

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерні технології і системи»

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

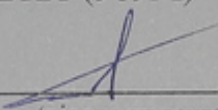
Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

на тему: Математичне моделювання відмов пристроїв залізничної автоматики

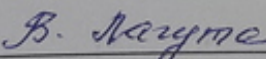
за освітньою програмою «Системи керування рухом поїздів»
зі спеціальності: 273 «Залізничний транспорт»

Виконав: студент групи СК2121 (969М)


(підпис студента)

/ Владислав ЯКИМЧУК /

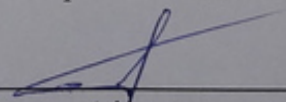
Керівник: доцент кафедри АТ


(підпис керівника)

/ Василь ЛАГУТА /

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з
праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент


(підпис студента)

Дніпро – 2022 рік

**Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій**

Факультет «Комп'ютерні технології і системи»

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

на тему: Математичне моделювання відмов пристроїв залізничної автоматики

за освітньою програмою «Системи керування рухом поїздів»
зі спеціальності: 273 «Залізничний транспорт»

Виконав: студент групи СК2121 (969М)

Владислав ЯКИМЧУК /

(підпис студента)

Керівник: доцент кафедри АТ

_____ / Василь ЛАГУТА /
(підпис керівника)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з
праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис студента)

Дніпро – 2022 рік

**Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies**

Faculty of Computer Technologies and Systems

Department of Automation and Telecommunication

Explanatory Note

to Master's Thesis

master

(higher education degree)

Train movement control systems»
in the Specialty: 273 Railway transport

Dnipro – 2022

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Комп'ютерні технології та системи
Кафедра: Автоматика та телекомунікації
Рівень вищої освіти: магістр
Освітня програма: Системи керування рухом поїздів
Спеціальність: 273 Залізничний транспорт

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри АТ

(підпис) Володимир ГАВРИЛЮК

Дата _____

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу _____
магістр _____
(ступінь вищої освіти)

студенту Якимчуку Владиславу Вікторовичу
(Прізвище, Ім'я, По батькові)

1. Тема
роботи: Математичне моделювання відмов пристроїв залізничної
автоматики

Керівник роботи: Лагута Василь Васильович, к.т.н., доцент
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від "18" жовтень 2021 р. № 704-ст

2. Строк подання студентом роботи: 15. грудня. 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи: Спостереження за відмовами елементів залізничної
автоматики

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналітична частина: виконати аналіз методів дослідження;
обґрунтувати та описати обраний метод дослідження;

4.2 Основна частина: визначити вплив відмов одних елементів залізничної
автоматики на інші елементи;

скласти математичну залежностей відмов елементів залізничної автоматики;
дослідити математичну модель на адекватність; сформулювати висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

актуальність роботи; постановка задачі дослідження; теоретичні основи
структурного моделювання; обґрунтування та опис методу дослідження;
висновки;

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)
Аналітична частина	Лагута В.В.	21.10.2021	
Основна частина	Лагута В.В.	21.10.2021	

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ (Актуальність. Мета роботи. Методи дослідження. Практична значення отриманих результатів)	15.09.2022	
2	1. Огляд розвитку системного моделювання	01.10.2022	
3	2. Аналіз відмов пристроїв залізничної автоматики	15.10.2022	
4	3. Теоретичні основи структурного моделювання Математичне моделювання. Етапи моделювання. Види математичного моделювання. Наявність зв'язків між змінними. Вибір метода перевірки наявності зв'язків. Кореляційний аналіз)	01.11.2022	
5	4. Структурний аналіз зв'язків між відмовами пристроїв залізничної автоматики (Побудова структурної математичної моделі аналізу зв'язків відмов пристроїв залізничної автоматики. Застосування параметричної кореляції. Значущість коефіцієнта кореляції. Структурний аналіз. Матричний підхід до застосування методу найменших квадратів. Перевірка математичної моделі на адекватність)	01.12.2022	
6	Висновки	10.12.2022	
7	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	15.12.2022	
8	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	20.12.2022	

Студент

Владислав ЯКИМЧУК

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

Василь ЛАГУТА

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра: 59 с., 3 рис., 4 табл., 35 джерел.

