Сааті.

x_4	y_{p1}	y_{p2}	y_{p3}	y_{p4}	y_{p5}	Σ	r_{i4}
y_{p1}	1	0,083	0,038	0,01	0,063	1,194	0,004
y_{p2}	12	1	0,125	0,014	0,1	13,239	0,043
y_{p3}	26	8	1	0,037	0,333	35,367	0,115
y_{p4}	97	71	27	1	32	288	0,74
y_{p5}	16	10	3	0,031	1	30,031	0,098
Σ						307,831	1

д) За дуже малого загального спрацьованого ресурсу x_5 трансформатора струму умовна ймовірність $p(B/H_1)$ буде дуже низькою (y_{p5}). Складемо матрицю парного оцінювання Сааті.

x_5	y_{p1}	y_{p2}	y_{p3}	y_{p4}	y_{p5}	Σ	r_{i5}
y_{p1}	1	0,167	0,083	0,043	0,011	1,304	0,003
y_{p2}	6	1	0,2	0,071	0,014	7,285	0,025
y_{p3}	12	5	1	0,167	0,024	18,191	0,061
y_{p4}	23	14	6	1	0,056	44,056	0,148
y_{p5}	95	72	41	18	1	227	0,764
Σ						296,543	1

За таблицями причинно-наслідкових співвідношень оцінок умовної ймовірності $p(B/H_1)$ складено зведену таблицю оцінювання вихідних альтернатив, яка є матрицею причинно-наслідкових відношень R_p .

R_p	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
y_{p1}	0,817	0,149	0,004	0,004	0,003
y_{p2}	0,114	0,753	0,091	0,043	0,025
y_{p3}	0,047	0,072	0,735	0,115	0,061
y_{p4}	0,016	0,021	0,155	0,74	0,148
y_{p5}	0,005	0,005	0,017	0,098	0,764

Д.2 Побудова причинно-наслідкової матриці R_q для оцінення ймовірності $p(B/H_2)$

Будуємо за аналогією [60, С. 176] згідно з (5.7)–(5.8) причинно-наслідкові матриці для кожної вхідної ознаки та вихідних альтернатив Y_q .

а) У випадку дуже великого загального спрацьованого ресурсу x_1 трансформатора струму умовна ймовірність $p(B/H_2)$ буде дуже низькою (y_{q1}). Складемо матрицю парного оцінювання Сааті.

x_1	y_{q1}	y_{q2}	y_{q3}	y_{q4}	y_{q5}	Σ	r_{i1}
y_{q1}	1	0,2	0,077	0,045	0,011	1,333	0,005
y_{q2}	5	1	0,25	0,077	0,014	6,341	0,022
y_{q3}	13	4	1	0,2	0,026	18,226	0,064
y_{q4}	22	13	5	1	0,067	41,067	0,144
y_{q5}	92	71	39	15	1	218	0,765
Σ						284,967	1

б) У разі великого загального спрацьованого ресурсу x_2 трансформатора струму умовна ймовірність $p(B/H_2)$ буде низькою (y_{q2}). Складемо матрицю парного оцінювання Сааті.

x_2	y_{q1}	y_{q2}	y_{q3}	y_{q4}	y_{q5}	Σ	r_{i2}
y_{q1}	1	0,091	0,042	0,011	0,071	1,215	0,004
y_{q2}	11	1	0,143	0,015	0,091	12,249	0,042
y_{q3}	24	7	1	0,042	0,333	32,375	0,111
y_{q4}	93	69	24	1	29	216	0,742
y_{q5}	14	11	3	0,035	1	29,035	0,099
Σ						290,874	1

в) У випадку середнього загального спрацьованого ресурсу x_3 трансформатора струму умовна ймовірність $p(B/H_2)$ буде середньою (y_{q3}). Складемо матрицю парного оцінювання Сааті.

x_3	y_{q1}	y_{q2}	y_{q3}	y_{q4}	y_{q5}	Σ	r_{i3}
y_{q1}	1	0,067	0,012	0,043	0,143	1,265	0,004
y_{q2}	15	1	0,024	0,071	17	33,095	0,088
y_{q3}	93	42	1	44	93	273	0,726
y_{q4}	23	14	0,023	1	22	60,023	0,159
y_{q5}	7	0,059	0,012	0,046	1	8,117	0,022
Σ						375,5	1

