

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна  
Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

«ДО ЗАХИСТУ»  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Гаврилюк В. І.  
(підпис)  
2020 р. \_\_\_\_\_ « \_\_\_\_ »

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**  
на здобуття ОКР «магістр»

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»  
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
Спеціалізація «Автоматика та автоматизація на транспорті»

Тема «МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ НА  
ОСНОВІ ПАСИВНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ»

Theme «Modeling the process of railway automation elements failure based on a  
passive experiment»

Керівник дипломної роботи	<u>доцент</u>	_____	<u>Лагута В.В.</u>
	(посада)	(підпис)	(ПІБ)
Студент групи	<u>967-М</u>	_____	<u>Акименко А.С.</u>
		(підпис)	(ПІБ)
Student		<u>Akymenko Artem</u>	
		(family name)	

Дніпро  
2020

Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»  
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
Спеціалізація «Автоматика та автоматизація на транспорті»

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

Зав. кафедри

Гаврилюк В.І.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**

**до дипломної роботи на здобуття освітнього ступеню «магістр»**

Акименко А. С.

(прізвище, ім'я та по батькові)

**Тема роботи** Моделювання процесу відмов елементів залізничної  
Автоматики на основі пасивного експерименту

Затверджена наказом по університету № 798ст від «18» жовтень 2019 р.

2. Термін подання студентом закінченої роботи 17 грудень 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи Спостереження відмов елементів залізничної автоматики

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

Назва розділу	Обсяг %	Кількість креслень
Вступ. 1. Огляд літератури.	10	1
2. Статистичний аналіз відмов елементів залізничної автоматики.	15	2
3. Елементи структурного моделювання	15	2
4. Структурне моделювання за допомогою регресійного аналізу.	40	3
5. Структурний аналіз відмов пристроїв залізничної автоматики.	10	2
6. Висновки.	5	
7. Бібліографічний список. Додатки	5	

Студент  
Науковий керівник

Акименко А.С  
Лагута В.В.

## РЕФЕРАТ

Відомості про об'єм пояснювальної записки:

- 55 сторінки,
- 4 таблиць,
- 8 рисунків,
- 14 джерел літератури.

Ключові слова: структурне моделювання, системи залізничної автоматики, надійність елементів залізничної автоматики, пасивний експеримент.

Завданням даної магістерської роботи є проведення статистичного дослідження відмов елементів СЗАТ.

Мета: розробка математичної моделі процесу відмов елементів залізничної автоматики з використанням методів структурного моделювання. Дослідження наданих алгоритмів структурного моделювання. Проведення обчислених експериментів.

В першому розділі приведено огляд літературних джерел.

В другому розділі пояснювальної записки проводиться статистичний аналіз відмов елементів залізничної автоматики та обґрунтовується актуальність обраної теми дослідження.

В третьому розділі надаються необхідні елементи з структурного моделювання.

В четвертому розділі описуються алгоритми із структурного моделювання на основі пасивних спостережень за відмовами.

В п'ятому розділі досліджується процес відмов елементів залізничної автоматики за спостереженнями по залізниці. Досліджується адекватність математичної моделі.

Результати дослідження що проведено в роботі можуть бути застосовані для удосконалення системи утримання елементів залізничної автоматики.

## Зміст

Реферат.....	3
Вступ.....	5
1. Огляд літератури.....	9
2. Відмови елементів залізничної автоматики.....	12
2.1 Аналіз причин відмов класифікаторів стану рельсових ліній.....	12
2.2 Аналіз причин відмов класифікаторів стану рельсових ліній.....	17
3. Елементи структурного моделювання.....	23
3.1 Теоретичні основи застосування відношення толерантності у структурному моделюванні.....	23
3.2 Відношення еквівалентності, породжене відношенням толерантності.....	24
3.3 Основна теорема.....	25
3.4 Багатозначне відображення – модель відношення толерантності.....	26
3.5 Незалежні елементи (об'єкти).....	30
4. Структурне моделювання за допомогою регресійного аналізу.....	33
4.1 Постановка задачі.....	33
4.2 Дослідження наявності зв'язку між показниками.....	34
4.3 Алгоритми структурного моделювання.....	36
4.4 Функції моделі.....	42
5 Структурний аналіз відмов пристроїв залізничної автоматики.....	44
5.1 Початкові дані.....	44
5.2 Чисельне моделювання за спостереженими даними.....	48
Висновок.....	50
Список літератури.....	51
Додатки.....	52

## ВСТУП

Обов'язковою умовою розвитку держави у сучасних умовах є постійне функціонування залізничного транспорту – визначального у транспортній системі України. Це у свою чергу потребує від працівників залізниці постійного удосконалення управління процесами перевезень, ефективного використання приладів та устаткування залізничної автоматики, а також відкриття нових резервів підвищення пропускної здатності залізниць.

Основними технічними заходами, що забезпечують автоматичне регулювання і безпеку руху потягів є прилади автоматики і телемеханіки. Надійна робота цих приладів виключає невиправдані безпричинні затримки потягів, що дозволяє значно підвищити якість всього технологічного процесу перевезень в цілому.

Враховуючи концепцію розвитку систем залізничної автоматики і телемеханіки (СЗАТ) необхідно враховувати масове впровадження на залізничному транспорті нових інформаційних технологій, а також автоматизованих систем керування та контролю об'єктами. Для реалізації сказаного вище необхідно значне збільшення об'ємів, оперативності та вірогідності інформаційних даних від СЗАТ, які є інформаційною базою даних систем. На системи СЗАТ перепадає менше двадцятої частини капіталовкладень, проте ці системи відіграють важливу роль в забезпеченні безперебійної та надійної роботи залізничного транспорту, підвищення рівня безпеки руху, зниження енергозатрат та експлуатаційних витрат.

Проводяться роботи по створенню та впровадженню технічних засобів діагностування та контролю стану приладів, впровадження автоматичних робочих місць (АРМ) в автоматизованих системах (керування) дистанцій сигналізації та зв'язку АСК-ШЧ, що дозволяє частково автоматизувати технологічний процес обслуговування, що також впливає на зменшення експлуатаційних витрат. Розробка, створення та впровадження АСК-ШЧ є багатоплановою, масштабною, територіально-розсередженою роботою.

АСК є комплексом прикладних програмних і технічних засобів, а також системних рішень, що дозволяють створювати багаторівневі інформаційні структури різноманітної складності та об'ємів, а також зручно адаптувати систему під конкретну організаційну структуру диспетчерського апарата керування рухом потягів. При цьому оператор звільняється від необхідності часто виконувати одноманітні операції, замість цього він має змогу регулювати і контролювати значно більші об'єми інформації та складні системи технологічних процесів, що неодмінно призводить до зростання рівня відповідальності оператора і наслідків від помилок.

Щоб вчасно попереджувати відмови, необхідний комплексний і раціональний підхід. Тобто не лише якісне обслуговування приладів, а і заходи по удосконаленню роботи вже існуючого обладнання разом зі створенням нових СЗАТ, задля полегшення роботи людини на залізниці та підвищення умов безпеки, що відповідають сучасним вимогам до них. Одним з основних показників надійності є підвищення довговічності систем через оптимізацію режимів експлуатації і прогнозування остаточного ресурсу.

Прилади автоматичного контролю поліпшують практично всі показники надійності системи автоматики, яка ними контролюється, а саме:

- 1) стійкість до небезпечних відмов – частково за рахунок вчасного усунення відмов, які за певних умов здатні створити небезпечні для руху потягів ситуації, частково за рахунок зменшення ролі людського фактору;
- 2) безвідмовність приладів – підвищується через неперервний контроль основних параметрів системи в динамічному режимі, вчасне виявлення, регулювання та прогнозування відмов;
- 3) ремонтпридатність – так як несправність системи стає помітною відразу після її виникнення і повідомлення про це оперативно передається обслуговуючому персоналу разом з місцем та характером відмови, що важливо для складних СЗАТ з територіально-розсередженими об'єктами, де непрямі витрати, пов'язані з затримками в русі потягів на час усунення відмови, перевищують витрати пов'язані власне з ремонтом (чи заміною) апаратури.

Загалом методи та засоби автоматичного контролю дозволяють підвищити ефективність функціонування СЗАТ завдяки наступним техніко-економічним якостям:

- підвищення безпеки руху потягів за рахунок вчасного усунення потенційно небезпечних відмов і зменшення ймовірності виникнення небезпечних ситуацій;
- зменшення непрямих втрат від затримки потягів через відмови шляхом підвищення безвідмовності і ремонтпридатності вузлів та елементів СЗАТ;
- зменшення експлуатаційних витрат через скорочення трудовитрат на профілактику та усунення відмови, а також перехід на сучасні методи технічного обслуговування.

При впровадженні АСК основними джерелами її економічної ефективності є:

- збереження фонду заробітної плати завдяки умовному вивільненню штату обслуговуючого персоналу і робітників бухгалтерії в наслідок зростання продуктивності праці, яке досягається через автоматизацію облікових і розрахункових операцій, а також процесу навчання і перевірки знань;
- скорочення витрат, викликаних затримками потягів як результат зменшення кількості і тривалості відмов приладів СЦБ за рахунок підвищення кваліфікації персоналу і оперативного надходження рекомендацій по оптимальним способам пошуку та усунення відмов.

Для багатьох задач другої та третьої черги АСК є необхідною розробка самостійних технічних завдань. Саме тому на даному етапі досліджень найбільше уваги приділяється терміну окупованості в першу чергу АСК.

*Актуальність.* Розглянуто питання математичного моделювання процесів (систем) на основі спостереження відмов пристроїв залізничної автоматики та їх взаємозв'язку. Моделювання розглядається як один з інструментів дослідження структури системи залізничної автоматики, коли остання представляється деякою кількістю взаємозалежних показників.

*Мета дослідження.* Метою дослідження є дослідження наданих алгоритмів структурного моделювання, уточнення математичної моделі з

урахуванням структури відмов пристроїв залізничної автоматики. Проведення обчислених експериментів.

*Методи дослідження.* У роботі для аналізу елементів систем залізничної автоматики використовувалась математична статистика, теорія графів, експлуатаційні основи залізничної автоматики, елементи системного аналізу.



## РОЗДІЛ 1

### Огляд літератури

У прикладних задачах під структурою системи розуміється фіксована сукупність елементів і зв'язків між ними. Найчастіше структуру системи представляють у вигляді графа. У даний час при аналізі структур використовується статистичний і кібернетичний підхід.

Івахненко А.Г. розглядає задачі структурної ідентифікації, де під структурою досліджуваного об'єкта розуміється система рівнянь, яка відображає взаємодію між заданими входом і виходом. Синтез моделі складається з трьох етапів: визначення структури, оцінка параметрів моделі, адаптація параметрів. Складність моделі визначається при цьому числом алгебраїчних рівнянь. Основні проблеми, пов'язані з моделюванням систем за допомогою методів багатовимірного статистичного аналізу досліджено у роботах.

У них розглядаються задачі структурної та параметричної ідентифікації на основі відношення толерантності. У роботах описані розроблені основні алгоритми рішення задач структурної ідентифікації. Підхід і алгоритми, які запропоновані у даних роботах, дозволяють використовувати методи математичного моделювання складних систем в умовах структурної невизначеності. Якщо математична модель розглядається як модель управління, то запропонований підхід дозволяє визначати параметри управління. Алгоритми побудови множини всіх наборів незалежних змінних на основі відношення толерантності можуть використовуватися також в кластерному аналізі.

Льонг зазначив, що успіх у вирішенні прикладних задач залежить від належного вибору структури моделі. Загальним питанням дослідження задач визначення структур моделей присвячені роботи Бохліна, Седерстрема, Мостеллера і Тьюкі

У 70-ті роки XX століття у точних науках намітилося прагнення перейти від вивчення добре організованих систем до систем з поганою структурою.

Необхідно відзначити, що поняття системи вперше було сформульовано в рамках загальної теорії систем, одним із засновників якої був Л. фон Берталанфі.

Пізніше дослідженням систем займалися В.М. Глушков, М.П. Бусленко, О.І. Уємов, Б.М. Михалевич, Ю.О. Шрейдер та інші вітчизняні науковці, а також закордонні вчені – Ланге, Такахарой, Месарович [ Месарович М., Такаха Я. Общая теория систем: математические основы. М.: Мир, 1978. 311 с.][1]. Хоча в загальній теорії систем під структурою прийнято розуміти тільки множину зв'язків між елементами, у прикладних задачах під структурою системи мається на увазі фіксована сукупність елементів і зв'язків між ними. Найчастіше структура системи подається у вигляді графа. З часів Ньютона і до початку ХХ-го століття прагнули мати справу із системами, у яких можна було виділити явища і процеси однієї фізичної природи, що залежать від зовсім невеликого числа змінних. Результати досліджень можна було представляти добре інтерпретованими функціональними зв'язками, яким приписувалася роль деяких абсолютних законів. На початку ХХ ст. у математичній статистиці були зроблені перші кроки щодо вивчення дифузних систем, у яких не можна чітко виділити окремі явища.

Необхідно відзначити два істотно різних підходи до вивчення погано організованих систем, які чітко визначились за останні десятиліття. Перший напрямок, пов'язаний з використанням ідей і методів багатомірного статистичного аналізу, почав розвиватися в 20-30-х роках у працях Р. Фішера. Другий підхід до вивчення складних систем – кібернетичний – пов'язаний з ім'ям Н. Вінера [ Винер Н. Кибернетика. М.: Советское радио, 1968. -137 с.][2].

Слід підкреслити, що ці два напрямки істотно різні, хоча об'єкт вивчення один – погано структуровані системи, причому нерідко одна й та ж система вивчається двома методами.

Особливий інтерес викликають системи, що самоорганізуються [ Ивахненко А.Г., Мюллер Й.А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. К.: Техніка, 1985. 224 с.; Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П. Моделирование сложных

систем по експериментальним даним. М.: Радио и связь, 1987. 120 с.].[3,4]

Для складних систем, про які наявна лише невелика апріорна інформація, виявилася ефективною евристична самоорганізація математичних моделей, розроблена в Інституті кібернетики НАН України, а також в роботах О.Г. Ивахненка, Ю.П. Юрачковського, Ю. П. Зайченка, В. Д. Димитрова, В. С. Степашка й ін. [Ивахненко А.Г. Метод группового учета аргумента – конкурент метода стохастической аппроксимации. Автоматика: Киев. 1968. №3. 587 с.; Ивахненко А.Г., Зайченко Ю.П., Димитров В.Д. Принятие решений на основе самоорганизации. М.: Советское радио, 1976. 280 с.; Ивахненко А.Г., Степашко В.С. Помехоустойчивость моделирования. Киев: Наукова думка, 1985. 214 с.; Ивахненко А.Г., Мюллер Й.А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. К.: Техніка, 1985. 224 с.; Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. М.: Радио и связь, 1987. -120 с.].[5-9]

*Висновок:* Моделювання з урахуванням структури відносять до системного аналізу. Основними методами дослідження структур є методи оптимізації, статистичні методи, математична теорія визначення образів. Структурне моделювання є невід’ємною частиною дослідження складних систем.

## **РОЗДІЛ 2**

### **Відмови елементів залізничної автоматики**

#### **2.1 Статистичний аналіз відмов елементів залізничної автоматики**

##### **ШЧ № 4 Придніпровської залізниці**

Рівень надійності пристроїв залізничної автоматики залежить від надійності окремих її частин: електричної (рейкові кола, кабельні та повітряні лінії, сигнали, пульти, табло, апарати керування, пристрої електроживлення, елементи захисту, трансформатори, дросель-трансформатори та т.д.) та механічної (електроприводи стрілок, автоматичні шлагбауми переїздів, рухомі деталі реле, маятникових трансмітерів, комутаційних пристроїв і т.д.). Від надійності всіх приладів залізничної автоматики залежить вся робота залізничного транспорту.

Потрібно відмітити, що надійність пристроїв залежить від якісного обслуговування їх кваліфікованим персоналом (електромеханіками, електромонтерами, старшими електромеханіками, начальниками діляниць). Для якісного обслуговування пристроїв залізничної автоматики на залізничному транспорті були розроблені графіки технологічного обслуговування. До кожного виду роботи були складені технологічні карти, за допомогою яких електротехнічний персонал якісно виконує свої обов'язки. У технологічних картах вказані норми та допуски, послідовність робіт, яким інструментом користатися при тих чи інших роботах.

При аналізі необхідно критично розглядати джерела інформації, тому що відомості про відмови апаратури систематизуються у дистанціях сигналізації та зв'язку не достатньо, при цьому характер пошкоджень кваліфікується іноді не об'єктивно, а де коли не і грамотно, записи про відмови інколи хибні, та часто відмови не фіксуються.

У даній роботі за допомогою офіційних даних спостерігалися відмови пристроїв залізничної автоматики Павлоградської залізниці за період з 01.01.15 по 30.09.17 рр. була складена таблиця 2.1.

*Таблиця 2.1* - відмови пристроїв залізничної автоматики Павлоградської залізниці

	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>
За 1 кв. 2015	2	1	1	0	2	0	0	1
За 2 кв. 2015	3	3	1	0	2	1	1	0
За 3 кв. 2015	0	1	0	3	3	0	0	1
За 4 кв. 2015	3	2	0	1	0	0	0	0
За 1 кв. 2016	0	0	0	1	1	2	0	0
За 2 кв. 2016	2	3	0	2	0	0	0	0
За 3 кв. 2016	3	3	0	1	1	0	0	0
За 4 кв. 2016	2	4	0	0	2	1	0	0
За 1 кв. 2017	1	2	2	1	2	0	0	0
За 2 кв. 2017	4	5	2	1	0	1	0	0
За 3 кв.	6	8	0	0	3	2	0	0

2017								
За 4 кв. 2017	3	5	1	1	0	0	1	0

Де  $x_1$  - відмова у роботі рейкових кіл,  $x_2$ - відмова роботи апаратури,  $x_3$ - відмова електродвигунів стрілок і гарнітур,  $x_4$ - несправність кабельних ліній,  $x_5$ - відмова чи хибна робота сигналів,  $x_6$ - відмова пультів, табло, апаратури керування,  $x_7$ - порушення енергоживлення,  $x_8$ - відмова елементів захисту.

За допомогою таблиці 2.1 можна побудувати динамічний ряд спостережень відмов пристроїв залізничної автоматики, так як зображено на рис. 2.1.

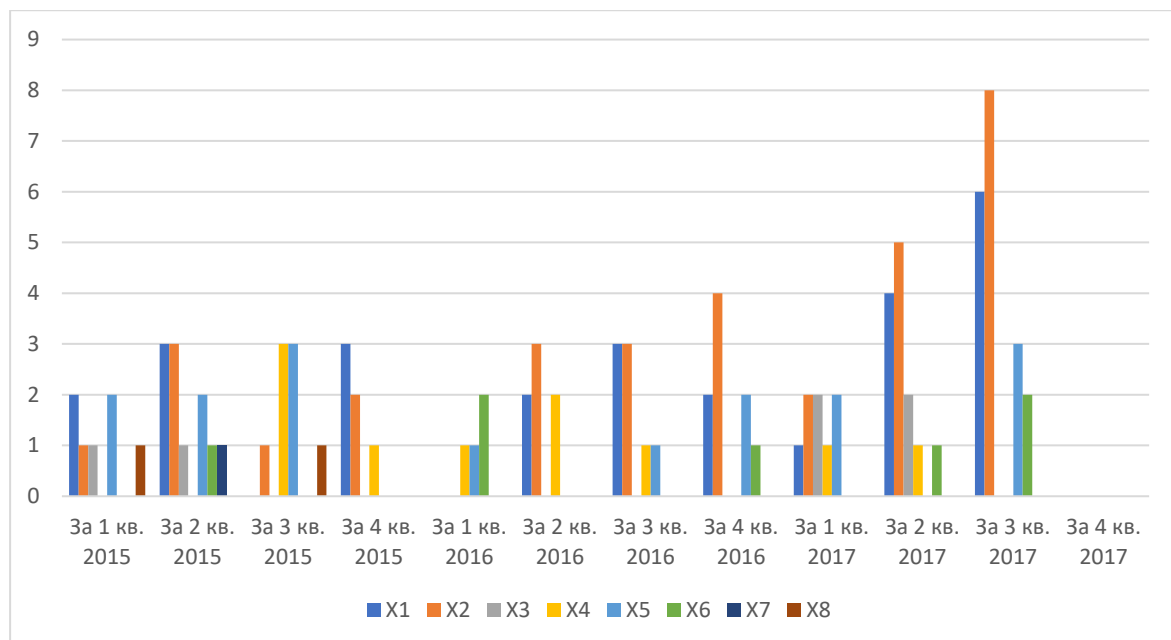


Рисунок 2.1 – Залежність відмов залізничної автоматики

Основна частина відмов апаратури залізничної автоматики приходить на ізолюючі стики, основною проблемою яких є «пробій». Проаналізувавши рис. 2.1. ми бачимо, що відмови рейкових кіл з початку 2016 року суттєво зменшилися з 43% від загальної кількості відмов до 29% завдяки масовій установці полімерних ізолюючих стиків на головних коліях станцій та у перевідних кривих стрілочних переводів, які за своїми характеристиками суттєво відрізняються за ті, що використовувалися раніше. З 2016 р. ми бачимо,

що збільшилась кількість відмов іншої апаратури, збільшилась кількість відмов кабельних ліній, сигналів, а також з 2017 р. збільшилась кількість відмов елементів захисту. У повітряних лініях показники майже не відрізняються, так як майже по всій Одеській залізниці демонтовані, апаратура переведена до кабельних ліній. Пульти, табло, апаратура керування та пристрої електроживлення суттєво не змінили свої показники. У електроприводах стрілок з середини 2016 року по перший квартал 2017 року також збільшилась кількість відмов, з другого кварталу 2017 року кількість відмов знову знизилась.

На даний момент застосовуються нові системи автоблокування без ізолюючих стиків, такі як ЦАБ, АБТЦ і т.д. Таким чином суттєво зменшується кількість відмов рейкових кіл.

Підрахувавши середній показник за 24 квартали. Ми можемо скласти таблицю 2.2 та діаграми відмов пристроїв залізничної автоматики за об'єктами кругову (рис. 2.2) та лінійчату (рис. 2.3).

*Таблиця 2.2 - Відмови пристроїв залізничної автоматики*

Рейкові кола	380
Апаратура	207
Електроприводи стрілок і гарнітури	133
Кабельні лінії	110
Повітряні лінії	2
Сигнали	65
Пульти, табло, апаратура керування	34
Пристрої електроживлення	33
Елементи захисту	53

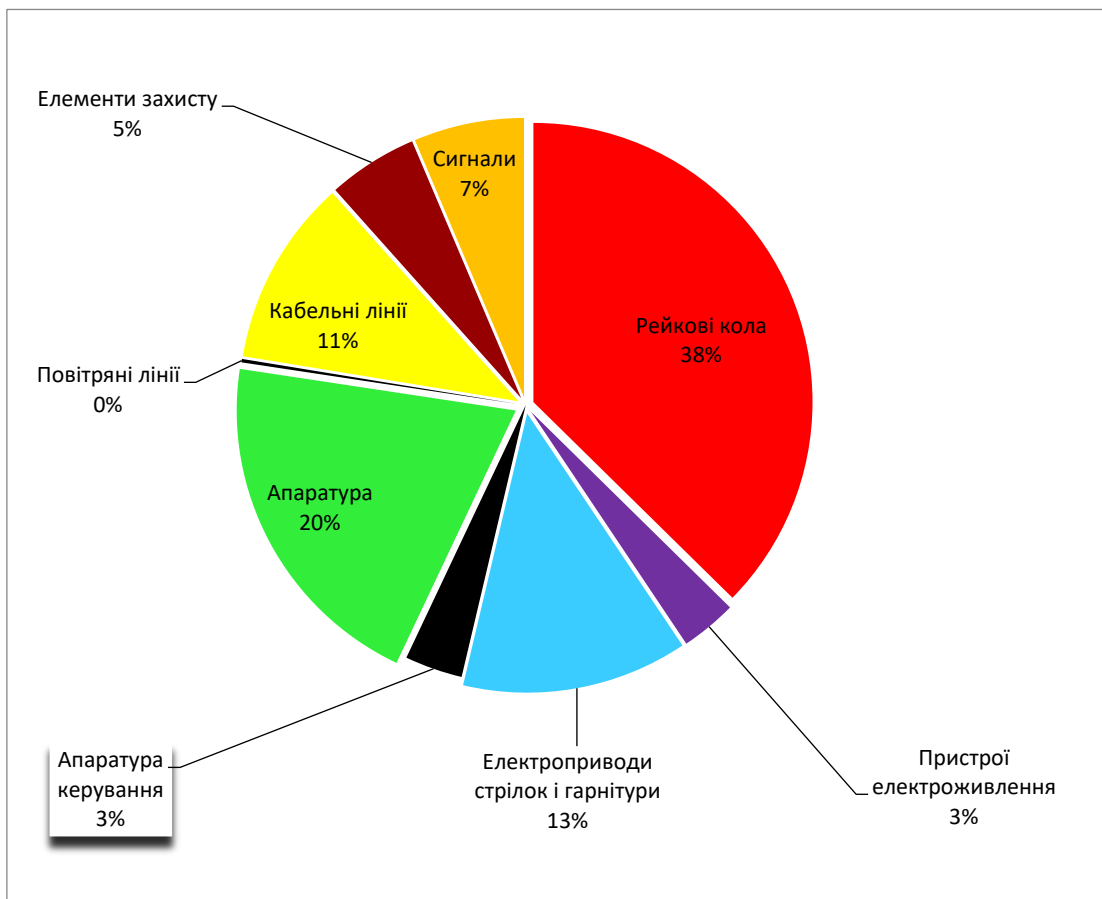


Рисунок - 2.2 Кругова діаграма відмов пристроїв залізничної автоматики за об'єктами