г) У випадку малого загального спрацьованого ресурсу x_4 трансформатора струму умовна ймовірність $p(B/H_2)$ буде високою (y_{q4}). Складемо матрицю парного оцінювання Сааті.

x_4	y_{q1}	y_{q2}	y_{q3}	y_{q4}	y_{q5}	Σ	r_{i4}
y_{q1}	1	0,059	5	13	23	42,059	0,164
y_{q2}	17	1	24	54	92	188	0,732
y_{q3}	0,2	0,042	1	6	14	21,242	0,083
y_{q4}	0,077	0,019	0,167	1	3	4,263	0,017
y_{q5}	0,043	0,011	0,071	0,333	1	1,458	0,006
Σ						257,022	1

д) У разі дуже малого загального спрацьованого ресурсу x_5 трансформатора струму умовна ймовірність $p(B/H_2)$ буде дуже високою (y_{q5}). Складемо матрицю парного оцінювання Сааті.

x_5	y_{q1}	y_{q2}	y_{q3}	y_{q4}	y_{q5}	Σ	r_{i5}
y_{q1}	1	16	41	72	93	223	0,814
y_{q2}	0,063	1	4	8	18	31,063	0,113
y_{q3}	0,024	0,25	1	3	9	13,274	0,048
y_{q4}	0,014	0,125	0,333	1	4	5,472	0,019
y_{q5}	0,011	0,056	0,111	0,25	1	1,428	0,005
Σ						274,237	1

За таблицями причинно-наслідкових співвідношень оцінок умовної ймовірності $p(B/H_2)$ складено зведену таблицю оцінювання вихідних альтернатив, яка є матрицею причинно-наслідкових відношень R_q .

R_p	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
y_{p1}	0,005	0,004	0,004	0,164	0,814
y_{p2}	0,022	0,042	0,088	0,732	0,113
y_{p3}	0,064	0,111	0,726	0,083	0,048
y_{p4}	0,144	0,742	0,159	0,017	0,019
y_{p5}	0,765	0,099	0,022	0,006	0,005



«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор
ТОВ «Енергоавтоматизація»
С.М. Рассальська
«29» жовтня 2020р.

АКТ № 136 – 10/20

впровадження результатів дисертації доктора філософії

Комісія у складі:

- начальник відділу систем моніторингу ТОВ «Енергоавтоматизація» Спиця А.Г.;
- заступник начальника відділу систем моніторингу ТОВ «Енергоавтоматизація» Одіяка К.В.

Дата та місце складання: 29.10.2020р., м.Запоріжжя.

Головні висновки комісії:

1. Результати, отримані здобувачем ступеню доктора філософії, аспірантом кафедри електричних та електронних апаратів, Доморощиним Сергієм Вікторовичем під час виконання ним дисертації, впроваджені, в рамках дослідної експлуатації, при виробництві системи безперервного контролю (моніторингу) обладнання розподільчих пристроїв для ПС 500кВ «Нура» (Республіка Казахстан). Впроваджено:

- узагальнену нечітку математичну модель визначення технічного стану електрообладнання розподільчих пристроїв високої напруги;
- ймовірно-топологічний метод прогнозування ризиків порушення роботи розподільчих пристроїв високої напруги.

2. Доморощин С.В. розробив нову узагальнену нечітку математичну модель визначення технічного стану відповідального обладнання розподільчих пристроїв високої напруги (обладнання комірок високовольтних вимикачів, апаратів захисту від перенапруг), яка базується на математичному апараті нечіткої логіки та експертній інформації. При побудові моделі, їм запропоновано:

- при визначенні технічного стану електрообладнання використовувати найбільш інформативні параметри які можливо виміряти в процесі експлуатації – стан ізоляції, тепловий стан, комутаційні та механічні показники;
- при побудові математичної моделі, залучати експертний досвід щодо процесів які відбуваються в елементах електрообладнання під впливом визначених параметрів.

3. Доморощиним С.В. запропоновано удосконалений метод прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання, який використовує методи нечіткої логіки та теорії ймовірності. Удосконалений метод дозволяє прогнозувати залишковий ресурс в режимі безперервного контролю на інтервалі 1 рік наступного електрообладнання:

- обмежувачів перенапруг, розрядників;
- високовольтних елегазових вимикачів;

- трансформаторів струму;
- роз'єднувачів;
- комірок високовольтних вимикачів.

4. Доморошиним С.В. розроблений ймовірно-топологічний метод визначення ймовірності порушення роботи розподільчого пристрою високої напруги, який базується на ймовірнісних показниках залишкового ресурсу електрообладнання та топологічному впливу, який визначається структурною схемою розподільчої установки.

5. Доморошиним С.В. формалізована задача ризик-аналізу наслідків порушення роботи розподільчого пристрою, за яким можливо розрахувати ймовірність матеріальних збитків від наслідків аварії, недовідпуску електричної енергії та відновлення працездатності електрообладнання.

6. Запропоновані Доморошиним С.В. методи та моделі розширюють базу знань, та спрямовані на: підвищення точності прогнозування ресурсу електрообладнання розподільчих пристроїв високої напруги (очікуване значення – до 10%); підвищення точності при плануванні розподілу фінансових активів підприємств електроенергетики (орієнтовно на 15%).

7. Запропоновані моделі, наукові положення, висновки та рекомендації, викладені у дисертаційній роботі можуть бути корисними при створенні нових систем безперервного контролю у ТОВ «Енергоавтоматизація».

Від ТОВ «Енергоавтоматизація»:

Начальник відділу систем моніторингу



А.Г. Спиця

Заступник начальника відділу систем моніторингу



К.В. Одіяка

Додаток Ж**Список публікацій здобувача**

1. Доморошин С. В. Визначення спрацьованого ресурсу елегазового вимикача типу HGF 100/2 В,С GEC ALSTOM за нечіткою моделлю / С. В. Доморошин, П. В. Махлін // Електротехніка та електроенергетика. – 2016. – № 2. – С. 72–81.
2. Доморошин С. В. Оцінювання ймовірності відмови елегазових вимикачів «GEC ALSTOM» на інтервалі часу / С. В. Доморошин, В. В. Літвінов // Гідроенергетика України. – 2018. – №1–2. – С. 39–44.
3. Доморошин С. В. Нечітке моделювання ймовірності відмови апаратів захисту від перенапруг / С. В. Доморошин, О. А. Сахно // Електротехніка та електроенергетика. – 2018. – № 3. – С. 39–51.
4. Sakhno A. A. Improvement of the nonequilibrium-compensation method for state diagnostics of high-voltage apparatus with condenser insulation / A. A. Sakhno, L. S. Skrupskaya, S. V. Domoroshchyn // Electrical engineering and power engineering. – 2019. – № 4. – P. 56–64.
5. S. Domoroshchyn Estimating the failure probability of an instrument transformer cell in the high voltage distributing device using an expert-statistical method / S. Domoroshchyn, O. Sakhno // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – № 4/2. – P. 70–81.
6. Доморошин С. В. Метод ризик-аналізу порушення функціонування розподільчих пристроїв високої напруги / С. В. Доморошин, О. А. Сахно // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2020. – № 3 (51). – С. 41–52.
7. Sakhno A. Comparative analysis of methods for residual life of current transformers prediction / A. Sakhno, S. Domoroshchin. L. Skrupskaya // Innovative engineering, technology and industry. International scientific conference. Seattle, Washington, USA. Global science and education in the modern realities. August 26-27. – 2020. – P. 7–10.

8. Sakhno A. Generalized mathematical model for determining technical condition of responsible electrical equipment of high-voltage switchgear / A. Sakhno, S. Domoroshchin // Innovative engineering, technology and industry. International scientific conference. Svishtov, Bulgaria. Search for scientific answers to the challenges of our time'2020. December 28-29. – 2020. – P. 5–8.

9. Sakhno A. Probabilistic-topological method for determining risk of disruption of high-voltage switchgear / A. Sakhno, S. Domoroshchin // Innovative engineering, technology and industry. International scientific conference. Karlsruhe, Germany. The current stage of development of scientific and technological progress'2021. No 15 on February 9. – 2021. – P. 5–7.