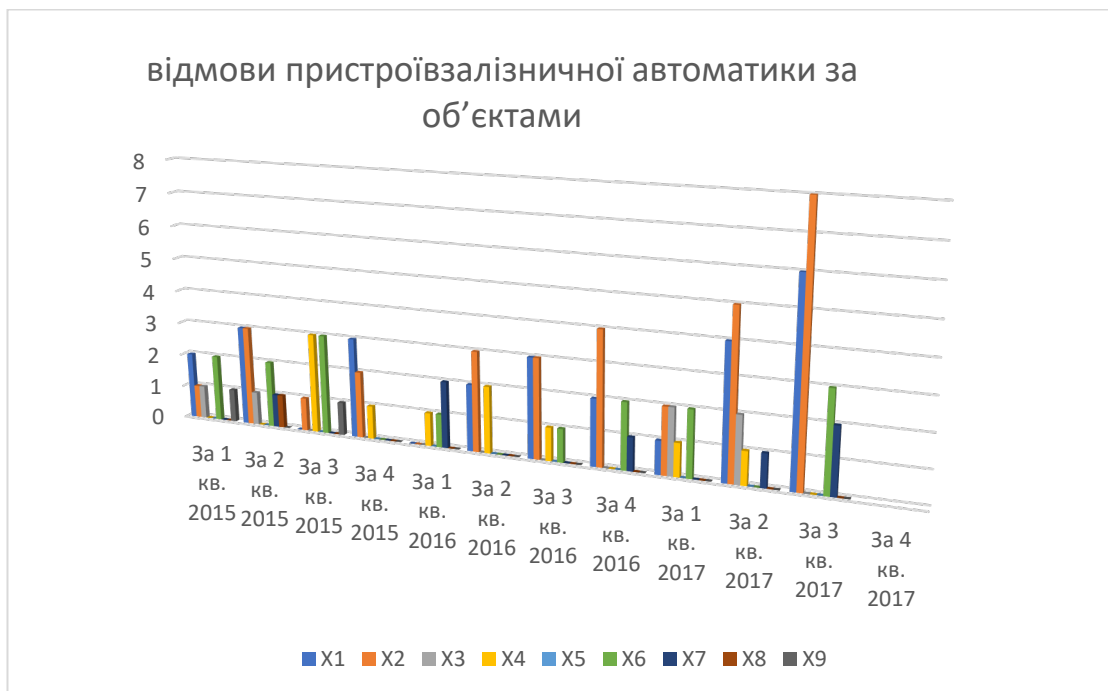


Рисунок - 2.3 Лінійчата гістограма відмов пристроїв залізничної автоматики за об'єктами



Зростають випадки псування та розкрадання пристроїв залізничної автоматики. Матеріальні збитки з яких відшкодовуються тільки у обсязі 15-20%. Найчастіше піддаються розкраданню та псуванню такі елементи пристроїв, як дросель-трансформатори, кабельні муфти, кабель, трансформатори, світлофорні лінзи та лампи, які також відіграють важливу роль у статистичних даних.

## **2.2 Аналіз причин відмов класифікаторів стану рельсових ліній**

Системи інтервального управління руху поїздів базуються на інформації класифікаторів станів рейкових ліній, які, в свою чергу, отримують інформацію про вільний, зайнятому, справному або несправному станах рейкових ліній (РЛ), від рейкових ланцюгів - датчиків первинної інформації. Отже, на них накладаються особливі вимоги: висока ступінь експлуатаційної надійності та безпеки функціонування, забезпечення стійкої роботи в умовах впливу внутрішніх (зміна первинних параметрів РЛ) і зовнішніх (різного роду перешкоди, нестабільність характеристик джерел живлення) збурень, живучості системи в цілому. Діапазон зміни збурюючих впливів досить широкий, наприклад, провідність ізоляції рейкових ліній реально змінюється від 10 до 0,02 См / км, при нормативному від 1 до 0,02 См / км, що призводить до значних коливань рівня сигналу в рейкових лініях. За мережевими даними близько 21% відмов у роботі систем контролю станів рейкових ліній відбувається внаслідок впливу даного роду обурення .

Аналіз причин відмов пристроїв автоматики і телемеханіки, що викликали затримки поїздів показує, що практично 70% всіх затриманих поїздів доводиться на відмови по експлуатаційним причин. Отже, якісне виконання графіка технічного процесу обслуговування і кваліфікований персонал дозволяють знизити збої в графіку руху поїздів та суттєво підвищити безпеку. При побудові пристроїв автоматики і телемеханіки, в першу чергу, вирішується завдання забезпечення безпеки. Безпечною є система, яка при виникненні несправностей елементів внутрішньої структури схеми не робить впливу на об'єкти управління . У сучасних пристроях автоматики і телемеханіки

поєднуються стратегії безвідмовності, відмовостійкості та безпечної поведінки при відмовах.

Для станційних класифікаторів станів рейкових ліній- характерно поява поступових і раптових відмов. Якщо раптові відмови настають в дискретні моменти часу, то при поступових відмовах можна оцінити тренд зміни параметрів і, при незмінності інших параметрів, можна побудувати прогнозну модель.

Таблиця 2.3 – Аналіз потоку відмов основних пристроїв автоматики.

№ п/п	Пристрої	Число відмов, %	Розгля- дані елем- енти по- току від- мов в ре- йковій системі їх ла-
1	Рейкові кола	26,87	
2	електроприводи	20,41	
3	Релейная і безконтактна апаратура	10,52	
4	елементи захисту	8,87	
5	кабельні лінії	7,92	
6	Релейні шафи, Стативи	7,16	
7	сигнали	5,57	
8	Трансформатори, перетворювачі, електричні машини	4,81	
9	Пульти, табло, апарати управління	2,55	
10	Акумулятори та первинні елементи	2,24	
11	Щитові електроживлення установки	1,22	
12	повітряні лінії	0,22	
13	невстановлені об'єкти	1,63	

нцію як найменш надійних пристроїв станційних систем автоматики і телемеханіки.

Аналіз потоку відмов основних пристроїв автоматики і телемеханіки, представлених в таблиці, показує, що близько 30% відмов всіх пристроїв автоматики і телемеханіки доводиться на рейкові кола. Це пояснюється важкими умовами їх експлуатації внаслідок значних навантажень (збільшення навантаження на вісь рухомого складу з 25 до 30 т), коливань температури і вологості навколишнього середовища, інтенсивного засмічення баластного матеріалу сипучими вантажами і ін.

Параметр потоку відмов рейкових  $\omega(t)$  ланцюгів визначається як відношення середнього числа відмов відновлюваної рейкового кола за довільно малу його доробок до значення цього напрацювання

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[n(t - \Delta t)] - M[n(t)]}{\Delta t}$$

Де  $M[n(t - \Delta t)], M[n(t)]$  математичне очікування числа відмов рейкового кола за час  $(t + \Delta t)$

Статистичний параметр потоку відмов рейкового кола:

$$\omega_{cm}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}$$

Розглянемо параметри потоку відмов рейкових ланцюгів в цілому і по її елементах.

1. Параметр потоку відмов рейкових ланцюгів для станційної АТ :

$$\omega_{pq}(t) = 55 \times 10^{-6} \times \text{ч}^{-1}$$

Найбільш характерними відмовами рейкових ланцюгів є порушення ізоляції стрілочного вузла (25%); обрив або поганий контакт з'єднувачів (29,7%); зниження опору ізоляції рейкових ліній (13%); закорочування рейкових ліній сторонніми предметами (18,7%) і ін.

2. Параметр потоку відмов ізолюючих стиків:

$$\omega_{uct}(t) = (9,2 \div 13,7) \times 10^{-6} \times \text{ч}^{-1}$$

Порушення ізоляції стику відбувається внаслідок «згону» рейок і видавлювання ізоляційної прокладки між торцями рейок, внаслідок впливу на рейки підвищеної температури навколишнього повітря, а також динамічного впливу на всі елементи ізоляції стику.

### 3. Параметр потоку відмов у стикових з'єднань струмопровідних стиків:

$$\omega_{\text{ст}}(t) = (11 \div 16,5) \times 10^{-6} \times t^{-1}$$

Основні причини пошкодження стикових з'єднувачів приварного типу: корозія, неякісна приварка, втрата контакту між тросом і наконечником. Характерними відмовами штепсельних з'єднувачів є: нестабільність перехідного опору «штепсель-рейка» внаслідок нестандартного розміру отворів в рейках, втрата контакту між тросом і наконечником.

В даний час технологія технічного обслуговування пристроїв автоматики і телемеханіки базується на використанні Інструкції ЦШ-720-14 відповідно до графіків встановленої форми, що регламентують періодичність і види робіт.

В основі цієї технології знаходиться планово-попереджувальний метод технічного обслуговування (ТО), представлений на рис.1 у вигляді структурно-функціональної схеми .

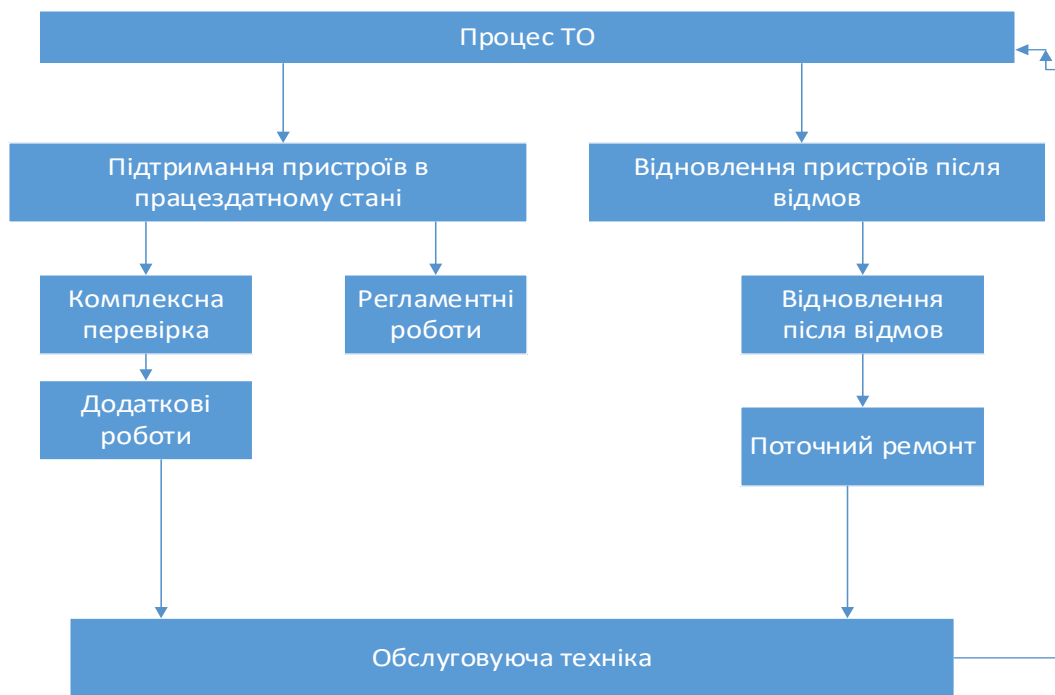


Рисунок.2.3 - Структурно-функціональна схема процесу технічного обслуговування пристроїв автоматики і телемеханіки

Згідно з Інструкцією роботи, пов'язані з контролем і вимірюванням параметрів пристроїв автоматики і телемеханіки, виконуються в основному в суворій відповідності з технологічними картами. Графіками ТО передбачено:

- вимір параметрів, запис форми сигналів;
- вимір напруги, струму, опору і частоти змінного струму;
- вимір кодових і модульованих сигналів;
- вимірювання опору ізоляції електричних ланцюгів;
- вимірювання часових параметрів;
- вимір різниці фаз;
- вимір напруги в фідерах і ін.

В процесі відновлення після відмов проводяться одноразові ремонтно-відновлювальні роботи для усунення несправностей. Для підтримки працездатності виконуються періодичні роботи по ТО, спрямовані на попередження і виявлення можливих несправностей, але циклічний контроль малоефективний через можливість появи відмов між циклами перевірки. У зв'язку з цим, необхідно створення модулів і алгоритмів обробки і прийняття

рішень по визначенню якісного і кількісного стану контрольованих об'єктів, зокрема ізолюючих стиків. з визначення характеру передвідмовного стану, з метою надання допомоги обслуговуючому персоналу щодо виявлення та усунення відхилень в режимах роботи пристроїв залізничної автоматики та телемеханіки.

### *Висновки*

Основні відмови в елементах залізничної автоматики приходяться на рейкові кола (38%). Наступними елементами на утримання яких треба звернути увагу це апаратура (20%) і електроприводи стрілок і гарнітур (13%). Данні елементи вимагають постійних ремонтних впливів. Покращення експлуатаційних показників роботи елементів залізничної автоматики може бути досягнуто удосконаленням їх системи зберігання.

## РОЗДІЛ 3

### Елементи структурного моделювання

#### 3.1 Теоретичні основи застосування відношення толерантності у структурному моделюванні

Відношення толерантності – бінарне відношення, визначене на деякій множині  $\Omega$ . У якості  $\Omega$  розглянемо скінчений набір  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , де  $x_i, i = \overline{1, n}$  – змінні, що характеризують модельований об'єкт.

*Визначення. 3.1.1* Будемо говорити, що між  $x_i$  і  $x_j$  наявне відношення толерантності  $\tau$ , якщо зміна одного з них приводить до зміни іншого.

Іншими словами, не виділяючи ні  $x_i$ , ні  $x_j$ , констатуємо, що між ними є деякий взаємозв'язок. Формально даний факт будемо записувати у вигляді:  $x_i \tau x_j$ .

З огляду на визначення 3.1.1 відношення  $\tau$  має властивості рефлексивності та симетричності, отже  $\tau$  – відношення толерантності.

Одним з можливих способів визначення  $\tau$  може бути такий.

*Визначення 3.1.2*  $x_i \tau x_j \Leftrightarrow ((|r_{ij}| > r_{\text{кр}}(\alpha)) \vee ((|r_{ij}| \leq r_{\text{кр}}(\alpha)) \wedge (|k_{ij}| > k_{\text{кр}}(\alpha))))), (3.1)$

де 1)  $r_{ij}$  - вибіркового коефіцієнт кореляції;

2)  $k_{ij}$  - коефіцієнт Крамера;

3)  $r_{\text{кр}}(\alpha)$ ,  $k_{\text{кр}}(\alpha)$  - критичні значення коефіцієнтів кореляції згідно з обраним рівнем значимості  $\alpha$ .

*Визначення 3.1.3* Множину  $\Omega$  з визначеним на ній відношенням толерантності  $\tau$  будемо називати простором толерантності і записувати у вигляді  $\langle \Omega, \tau \rangle$ .

З погляду математичного моделювання  $\tau$  визначає міру локального взаємозв'язку між елементами з множини  $\Omega$ .

### 3.2 Відношення еквівалентності, породжене відношенням толерантності

Розглянемо відношення  $\theta$ , визначене на множині  $\Omega$  у такий спосіб:

*Визначення 3.2.1*

$$x\theta y \Leftrightarrow ((x\tau y) \vee (\exists(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \in \Omega, (x\tau \xi_1 \wedge \xi_1 \tau \xi_2 \dots \xi_k \tau y))). \quad (3.2)$$

За допомогою  $\theta$  з'являється можливість розбивки множини  $\Omega$  на класи еквівалентності  $\{\Omega_\nu\}$ ,  $\nu = \overline{1, p}$ .

Очевидно, що відношення  $\theta$  є відношенням еквівалентності, тому що

$x\theta x$  завжди має місце, тому що має місце  $x\tau x$ ;

$x\theta y \Rightarrow y\theta x$ , що випливає із симетричності  $\tau$ ;

$x\theta y \wedge y\theta z \Rightarrow x\theta z$ , - доведення транзитивності розглянемо більш докладніше.

Нехай наявне  $x\theta y$ , тоді  $y\tau x$ , або існують такі  $\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_p$ , що  $x\tau \xi'_1 \wedge \dots \wedge \xi'_p \tau y$ , а з  $y\theta z \Rightarrow y\tau z$ , або існують такі  $\xi''_1, \xi''_2, \dots, \xi''_k$ , що наявне  $y\tau \xi''_1 \wedge \dots \wedge \xi''_k \tau z$ . Позначивши через

$$\xi_1 = \xi'_1, \dots, \xi_p = \xi'_p, \xi_{p+1} = y, \xi_{p+2} = \xi''_1, \dots, \xi_{p+k+1} = \xi''_k, \quad (3.3)$$

одержимо, що має місце  $x\tau z$ , або  $x\tau \xi_1 \wedge \dots \wedge \xi_{p+k+1} \tau z$ , що і доводить транзитивність відношення  $\theta$ .

Враховуючи теорему [ Курош А.Г. Лекции по общей алгебре. М.: Наука, 1973. 399 с.][10] про взаємооднозначну відповідність між відношенням еквівалентності і розбивкою множини  $\Omega$ , визначене відношення еквівалентності  $\theta$  дозволяє множини  $\Omega$  подати у вигляді:

$$\Omega = \bigcup_{i=1}^k \Omega_i, \quad (3.4)$$

де  $\Omega_i \subseteq \Omega$ ;

$\Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset$  при  $i \neq j$ .

*Теорема 3.2.2* Відношення еквівалентності  $\theta$ , породжене відношенням



толерантності  $\tau$ , дозволяє простір толерантності  $\langle \Omega, \tau \rangle$  розкласти на непересічні підпростори  $\langle \Omega_i, \tau \rangle, i = \overline{1, k}$ .

У випадку, коли множина  $\Omega$  - скінченна, відношення толерантності  $\tau$  може бути задане у вигляді графа  $G(\tau)$ , що як вершини має елементи множини  $\Omega$ , а набір дуг визначається так: дуга з  $x_i$  у  $x_j$  наявна, якщо  $x_i \tau x_j$ . З огляду на теорему 3.2.2 граф  $G(\tau)$  може бути розбитий на непересічні під-графи  $G_i(\tau), i = \overline{1, k}$ , кожний з яких представляє зв'язний компонент графа  $G(\tau)$

### 3.3 Основна теорема

Не обмежуючи загальності розгляду, будемо припускати, що множина  $\Omega$  є класом еквівалентності і не може бути розкладене на непересічні підмножини.

*Визначення 3.3.1* Множину  $K \subseteq \Omega$  називають класом толерантності, якщо наявне:

1.  $(\forall x, y \in K) \quad x \tau y$ ;
2.  $(\forall z \in \Omega \setminus K) \quad (\exists x \in K) \quad x \bar{\tau} z$ .

*Теорема 3.3.2* Для всякого  $x \in \Omega$  існує клас толерантності, що містить  $x$ .

Дана теорема є основою теорії просторів толерантності, тому що вона дозволяє ввести систему околів [ Шрейдер Ю.А. Пространства толерантности. // Кибернетика: Киев. 1970. № 2, С. 124-128.][11] і розглядати простір толерантності як топологічний простір.

Для цілей структурного моделювання важливо те, що набір класів толерантності утворить покриття множини  $\Omega$ . Якщо позначити через  $M \subset \Omega$  таку множину, що ніякі її два елементи не належать тому самому класу толерантності, то множину  $M$  можна розглядати як такий набір змінних, який дозволяє характеризувати будь-яку іншу змінну з  $\Omega \setminus M$ . Останнє означає, що якщо  $y \in \Omega \setminus M$ , то можна вказати хоча б один  $x \in M$ , такий що наявне  $y \tau x$ .

Викладені зауваження оформимо у вигляді таких тверджень.

*Теорема 3.3.3* Для будь-якого простору толерантності  $\langle \Omega, \tau \rangle$  існує така множина  $M \subset \Omega$ , для якої виконуються наступні

співвідношення:

1.  $M \neq \emptyset$ ;
2.  $(\forall x, y \in M) \quad x \bar{\tau} y$ ;
3.  $(\forall y \in \Omega \setminus M) (\exists x \in M) \quad y \tau x$ .

*Доведення.* Доведемо теорему для випадку, коли множина  $\Omega$  є скінченною, а граф  $G(\Omega_n)$  – неповний. За теоремою Шрейдера, для кожного  $x_i \in \Omega$  існує клас толерантності, що його містить. А так як  $\Omega$  – скінченна множина, те і набір класів толерантності буде скінченним  $\{K_1, K_2, \dots, K_p\}$ . З іншого боку, кожен клас толерантності містить скінченне число елементів множини  $\Omega$ . Візьмемо перший елемент класу  $K_1$ , нехай для визначеності це буде  $x_1$ ; тоді, якщо  $x_1$  належить до інших класів толерантності, то  $M = \{x_1\}$ . У випадку, коли знайдеться який-небудь клас толерантності, що не містить  $x_1$ , то з цього класу візьмемо такий елемент  $x_2$ , що  $x_1 \bar{\tau} x_2$ . Поповнивши множину  $M$  елементом  $x_2$ , маємо  $M = \{x_1, x_2\}$ . Якщо виявиться, що після чергового поповнення  $M$  немає такого класу толерантності, що  $K \cap M = \emptyset$ , то множина  $M$  побудована, і вона має властивості, зазначені в теоремі 3.3.3.

### 3.4 Багатозначне відображення – модель відношення толерантності.

У ряді випадків відношення толерантності  $\tau$  зручно представити через інші математичні об'єкти, що допускають прикладну інтерпретацію.

Нехай  $x \in \Omega$ , а  $A(x) \subset A$  являє собою множину значень функції  $\varphi(x)$ , тобто  $A(x) = \varphi(x)$ . Щодо відображення  $\varphi(x)$  припустимо що  $\bigcup \varphi(x) = A$ , де об'єднання здійснюється по усім  $x \in \Omega$ .

*Визначення 3.4.1*  $x \tau y \Leftrightarrow A(x) \cap A(y) \neq \emptyset$ . (3.5)

У такий спосіб визначене відношення  $\tau$  має властивості рефлексивності і симетричності, тобто воно є відношенням толерантності. Відношення  $\theta$ , відповідно до визначення 3.2.2., є відношенням еквівалентності, тоді, якщо  $X_1 \subset \Omega, X_2 \subset \Omega, \dots, X_p \subset \Omega$  – класи еквівалентності по  $\theta$ , то

$$A_1 = \varphi(X_1), \dots, A_p = \varphi(X_p) - \text{розбиття множини } A.$$

Відношення  $\tau$ , відповідно до (3.1.1), допускає таку інтерпретацію: множин  $\Omega$  - набір певних об'єктів, множини  $A$  - набір певних ознак, і тоді якщо об'єкт  $x$  має з об'єктом  $y$  спільні ознаки, то говорять, що  $x$  «схожий» на  $y$ .

Подібна інтерпретація досліджена у праці [ Шрейдер Ю.А. Равенство, сходство, порядок. М.: Наука, 1971. 254 с.][12] і може розглядатися як теоретична основа класифікації в прикладних науках.

У термінах даної моделі клас толерантності  $K \subset \Omega$  визначиться в такий спосіб:

1.  $A(K) = \bigcap_{x \in K} A(x) \neq \emptyset$  ;

$$2. (\forall x \in \Omega \setminus K) \quad A(x) \cap A(K) = \emptyset .$$

Розглянемо ситуацію, коли множина ознак скінченна і являє собою  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ . Нехай  $A_{i_1, i_2, \dots, i_r} = \{a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_r}\}$  - який-небудь набір ознак, а  $X_{i_1, i_2, \dots, i_r} \subset \Omega$  - прообраз множини  $A_{i_1, i_2, \dots, i_r}$  такий, що  $\forall x \in X_{i_1, i_2, \dots, i_r}$  має всі ознаки, перераховані в  $A_{i_1, i_2, \dots, i_r}$ .

Очевидно, що сукупність  $X$ , елементами якої є множини типу  $X_{i_1 i_2 \dots i_r}$ , утворить покриття множини  $\Omega$ . З елементів  $X$  побудуємо таку систему:

[illegible]

Підкреслимо, що  $X_1 \subset \Omega$  і  $\forall x \in X_1$ , маємо  $\varphi(x) = \{a_1\}$  і тільки, тобто елементи  $X_1$  мають ознаку  $a_1$  і тільки її, а припустимо  $X_{34} \subset \Omega$  має ту властивість, що кожен її елемент має ознаки  $a_3$  й  $a_4$  одночасно.

Система  $K_1, K_2, \dots, K_{m'}$  є покриттям множини  $\Omega$ . Залишивши тільки такі

$K_i$ , що симетрична різниця  $K_i \Delta K_j \neq \emptyset$ ,  $i \neq j$  і жодне з них не вкладене в яке-небудь інше, одержимо набір  $\{K_1, K_2, \dots, K_p\}$ , де  $p \leq m'$ . Цей набір також є покриттям множини  $\Omega$ .

*Теорема 3.4.2* Будь-яка множини  $K_i$  з набору  $\{K_1, K_2, \dots, K_p\}$  являє собою клас толерантності.

Дане твердження стає очевидним, якщо звернути увагу на те, що  $K_1$  з (3.3.2) являє собою набір елементів з  $\Omega$  таких, що кожен елемент із  $K_1$  має у крайньому разі ознаку  $a_1$ , тоді

$$A(K_1) = \bigcap_{x \in K_1} A(x) \neq \emptyset ; \quad (3.6)$$

очевидно, що поповнити  $K_1$  не можна, тому що  $\Omega \setminus K_1$  являє собою набір елементів, що не мають ознаки  $a_1$ . Міркуючи аналогічно, дійдемо до висновку, що це буде виконуватися і для  $K_2$ , якщо  $K_1 \Delta K_2 \neq \emptyset$  і  $K_2 \not\subset K_1$ . Таким чином, ведемо розгляд до  $K_m$  включно. Далі,  $K_{m+1}$  - це набір таких  $x \in \Omega$ , що кожний з них має принаймні ознаки  $a_1$  й  $a_2$  одночасно, що стосується  $K_m$ , те це такі  $x \in \Omega$ , що кожен з них має принаймні деякі властивості  $a_{i_1}$ ,  $a_{i_2}$ , і  $a_{i_r}$ , де  $(i_1, i_2, \dots, i_r)$  - максимальний набір з  $\{1, 2, \dots, m\}$ . Зупинимось докладніше на питанні існування множини  $M \subset \Omega$  такої, що для будь-яких двох його елементів  $x$  і  $y$  виконується умова

$$A(x) \cap A(y) = \emptyset . \quad (3.7)$$

Не обмежуючи загальності розгляду, можна вважати, що  $X_1 \neq \emptyset$ , тоді візьмемо будь-який елемент з  $X_1$  і, позначивши його через  $x_1$ , помістимо в  $M = \{x_1\}$ . Таким чином, множина поки складається з одного елемента, що має ознаку  $a_1$ . Далі розглянемо  $\Omega \setminus X_1$  і з неї візьмемо елемент, що має ознаку  $a_2$  і тільки її. Позначимо цей елемент через  $x_2$  і помістимо його в  $M$ , тобто тепер  $M = \{x_1, x_2\}$  і продовживши цей процес далі, ми побудуємо множину  $M$  із

зазначеною властивістю (7). Якщо виявиться, що усі  $X_1, X_2, \dots, X_m$  порожні, то побудову множини  $M$  починаємо с  $X_{12}$  і т.д.

Зазначимо, що множина  $M$  визначається неоднозначно, тому за  $x_1$  ми прийняли будь-який елемент із  $X_1$ . Позначимо через  $\mathbf{M}$  набір множин типу  $M$ , елементи якого мають властивість.

*Теорема 3.4.5* Якщо множина  $A$  – скінченна, а множина  $\Omega$  – континуум, то множина  $\mathbf{M}$  - континуум.

Справедливість даного твердження випливає з побудови множини  $M$  і континуальності множин типу  $X_{i_1, i_2, \dots, i_r}$ .

Якщо розглядати ситуацію, коли множини  $A$  і  $\Omega$  не більш, ніж злічені, то множина  $\mathbf{M}$  також не більше, ніж злічена. У цьому легко переконатися, якщо виписати множину  $\mathbf{X}$ .

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 & \dots & X_k & \dots \\ X_{12} & X_{13} & \dots & X_{1k} & \dots \\ X_{123} & X_{124} & \dots & X_{12k} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

і застосувати діагональ Г. Кантора.

Наступним важливим поняттям у теорії просторів толерантності є поняття бази.

*Визначення 3.4.6* Деяка сукупність класів толерантності  $H_B$  називається базою, якщо:

1. для всякої толерантної пари  $x$  и  $y$  з  $\Omega$  існує клас толерантності  $K \in H_B$ , що містить обидва ці елементи;
2. видалення з  $H_B$  хоча б одного класу толерантності призводить до порушення властивості 1.

З даного визначення випливає теорема 3.4.7:

$$\text{Теорема 3.4.7} \quad \bigcup_{K \in H_B} \bigcup_{x \in K} A(x) = A. \quad (3.9)$$

Доведення виконаємо від супротивного, тобто нехай існує елемент  $a \in A$ , але який не належить  $\bigcup_{K \in H_B} A(x)$ . Нехай  $X = \varphi^{-1}(a)$ , тоді, взявши  $x, y \in X$ , одержимо, що в наборі  $H_B$  не існує класу толерантності, що містить  $x$  та  $y$  одночасно. Останнє означає, що  $H_B$  не є базою. Отримана суперечність і доводить твердження.

Зазначимо, що якщо розглядається довільна система  $H$  класів толерантності, що має властивість 1, як показано в [Шрейдер Ю.А. Равенство, сходство, порядок. М.: Наука, 1971. 254 с.], використовуючи трансфінітну індукцію, можна з  $H$  виділити  $H_B$ , тобто побудувати базис. Отже, базис існує в будь-якому просторі толерантності.

На закінчення цього розділу наведемо теорему, що була доведена незалежно Л. Кальмаром і С. Якубовичем [Кальмар Л. Значения, синонимия и перевод. // Доклад на симпозиуме «Матперевод – 67», Будапешт, 1967.; Якубович С.М. Аксиоматическая теория сходства. // Научно-техническая информация. М.: ВИНТИ, №10, 1968.]. [13,14]

*Теорема 3.4.8* Довільне відношення толерантності  $\tau$  на множині  $\Omega$  можна задати як відношення, породжене деяким усіди визначеним відображенням  $\varphi : \Omega \rightarrow H$ .

**3.5 Незалежні елементи (об'єкти). Вважаємо, що відношення толерантності  $\tau$  на множині елементів  $\Omega$  задано за допомогою усіди визначеного відображення**

$$\varphi : \Omega \rightarrow A. \quad (3.10)$$

*Визначення 3.5.1* Два елементи  $x$  і  $y$ , що належать  $\Omega$ , будемо називати незалежними, якщо  $A(x) \cap A(y) = \emptyset$ , тобто елементи  $x$  і  $y$  не мають спільних ознак, що означає  $x \bar{\tau} y$ .

*Визначення 3.5.2* Множину  $M \subseteq \Omega$  будемо називати набором незалежних змінних, якщо

1.  $(\forall x, y \in M) \ x \bar{\tau} y$  ;
2.  $(\forall z \in \Omega \setminus M) (\exists x \in M) \ x \tau z$  .

Існування множини  $M$  впливає з теореми 3.1.1, але очевидно, що  $M$  у  $\langle \Omega, \tau \rangle$  визначається неоднозначно. Позначимо через  $\mathbf{M}$  – набір усіляких множин типу  $M$  простору толерантності  $\langle \Omega, \tau \rangle$ .

*Теорема 3.5.3* Існують такі нерозкладні простори толерантності  $\langle \Omega, \tau \rangle$ , що

$\forall M \in \mathbf{M}$  наявне

$$\bigcup_{x \in M} A(x) \subseteq A . \quad (3.11)$$

Щоб переконатися в справедливості теореми, досить розглянути приклад, коли

$$\Omega = \{x_1, x_2\}; A = A(x_1) \cup A(x_2); A(x_1) \cap A(x_2) \neq \emptyset; A(x_1) \Delta A(x_2) \neq \emptyset .$$

Тоді  $M_1 = \{x_1\}$ ,  $M_2 = \{x_2\}$ ,  $\mathbf{M} = \{\{x_1\}, \{x_2\}\}$  і очевидно, що умова теореми 4.1.8 виконана. Однак наявна теорема 3.5.3.

*Теорема 3.5.3* Для будь-якого нерозкладного простору толерантності  $\langle \Omega, \tau \rangle$  справедливо

$$\bigcup_{M \in \mathbf{M}} \bigcup_{x \in M} A(x) = A \quad (3.12)$$

*Доведення.* Справедливість даної теореми випливає з наступного твердження:

$$\bigcup_{M \in \mathbf{M}} M = \Omega . \quad (3.13)$$

Доведення цього твердження виконаємо від супротивного, тобто нехай  $\Omega \setminus \bigcup_{M \in \mathbf{M}} M \neq \emptyset$ , тоді якщо  $z \in \Omega \setminus \bigcup_{M \in \mathbf{M}} M$ , то  $z$  належить будь-якому класу толерантності і його можна взяти як  $M = \{z\}$ , а це означає, що  $\mathbf{M}$  містить не всі набори незалежних змінних, що суперечить його визначенню. Справедливість теореми 3.5.3. одержуємо, розглянувши такий ланцюжок.

$$\bigcup_{M \in \mathbf{M}} M = \Omega \rightarrow \bigcup_{M \in \mathbf{M}} \bigcup_{x \in M} A(x) = \bigcup_{x \in \Omega} A(x) = A$$

### *Висновки*

Структурний аналіз систем пропонує декілька моделей до розгляду на предмет прийняття рішення про вибір моделі. Даний метод може більш точно описати досліджуваний процес оскільки враховує зв'язки (наприклад статистичні) між його елементами і тому він більш переважає перед методами типу метода групового обліку елементів(факторів).



## РОЗДІЛ 4

### Структурне моделювання за допомогою регресійного аналізу

#### 4.1 Постановка задачі.

Нехай інформація досліджуваного процесу задається результатами пасивного експерименту у вигляді матриці спостережень, їх значення задаються результатами пасивного експерименту у вигляді матриці спостережень

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1L} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2L} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N1} & x_{N2} & \dots & x_{NL} \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

де  $x_{ij}$  значення показника  $X_i$  в  $j$ -м досвіді. Одним з можливих способів визначення структури процесу є відновлення взаємозв'язків між змінними з множини показників  $X$ .

Проблема моделювання полягає у структурній невизначеності процесу, коли взаємозв'язки між його показниками (елементами системи) невідомі. Моделювання методами регресійного аналізу припускає завдання наборів двох типів: наборів незалежних показників (змінних) - предикторів та показників, що розраховуються по моделі - функціям. Вибір кращих, в деякому розумінні, предикторів реалізується в процесі вирішення задачі параметричної ідентифікації і, як правило, призводить до великого перебору варіантів математичних моделей, що описують процес  $X$ .

*Визначення 1.* Непорожня підмножина показників  $Y \in X$  множин, що характеризують деяку якість процесу, будемо називати вихідними показниками.

Статичні процеси досліджуються за допомогою регресійних методів завдяки простоті застосування. Розрізняють статичну задачу для процесів з одним вихідним показником і декількома вхідними, а також статичну задачу для процесів з декількома вихідними показниками і декількома вхідними. Процес має  $m$  входів і  $n$  виходів описується системою лінійних алгебраїчних рівнянь  $n$ -го порядку, яка в матричній формі має вигляд

$$Y = AX, \quad (4.2)$$

де  $Y$  - вектор вихідних показників,  $X$  - вектор вхідних показників,  $A$  - матриця коефіцієнтів процесу, які, як правило, необхідно в процедурі ідентифікації.

По суті, підмножина вихідних показників є деякими функціями від підмножини аргументів - незалежних показників. Іншими словами підмножина незалежних показників утворює безліч аргументів для вихідних показників. Тепер стоїть завдання про розбиття всієї множини показників досліджуваного процесу на дві підмножини: підмножини незалежних показників (аргументів) і підмножини вихідних показників процесу (показників-функцій).

Незалежна (пояснююча) змінна, яка застосовується для прогнозу залежної змінної у регресійному аналізі, також називається незалежною або предикторною змінною або коваріатой.

*Визначення 2.* Задачу розбиття багатьох показників процесу  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_L\}$  на дві непересікаючі непусті підмножини – підмножина незалежних показників  $M$  - предикторів та підмножина вихідних показників  $Y$

$$M \neq \emptyset, \quad M \in X, \quad Y \in X, \quad M \cup Y = X, \quad M \cap Y = \emptyset, \quad (4.3)$$

будемо називати задачею визначення структури математичної моделі досліджуваного процесу.

#### **4.2 Дослідження наявності зв'язку між показниками.**

У статистичному аналізі розрізняють наступні види зв'язків між факторами:

- Функціональні;
- Стохастичні;
- Статистичні.

*Визначення 3.* Функціональний зв'язок – зв'язок між показниками процесу, при якому кожному значенню однієї величини відповідає строго певне значення іншої, тобто

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (4.4)$$

Дослідженням таких зв'язків статистика не займається.

*Визначення 4.* Стохастичний зв'язок відповідає ситуації, коли зміна значення одного показника веде до зміни закону розподілу іншого.

Для дискретного випадку це означає, що кожному значенню одного показника відповідає набір значень іншого, причому кожне значення має свою ймовірність реалізації (приклад марківські ланцюги).

*Визначення 5.* Статистичний зв'язок означає, що значення одного показника змінюється в середньому у залежності від того, які значення приймає інший. Дуже часто статистичний зв'язок розглядається як функціональна залежність з випадковою помилкою

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_m) + \varepsilon, \quad (4.5)$$

де -  $Y = F(x_1, x_2, \dots, x_m)$  функція, що описує залежність  $Y$  від сукупності незалежних змінних  $x_1, x_2, \dots, x_m$ , а  $\varepsilon$  - деяка випадкова помилка. Відомо, що сума константи і випадкової величини є випадковою величиною. У зв'язку з цим значення  $Y$ , розраховані за вказаною формулою, будуть внаслідок додавання випадкової величини  $\varepsilon$ , також випадковими величинами.

Для визначення структури модельованого процесу необхідний вибір методу перевірки зв'язку. Ці методи призначені для перевірки гіпотез про наявність зв'язків між змінними. Вибір методу залежить від шкал вимірювання та кількості вимірюваних змінних. У даній статті взаємозв'язок між показниками оцінюється на основі кореляційного аналізу показників процесу.

Кореляційний аналіз застосовується у тих випадках, коли змінні вимірюються за допомогою шкал відносин, інтервалів або порядку. Кореляційний зв'язок являє собою окремий випадок статистичного зв'язку

$$M(Y|X=x) = \bar{y}(x), \quad (4.6)$$

тобто математичне очікування змінної  $Y$ , за умови, що випадкова величина  $X$  приймає значення  $x$ . При проведенні кореляційного аналізу виходять з наступних передумов:

- Всі спостереження незалежні;
- Спостереження мають нормальний закон розподілу.

Коефіцієнт кореляції відбиває тісноту лінійного зв'язку між двома вибірками випадкових величин. Оскільки ми маємо справу з випадковими величинами, то

однієї величини коефіцієнта парної кореляції для висновку про статистичної значущості зв'язку недостатньо. Необхідно перевірити чи значимо він відрізняється від нуля. Це можна зробити за допомогою критерію Стюдента. Фактично перевіряється гіпотеза про рівність коефіцієнта кореляції нулю. Для цього розраховується критеріальне значення, задавшись рівнем значущості

$$t_{pac} = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}, \quad (4.7)$$

де  $r$  - значення коефіцієнта кореляції, а  $n$  - кількість спостережень

Якщо розрахункове значення  $t_{pac}$  більше табличного, взятого з  $n-2$  ступенями свободи, нульова гіпотеза відкидається. Це означає, що коефіцієнт кореляції значимо відрізняється від нуля (з обраним рівнем значимості). Напівширина довірчого інтервалу для коефіцієнта кореляції визначається за формулою

$$\Delta = \frac{t_{n-2,\alpha}(1-r^2)}{\sqrt{n}}, \quad (4.8)$$

де  $r$  - значення коефіцієнта кореляції;

$t_{n-2,\alpha}$  - Табличне значення критерію Стюдента взятого з  $n-2$  ступенями свободи для заданого рівня значимості.

При використанні кореляційного аналізу слід пам'ятати, що коефіцієнт кореляції відбиває тісноту тільки лінійного зв'язку. Тому в тому випадку, коли залежно більш складні, ніж лінійні, коефіцієнт кореляції буде свідчити про відсутність зв'язку. Для складних залежностей між змінними використовуються інші статистичні методи, наприклад регресійний аналіз.

Слід мати на увазі, що при наявності фізичного зв'язку між змінними, наслідком є наявність і кореляційного зв'язку. Однак, якщо вибірка непрезентативна, коефіцієнт кореляції буде близький до нуля і незначним. Наявність статистичного зв'язку обов'язково означає наявність фізичного.

### 4.3 Алгоритми структурного моделювання.

При визначенні множин аргументів моделі число їх може бути довільним. Дослідник (експерт, особа приймає рішення - ОПР) може вказати

будь-які аргументи з множин і показників. Що залишилися показники якості не будуть впливати на загальне уявлення досліджуваної системи. Проте виділення найважливіших показників, які можуть служити аргументами, представляє інтерес при побудові різних аналітичних методів наближеного вивчення досліджуваної системи. Для виявлення лінійної залежності між показниками, як уже обмовлялося, використовуються властивості коефіцієнта кореляції випадкових величин.

Нехай для спостережуваного у пасивному експерименті процесу  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_L\}$  побудована матриця кореляції  $R = [r_{ij}]$ ,  $i, j = \overline{1, L}$ . Процесу що вивчається поставимо у відповідність неорієнтовані граф  $G(X, E)$  з множин вершин показників  $X$ , множин вершин  $E$ , що визначаються матрицею суміжності,  $Q = [q_{ij}]$ ,  $i, j = \overline{1, L}$  [17]. Елементи матриці суміжності  $q_{ij}$  визначимо за наступним правилом. Якщо показник  $X_i$  корелює з показником  $X_j$ , то в графі  $G(X, E)$  вершини  $X_i$  і  $X_j$  з'єднані ребром, а елемент матриці суміжності  $q_{ij}$  дорівнює

$$q_{ij} = \begin{cases} 1, & q_{ij} > r_{\epsilon\delta} \\ 0, & q_{ij} \leq r_{\epsilon\delta} \end{cases}, \quad i, j = \overline{1, L}, \quad (4.9)$$

де  $r_{\epsilon\delta} = r_{\epsilon\delta}(\alpha, \nu)$  критичне значення коефіцієнта кореляції, взяте з відповідним рівнем значимості  $\alpha$  і числом ступенів свободи  $\nu$ , і який може бути або обчислений з виразу (16), або знайдений в спеціальних статистичних таблицях.

Далі необхідно вирішити наступні завдання

- Розбити множини  $X$  на дві непересічних непустих підмножин  $M$  - підмножина предикторів та підмножина функцій  $Y = X \setminus M$ ;

- Визначити структуру математичної моделі для множин  $M$  і множин функцій  $Y$ .

Визначення. Структурою досліджуваного процесу будемо називати трійцю  $(X, Q, M)$ ,  $M \neq \emptyset$ .

Пропонуються наступні алгоритми розбиття множини показників з метою визначення структури математичної моделі.

### Алгоритм 1.

Вихідні дані: матриця спостережень показників процесу у пасивному експерименті.  $X$ .

Крок 1. Задаємося рівнем значимості  $\alpha$  і обчислюємо число ступенів свободи  $\nu$ . Обчислюємо або визначаємо за спеціальними статистичними таблицями критичне значення коефіцієнта кореляції  $r_{\alpha\delta}(\alpha, \nu)$ .

Крок 2. Розраховуємо матрицю кореляції  $R = [r_{ij}]$ , для спостережуваних показників  $X_i, X_j$ ,  $i, j = \overline{1, L}$ .

Крок 3. Будуємо матрицю суміжності,  $Q = [q_{ij}]$ ,  $i, j = \overline{1, L}$  (3) і по даній матриці будуємо граф.  $G(X, E)$

Крок 4. Вважаємо  $M = \emptyset$  - безліч показників-предикторів та  $Y = \emptyset$  - безліч показників-функцій.

Крок 5. За рішенням експерта (ОПР) показник  $X_i$  береться в якості функції (залежного показника).

Крок 6. Будуємо множини - множини індексів вершин суміжних до вершини  $X_i$ .

Крок 7. Якщо множини  $I_i$  не порожні, тоді вершини,  $\{X_k\}$ ,  $k \in I_i$  інцидентні ребра які йдуть до вершини,  $X_i$  додаються у множини  $M$ .

Крок 8. Вершину  $X_i$  додаємо у множину  $Y$ .

Крок 9. З графа  $G(X, E)$  виділяємо  $X_i$  вершину і вершини  $\{X_k\}$ ,  $k \in I_i$   
 $G(X, E) = G(X, E) \setminus X_i \setminus \{X_k\}_{k \in I_i}$

Крок 10. Якщо  $G(X, E) \neq \emptyset$ , то повторюємо з кроку 5.

Крок 11. Якщо множина  $M = \emptyset$ , то структуру процесу по заданому алгоритму визначити не можна. Алгоритм закінчений. Всі показники є незалежними випадковими величинами з обраною довірчою ймовірністю.

Крок 12. Якщо множина  $M \neq \emptyset$ , то перевіряємо умову  $M \cup Y = X$ . Якщо дана умова виконана - алгоритм закінчений.

По закінченню алгоритму в множині  $M$  буде міститися список незалежних показників  $M = \{X_l\}$ ,  $l \in I_M$ ,  $I_M$  - список індексів предикторних показників, а

множина  $Y$  буде містити список вибраних експертом вихідних (залежних) показників  $Y = \{X_i\}, i \in I_Y, I_Y$  - список індексів залежних показників (функцій).

Відповідно до запропонованого вище алгоритму, будується лише один набір предикторних змінних, на відміну від методу викладеного в роботах, де може бути отримано декілька таких наборів.

Нехай множину предикторних змінних складають показники  $M = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ , множина функцій утворюється показниками  $Y = \{Y_{m+1} = X_{m+1}, Y_{m+2} = X_{m+2}, \dots, Y_L = X_L\}$ .

Математичну модель тепер можна записати у вигляді :

$$\begin{cases} Y_{m+1} = X_{m+1} = f_{m+1}(X_1, X_2, \dots, X_m) \\ Y_{m+2} = X_{m+2} = f_{m+2}(X_1, X_2, \dots, X_m) \\ \dots \\ Y_L = X_L = f_L(X_1, X_2, \dots, X_m). \end{cases}$$

Вид функцій у правій частині в загальному випадку вибирається неоднозначно, але у нашому випадку праві частини представленої моделі розглядаються як багатовимірні рівняння лінійної регресії (оскільки зв'язки між показниками визначено як лінійні).

Представлений вище алгоритм 1 в практичних цілях задати можна і трохи інакше, працюючи не з побудованим графом, а тільки з матрицею суміжності.

*Алгоритм 1М (оперування з матрицею суміжності).*

Крок 1-3 залишається без змін.

Крок 5. За рішенням експерта (ОПР), якщо показник  $X_i$  береться в якості функції (залежного показника), відзначаємо  $i$ -й рядок матриці суміжності як «функція», рядок помічаємо, наприклад, спеціальним символом (+). Показник  $X_i$  приєднуємо до безлічі залежних показників (функцій)  $Y$ .

Крок 6. Переглядаємо обраний  $i$ -й рядок матриці суміжності. Виявивши елемент  $q_{ij}=1$ , стовпець  $j$  і рядок  $j$  відзначаємо як «предикторну змінну», вказаний рядок і стовпець помічаємо спеціальним символом (\*). Показник  $X_j$  приєднуємо до безлічі незалежних показників  $M$ . Якщо в рядку є кілька таких елементів, то помічаємо відповідні рядки і стовпці символом (\*).

Крок 7. Якщо в матриці суміжності є невідмічені рядки, то повторюємо описану процедуру в кроці 6 з тим рядком, відповідний показник якого, з якихось суб'єктивних причин, експерт обрав в якості залежного показника.

Крок 8. Якщо в матриці суміжності більше не залишилося невідмічених спеціальними символами рядків, тоді рядки відмічені символом (\*) утворюють безліч предикторних змінних  $M$ , а рядки відмічені символом (+) - безліч залежних показників  $Y$ .

Симетричність матриці суміжності дозволяє обмежитися розглядом трикутної матриці (нижче головної діагоналі або вище).

Наступний алгоритм враховує компоненти зв'язності побудованого графа  $G(X, E)$ .

Нехай досліджуваному процесу відповідає граф  $G(X, E)$  з множиною вершин  $X$  і безліччю ребер  $E$ , що визначаються матрицею суміжності,  $Q = [q_{ij}]$   $i, j = \overline{1, L}$ . Граф визначається, як і у випадку алгоритму 1. Зауважимо, що граф  $G(X, E)$  може утворюватися його компонентами зв'язності  $G_1, G_2, \dots, G_p$

$$G(X, E) = G_1 \cup G_2 \cup \dots \cup G_p.$$

Ця можливість відповідає тому, що процес  $X$  може розглядатися як  $p$  незалежних підпроцесів, які можуть аналізуватися окремо один від одного.

Незалежність показників означає, що зміна одного показника безпосередньо не впливає на зміну іншого. На графі така ситуація означає, що відповідні незалежним показниками вершини не з'єднуються ребром, при цьому непрямий вплив не виключається.

*Визначення 6.* Вершини графа  $X_i, X_j$  будемо називати незалежними, якщо вони несуміжні один одному.

Незалежні вершини не інцидентні одному і тому ж ребру, тобто безпосередньо не з'єднуються один з одним. В основі наступного алгоритму лежить поняття компоненти зв'язності неорієнтованого графа.



## Алгоритм 2.

Вихідні дані: матриця спостережень показників процесу в пасивному експерименті  $X$ .

Крок 1. Задаємося рівнем значущості  $\alpha$  і обчислюємо число ступенів свободи  $\nu$ . Обчислюємо або визначаємо за спеціальними статистичними таблицями критичне значення коефіцієнта кореляції  $r_{\alpha\delta}(\alpha, \nu)$ .

Крок 2. Розраховуємо матрицю кореляції  $R = [r_{ij}]$ , для спостережуваних показників  $X_i, X_j$ ,  $i, j = \overline{1, L}$ .

Крок 3. Будуємо матрицю суміжності  $Q = [q_{ij}]$ ,  $i, j = \overline{1, L}$  і по даній матриці будуємо граф  $G(X, E)$ .

Крок 4. Виділяємо компоненти зв'язності графа  $G(X, E) : G_1, G_2, \dots, G_p$

Крок 5. Покласти  $k = 1$ .

Крок 6. Для компонентів зв'язності  $G_k$  застосуємо алгоритм 1. Отримаємо набір предикторних змінних  $M_k$  і безліч показників-функцій  $Y_k$ .

Крок 7. Для кожної функції з  $Y_k$  експерт (ЛПР) визначає безліч незалежних змінних  $\tilde{M}_k \subset M_k$ . Множина  $\tilde{M}_k$  формується тільки з незалежних вершин компонентів зв'язності (підграфа)  $G_k$  і тільки тих, які безпосередньо пов'язані ребром з розглянутого вершиною з множини показників-функцій.

Крок 8. Покласти.  $k = k + 1$

Крок 9. Якщо  $k \leq p$ , повертаємося до кроку 6.

У результаті проходження алгоритму 2 для кожного компоненту зв'язності отримаємо набори предикторних змінних  $\tilde{M}_k, k = \overline{1, p}$ . Моделі виду () будуються для всіх  $\tilde{M}_k, k = \overline{1, p}$ .

Зауваження. Безліч предикторних змінних за запропонованими алгоритмами єдиним чином не будується. Вміст множин  $M$  і  $\tilde{M}_k$  залежить від рішень прийнятих експертом.

При виборі безлічі показників-функцій  $Y$  і побудови безлічі незалежних показників слід виходити, перш за все, з інженерного сенсу останніх і їх реального фізичного взаємозв'язку

Набір незалежних показників для кожної розглянутої функції може відрізнятися, але може бути і повним, тобто таким, яким є безліч предикторів  $M$  або  $\tilde{M}_k$ .

При визначенні коефіцієнтів моделі необхідно спостережувані показники центрувати і нормувати, щоб уникнути надмірного впливу окремих показників на значення, які приймаються моделлю.

При застосуванні запропонованих алгоритмів необхідно в рівняннях моделі досліджувати, чи визначаються коефіцієнти на значущість. Процедура перевірки на значущість може служити інструментом для уточнення набору незалежних змінних в рівняннях моделі на основі безлічі предикторних показників  $M$  або  $\tilde{M}_k$ .

#### 4.4 Функції моделі.

Теоретично моделлю може бути будь-хто. Обговоримо тільки лінійний випадок. На практиці більшість моделей, що підбираються містять безпосередньо спостережувальні предикторні змінні  $X_1, X_2, \dots, X_m$  тобто модель має вигляд  $Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_m X_m + \varepsilon$  (4)

Обговоримо тільки лінійний випадок. Проте можливі і більш загальні форми.

Найбільш загальна лінійна модель, містить змінні,  $X_1, X_2, \dots, X_m$ , має вигляд

$$Y = b_0 Z_0 + b_1 Z_1 + \dots + b_p Z_p + \varepsilon \quad (5), Z_0 = 1 \text{ — Фіктивна змінна, яка зазвичай}$$

приймає значення одиниці. Іноді для зручності обчислень має сенс ввести в

модель наступну змінну. Якщо  $(Z_{1i}, Z_{2i}, \dots, Z_{pi})$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  - наборів значень

змінних  $Z_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$  відповідних спостереженнями  $Y_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , то має

місце  $\sum_{i=1}^N Z_{ji} = \sum_{i=1}^N Z_{ji} Z_{0i}$ ,  $j \neq 0$  і при записі нормальних рівнянь дана сума може

бути представлена як  $\sum_{i=1}^N Z_{ji} Z_{li}$  У рівнянні (5) кожна змінна  $Z_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$  є

довільною функцією змінних  $X_1, X_2, \dots, X_m$ . У деяких випадках кожна змінна  $Z_j$  може містити лише одну змінну  $X_i$ . Будь-яку модель, яка в результаті перетворень запишеться у вигляді (5), можна аналізувати за допомогою загальних методів.

### *Висновок*

В основу виділення структур досліджуваного процесу покладено існування кореляційного зв'язку між його елементами. Кореляційний зв'язок представляється графом (математична модель процесу). Структури процесу утворюються на основі поняття зв'язності в графі. По представленим алгоритмам можна виділяти структуру взаємозв'язаних елементів як елемент зв'язності графа. Із більшості структур процесу, необхідна обирається експертом.

## РОЗДІЛ 5

### *Структурний аналіз відмов пристроїв залізничної автоматики*

#### 5.1 Початкові дані.

Розглянемо процедуру структурного моделювання процесу відмов систем залізничної автоматики і телемеханіки. В якості вихідних даних для побудови моделі було вибрано 9 об'єктів, порушення нормального функціонування яких найчастіше є причиною відмов СЗАТ або неправильного їх функціонування на дистанціях. Вибрані об'єкти дослідження та їх умовні позначення наведені в табл. 1.

*Таблиця 1 - Відмови систем автоматики*

Позначення	Види відмов(показники)
X <sub>1</sub>	Відмови в роботі рейкового кола
X <sub>2</sub>	Відмови в роботі апаратури
X <sub>3</sub>	Відмови в роботі електродвигунів
X <sub>4</sub>	Несправність кабельних ліній
X <sub>5</sub>	Несправність повітряних ліній
X <sub>6</sub>	Відмова або помилкова робота сигналів
X <sub>7</sub>	Відмови пультів табло
X <sub>8</sub>	Порушення електроживлення
X <sub>9</sub>	Відмови елементів захисту

Об'єкти для побудови математичної моделі відмов СЗАТ обиралися виходячи з того як часто з ними траплялися несправності, а також з точки зору їх впливу на роботу систем у цілому. Наведемо лише матрицю кореляції

показників (кількість спостережень було  $n = 24$ ). Номер рядка, номер стовпця відповідає номеру показника в табл.1.

$$R = \begin{pmatrix} 1 & -0,451 & -0,11 & -0,287 & 0,503 & -0,212 & 0,91 & 0,243 & -0,171 \\ -0,451 & 1 & -0,026 & 0,521 & -0,004 & 0,372 & 0,174 & -0,029 & 0,363 \\ -0,11 & -0,026 & 1 & -0,215 & -0,215 & 0,234 & 0,234 & 0,199 & 0,02 \\ -0,287 & 0,521 & -0,215 & 1 & 0,027 & 0,381 & -0,039 & -0,062 & 0,354 \\ 0,503 & -0,004 & -0,215 & 0,027 & 1 & 0,32 & 0,418 & -0,017 & 0,077 \\ -0,212 & 0,372 & 0,234 & 0,381 & 0,32 & 1 & 0,29 & -0,119 & 0,347 \\ 0,91 & 0,174 & 0,234 & -0,039 & 0,418 & 0,29 & 1 & 0,381 & 0,016 \\ 0,243 & -0,029 & 0,199 & -0,062 & -0,017 & -0,119 & 0,381 & 1 & -0,085 \\ -0,171 & 0,363 & 0,02 & 0,354 & 0,077 & 0,347 & 0,016 & -0,085 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Критичне значення коефіцієнта кореляції  $r_{\text{ед}} = 0.36$  при рівні значущості  $\alpha = 0.1$ . Відповідно до алгоритму 1 складемо матрицю суміжності:

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5.2)$$

Показник  $X_5$  в аналізі враховувати не будемо (даний показник непрезентативний у наявній вибірці). По матриці  $Q$  побудуємо граф зв'язків процесу.

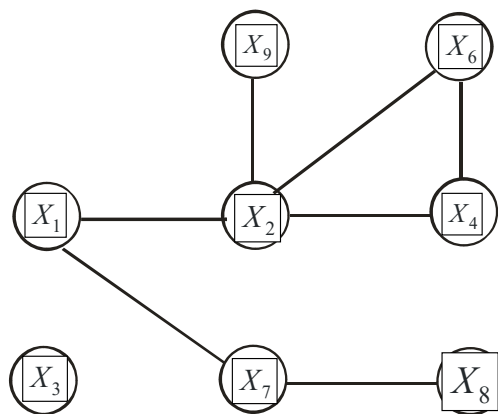


Рисунок 1 – Граф кореляційної залежності відмов,  $\alpha = 0.1$

Умовою експерта є вимога залишити показник відмов роботи рейкового кола  $X_1$  в аргументах, щодо інших показників які небудь вимоги відсутні.

Скористаємося алгоритмом 1.

Розіб'ємо безліч показників  $X = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_6, X_7, X_8, X_9\}$  на непересічні множини  $M$  і  $Y$ .

Вважаємо множини  $M = \emptyset$ ,  $Y = \emptyset$ .

На першому етапі в якості функції оберемо показник  $X_2$  (прагнемо створити якомога менше незалежних показників).

Суміжними до вершини  $X_2$  є вершини  $X_1$ ,  $X_9$ ,  $X_4$ ,  $X_6$ . Вершини  $X_1$ ,  $X_9$ ,  $X_4$ ,  $X_6$  додаємо у множину  $M$ :  $M = \{X_1, X_4, X_6, X_9\}$ , вказані вершини видаляємо з графа.

Показник  $X_2$  додаємо у множину  $Y$ :  $Y = \{X_2\}$  і вершину  $X_2$  також видаляємо з графа. Одержимо граф наступного етапу.



Рисунок 2 - Граф після першого етапу

Далі виберемо показник  $X_3$  в якості функції. Кореляційні зв'язки з цією вершиною відсутні, тому виконуємо тільки операцію додавання показника  $X_3$  у множину  $Y$ :  $Y = \{X_2, X_3\}$ . Вершину  $X_3$  видаляємо з графа. Тепер граф буде мати вигляд



Рисунок 3 - Граф після другого етапу

Оберемо показник  $X_7$  у якості функції. Суміжною до вершини  $X_7$  є тільки вершина  $X_8$ . Вершину  $X_8$  додаємо у множник  $M$ :  $M = \{X_1, X_4, X_6, X_9, X_8\}$ . Вершину  $X_8$  видаляємо з графа.

Додамо показник  $X_7$  у множник  $Y$ :  $Y = \{X_2, X_3, X_7\}$ . Вершину  $X_7$  видаляємо з графа.

Вихідний граф стає порожнім. Алгоритм 1 закінчений.

Результат роботи алгоритму дає варіант  $Y = \{X_2, X_3, X_7\}$  і  $M = \{X_1, X_4, X_6, X_9, X_8\}$ .

Структура моделі буде мати вигляд:

$$\begin{cases} X_2 = Y_2 = a_{20} + a_{21}X_1 + a_{24}X_4 + a_{26}X_6 + a_{28}X_8 + a_{29}X_9 \\ X_3 = Y_3 = a_{30} + a_{31}X_1 + a_{34}X_4 + a_{36}X_6 + a_{38}X_8 + a_{39}X_9 \\ X_7 = Y_7 = a_{70} + a_{71}X_1 + a_{74}X_4 + a_{76}X_6 + a_{78}X_8 + a_{79}X_9 \end{cases} \quad (5.3)$$

Зауважимо, що при розкритті моделі (визначенні параметрів) необхідне виконання умови невід'ємних коефіцієнтів  $a_{ij}$ ,  $i \in \{2, 3, 7\}$ ,  $j \in \{1, 9, 6, 4, 8\}$

(збільшення відмов одного елемента не повинне вести до зменшення відмов іншого і відмови не можуть бути негативними величинами).

Продемонструємо роботу алгоритму 2. Вихідний граф містить два компоненти зв'язаності:  $\{X_3\}$  і  $\{X_1, X_2, X_4, X_6, X_7, X_8, X_9\}$ . Компонент зв'язаності  $\{X_3\}$  вказує на те, що відмови в роботі електродвигунів, стрілок і гарнітури є незалежними подіями. Працюємо з другою компонентою. Після застосування алгоритму 1 отримаємо набір предикторних змінних  $M = \{X_1, X_4, X_6, X_9, X_8\}$  і множини функції  $Y = \{X_2, X_7\}$ . Може бути отриманий і інший набір елементів у підмножинах  $M$  і  $Y$ .

Для показника  $X_2$  отримаємо набір незалежних змінних  $\{X_1, X_4, X_9\}$  (але можна було вказати і  $\{X_1, X_6, X_9\}$ ). Для показника  $X_7$  отримаємо набір незалежних змінних  $\{X_1, X_8\}$  (інших варіантів немає).

Складемо модель

$$\begin{cases} X_2 = Y_2 = a_{20} + a_{21}X_1 + a_{24}X_4 + a_{29}X_9 \\ X_7 = Y_7 = a_{70} + a_{71}X_1 + a_{78}X_8 \end{cases} \quad (5.4)$$

Показник  $X_3$  характеризується середнім числом відмов  $\bar{X}_3$ .

Вимога до коефіцієнтів цієї моделі та ж, що і в попередньому випадку моделювання.

Якщо рівень значимості взяти  $\alpha = 0.05$ , то  $r_{\hat{\epsilon}\hat{\delta}} = 0.4$ , тоді вихідний граф виглядає інакше, рис. 4 і, отже, структура процесу буде мати інший вигляд, ніж у розглянутому вище прикладі.

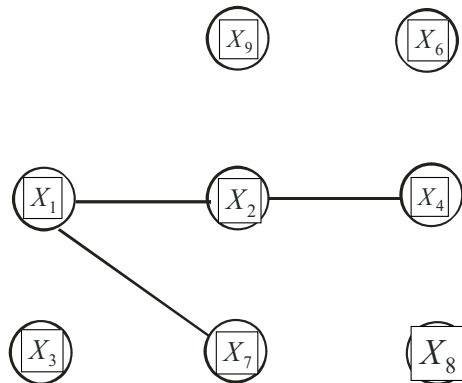


Рисунок 4 - Граф структури кореляційної залежності відмов, рівень значимості  $\alpha = 0.05$

У відповідності алгоритмі 2 система, зображена на рис.4, представляється об'єднанням наступних підсистем:  $\{X_1, X_7\}$ ,  $\{X_2, X_4\}$ ,  $\{X_3\}$ ,  $\{X_6\}$ ,  $\{X_8\}$ ,  $\{X_9\}$ .

Проведемо чисельний аналіз моделей (6) і (7). Скористаємося методом найменших квадратів, з тим застереженням, що коефіцієнти рівнянь моделей є невід'ємними значеннями. Чисельний аналіз проведений у додатку MathLab с використанням процедури `lsqnonneg(X,Y)`. Модель (6) має наступні чисельні коефіцієнти

$$\begin{cases} X_2 = Y_2 = 3.79 & + 0.57X_4 + 0.64X_6 & + a_{29}X_9 \\ X_3 = Y_3 = & 0.15X_1 & + 0.58X_6 + 1.10X_8 \\ X_7 = Y_7 = & 0.06X_1 & + 0.11X_6 + 0.17X_8 \end{cases}.$$

Коефіцієнти моделі (7) такі:

$$\begin{cases} X_2 = Y_2 = 4.74 & + 0.70X_4 & + 0.30X_9 \\ X_7 = Y_7 = 0.08 + 0.07X_1 & & + 0.18X_8 \end{cases}.$$

Побудовані моделі досліджувалися на адекватність за допомогою критерію Фішера. Всі рівняння адекватні досліджуваному процесу. Середнє значення критеріїв Фішера моделі виявилося менше ніж моделі. Дослідження на статистичну значимості коефіцієнтів не проводилося.

## 5.2 Чисельне моделювання за спостереженими даними.



Описувати суть процесу, що відбувається за допомогою одного показника зазвичай важко. Об'єктивніше процес представляється не одним показником, а декількома. Виникає питання про перевагу вибору критеріальних показників серед усієї множини можливих показників.

На практиці при дослідженні того чи іншого процесу (в тому числі і складних систем) зазвичай намагаються домагатися не однієї, а декількох цілей. Характеристики процесу визначаються багатьма критеріями, причому суттєвими і непорівняльними. Тому, дослідження процесу або системи, визначення їх структури складовий компонент по своїй суті є багатокритеріальним завданням, тобто завданням, яке вирішується з урахуванням всієї сукупності необхідних критеріїв, що характеризують процес з різних сторін. Рішення такої задачі здійснюється методами векторної оптимізації.

Виділення найважливіших критеріїв представляє інтерес при побудові різних аналітичних методів дослідження математичних моделей процесів. Особливістю викладеного вище методу визначення структури об'єктів дослідження є можливість приймати обгрунтовані рішення при виборі критеріїв оптимізації. У запропонованому методі вибору критеріальних показників число критеріїв може бути довільним.

Векторний критерій вносить у задачу невизначеність спеціального виду - вибір критерію оптимальності. Існують різні способи подолання цієї невизначеності, які і складають зміст численних методів вирішення завдань векторної оптимізації. Вони спрямовані на вишукування шляхів знаходження додаткової інформації, що дозволяє замінити векторний критерій його скалярним еквівалентом.

### *Висновки*

Систему утримання СЗАТ можна розділити на три підсистеми:

- Підсистема утримання апаратури;
- Підсистема утримання електродвигунів, стрілок і гарнітури;
- Підсистема утримання пультів, табло, апаратури управління.

Поліпшення роботи підсистем може бути досягнуте додатковими профілактичними впливами в елементах рейкового кола, кабельних ліній, сигналах, електроживленні, елементах захисту

## **ВИСНОВКИ**

1. Систему утримання СЗАТ можна розділити на три підсистеми:

- підсистема утримання апаратури;
- підсистема утримання електродвигунів, стрілок і гарнітури;
- підсистема утримання пультів, табло, апаратури управління.

2. Поліпшення в роботі апаратури може бути досягнуто профілактичними впливами в елементах кабельних ліній, в елементах сигналів, в елементах захисту.

3. Основні відмови в елементах залізничної автоматики приходяться на рейкові кола(38%). Покращення експлуатаційних показників роботи елементів залізничної автоматики може бути досягнуте удосконаленням їх системи утримання.

4. В основу виділення структур досліджуваного процесу покладено існування кореляційного зв'язку між його елементами. Кореляційний зв'язок представляється графом (математична модель процесу). Структури процесу утворюються на основі поняття звязності між показниками.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы. М.: Мир, 1978. 311 с.
2. Винер Н. Кибернетика. М.: Советское радио, 1968. -137 с.
3. Ивахненко А.Г., Мюллер Й.А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. К.: Техніка, 1985. 224 с.;
4. Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. М.: Радио и связь, 1987. 120 с.].
5. Ивахненко А.Г. Метод группового учета аргумента – конкурент метода стохастической аппроксимации. Автоматика: Киев. 1968. №3. 587 с.;
6. Ивахненко А.Г., Зайченко Ю.П., Димитров В.Д. Принятие решений на основе самоорганизации. М.: Советское радио, 1976. 280 с.;
7. Ивахненко А.Г., Степашко В.С. Помехоустойчивость моделирования. Киев: Наукова думка, 1985. 214 с.;
8. Ивахненко А.Г., Мюллер Й.А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. К.: Техніка, 1985. 224 с.;
9. Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. М.: Радио и связь, 1987. -120 с.].
10. Курош А.Г. Лекции по общей алгебре. М.: Наука, 1973. 399 с.
11. Шрейдер Ю.А. Пространства толерантности. // Кибернетика: Киев. 1970. № 2, С. 124-128
12. Шрейдер Ю.А. Равенство, сходство, порядок. М.: Наука, 1971. 254 с.
13. Кальмар Л. Значения, синонимия и перевод. // Доклад на симпозиуме «Матперевод – 67», Будапешт, 1967.;
14. Якубович С.М. Аксиоматическая теория сходства. // Научно-техническая информация. М.: ВИНТИ, №10, 1968.

## Додатки

### Рівняння регресії за визначеною структурою відмов елементів залізничної автоматики

X1=[1 13 2 1 2 3;1 20 1 2 1 2;1 16 3 2 4 0;1 15 4 3 1 3;1 16 2 3 0 1;1 18 3 2 1 0;1 22 4 4 1 4;1 20 5 0 2 3;1 21 4 2 1 0;1 14 7 2 3 5;1 21 4 1 1 1;1 20 8 2 2 3;1 16 5 6 1 6;1 20 2 2 0 1;1 13 3 3 2 1;1 16 4 3 1 2;1 14 8 6 2 1;1 14 5 3 1 0;1 13 5 2 1 3;1 15 5 3 1 2;1 12 6 3 3 2;1 10 13 5 0 5;1 11 5 2 1 2;1 10 2 3 1 3]

X1 =

1	13	2	1	2	3
1	20	1	2	1	2
1	16	3	2	4	0
1	15	4	3	1	3
1	16	2	3	0	1
1	18	3	2	1	0
1	22	4	4	1	4
1	20	5	0	2	3
1	21	4	2	1	0
1	14	7	2	3	5
1	21	4	1	1	1
1	20	8	2	2	3
1	16	5	6	1	6
1	20	2	2	0	1
1	13	3	3	2	1
1	16	4	3	1	2
1	14	8	6	2	1
1	14	5	3	1	0
1	13	5	2	1	3
1	15	5	3	1	2
1	12	6	3	3	2
1	10	13	5	0	5
1	11	5	2	1	2
1	10	2	3	1	3

Y2=[9;7;5;5;3;5;8;4;6;7;6;11;13;6;15;4;8;15;9;5;12;18;15;11]

Y2 =

9  
7  
5  
5  
3  
5  
8  
4  
6  
7  
6  
11  
13  
6  
15  
4  
8  
15  
15

9  
5  
12  
18  
15  
11

Y3=[3;2;7;2;3;4;2;5;11;6;4;9;13;6;12;11;3;5;4;2;8;3;2;6]

Y3 =

3  
2  
7  
2  
3  
4  
2  
5  
11  
6  
4  
9  
13  
6  
12  
11  
3  
5  
4  
2  
8  
3  
2  
6

Y7=[3;1;2;0;1;0;3;1;1;0;2;2;2;2;3;4;1;1;0;1;2;1;0;1]

Y7 =

3  
1  
2  
0  
1  
0  
3  
1  
1  
0  
2  
2  
2  
2  
3  
4  
1  
1  
0  
1  
2  
1  
0  
1

```

1
0
1

```

```

%Раскрытие первой структуры модели:
A1=lsqnonneg(X1,Y2)

```

```

A1 =

```

```

3.7950
0
0.5753
0.6372
0
0.2117

```

```

A2=lsqnonneg(X1,Y3)

```

```

A2 =

```

```

0
0.1561
0
0.5781
1.1016
0

```

```

A3=lsqnonneg(X1,Y7)

```

```

A3 =

```

```

0
0.0576
0
0.1053
0.1740
0

```

```

%Начальные данные второй структуры:

```

```

X2=[1 13 2 3;1 20 1 2;1 16 3 0;1 15 4 3;1 16 2 1;1 18 3 0;1 22 4 4;1 20 5
3;1 21 4 0;1 14 7 5;1 21 4 1;1 20 8 3;1 16 5 6;1 20 2 1;1 13 3 1;1 16 4 2;1
14 8 1;1 14 5 0;1 13 5 3;1 15 5 2;1 12 6 2;1 10 13 5;1 11 5 2;1 10 2 3]

```

```

X2 =

```

```

1      13      2      3
1      20      1      2
1      16      3      0
1      15      4      3
1      16      2      1
1      18      3      0
1      22      4      4
1      20      5      3
1      21      4      0
1      14      7      5
1      21      4      1
1      20      8      3
1      16      5      6
1      20      2      1
1      13      3      1
1      16      4      2
1      14      8      1
1      14      5      0
1      13      5      3
1      15      5      2
1      12      6      2
1      10     13      5
1      11      5      2
1      10      2      3

```

1	14	8	1
1	14	5	0
1	13	5	3
1	15	5	2
1	12	6	2
1	10	13	5
1	11	5	2
1	10	2	3

```
X3=[1 13 2;1 20 1;1 16 4;1 15 1;1 16 0;1 18 1;1 22 1;1 20 2;1 21 1;1 14 3;1
21 1;1 20 2;1 16 1;1 20 0;1 13 2;1 16 1;1 14 2;1 14 1;1 13 1;1 15 1;1 12 3;1
10 0;1 11 1;1 10 1]
```

X3 =

1	13	2
1	20	1
1	16	4
1	15	1
1	16	0
1	18	1
1	22	1
1	20	2
1	21	1
1	14	3
1	21	1
1	20	2
1	16	1
1	20	0
1	13	2
1	16	1
1	14	2
1	14	1
1	13	1
1	15	1
1	12	3
1	10	0
1	11	1
1	10	1

%Раскрытие второй структуры модели:

```
A4=lsqnonneg(X2,Y2)
```

A4 =

4.7414
0
0.7015
0.3026

```
A5=lsqnonneg(X3,Y7)
```

A5 =

0.0819
0.0689
0.1774