Об'єкт дослідження – процес відмов пристроїв залізничної автоматики.

Мета дослідження – з'ясування взаємозв'язків відмов пристроїв системи залізничної автоматики та телемеханіки (СЗАТ) на основі кореляційного аналізу, побудова математичної моделі короткострокового прогнозування відмов на основі структурного моделювання, надання рекомендацій по покращенню системи утримання пристроїв залізничної автоматики та телемеханіки.

Методи дослідження – кореляційний аналіз, теорія графів, математична статистика, теорія надійності.

В роботі виконано аналіз методів структурного моделювання, обґрунтовано та описано обраний метод дослідження. Виконано статистичний аналіз відмов пристроїв СЗАТ, за спостереженнями відмов пристроїв залізничної автоматики, розроблено математичну модель визначеної структури та досліджено отриману модель на адекватність. За результатами досліджень сформульовано висновки по покращенню системи утримання пристроїв СЗАТ.

Результати роботи може бути використано для покращення системи утримання пристроїв СЗАТ та в учбовому процесі.

Ключові слова: СТРУКТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ, СИСТЕМИ УТРИМАННЯ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ, НАДІЙНІСТЬ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ, ПРЕДИКТОРНІ ЗМІННІ

ВСТУП	3
1 Побудова структурної математичної моделі аналізу зв'язків відмов	10
2 Аналіз впливу параметрів моделі на результати аналізу	15
3 Метод найменших квадратів	32
3.1 Метод найменших квадратів	32
3.2 Метод найменших квадратів	32
3.3 Метод найменших квадратів	32
3.4 Метод найменших квадратів	32
3.5 Метод найменших квадратів	32
3.6 Метод найменших квадратів	32
3.6.1 Параметрична кореляція (коефіцієнт кореляції Пірсона)	31
3.6.2 Метод найменших квадратів	32

елементній базі та обчислювальній техніці, цифрових мережах передачі інформації. Це поставило нові вимоги до забезпечення надійності пристроїв, системи їх утримання та безпеки руху поїздів.

Актуальність теми. Основними технічними заходами, що забезпечують автоматичне регулювання і безпеку руху поїздів є пристрої автоматики і телемеханіки. Підвищення безпеки руху поїздів забезпечується за рахунок вчасного усунення потенційно-небезпечних відмов і зменшення ймовірності виникнення небезпечних ситуацій. Зменшення відмов пристроїв в системі залізничної автоматики та телемеханіки (СЗАТ) та удосконалення системи утримання пристроїв є важливою технічною задачею.

Об'єкт дослідження – процес відмов пристроїв залізничної автоматики та телемеханіки.

Мета дослідження. Метою дослідження є з'ясування взаємозв'язків на основі кореляційного аналізу відмов пристроїв залізничної автоматики, побудова математичної моделі короткострокового прогнозування відмов на основі структурного моделювання, надання рекомендацій по покращенню системи утримання пристроїв залізничної автоматики та телемеханіки.

Методи дослідження. В магістерській роботі використовувались кореляційний аналіз, теорія графів, математична статистика, теорія надійності, теорія наближення функцій.

Задачі дослідження. В роботі вирішені наступні задачі:

- огляд розвитку системного моделювання;
- статистичний аналіз відмов пристроїв залізничної автоматики;
- системне моделювання пристроїв залізничної автоматики;
- структурний аналіз відмов пристроїв залізничної автоматики.

Практичне значення виконаного дослідження. Результати роботи можуть бути використано для короткострокового прогнозування стану пристроїв СЗАТ за статистичними даними про відмови пристроїв СЗАТ. По результатам прогнозу може бути внесено корекції в діючу систему

утримання пристроїв СЗАТ. Результати роботи використовуються в лекціях дисципліни «Надійність та діагностування».

1 ОГЛЯД РОЗВИТКУ СИСТЕМНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

1.1 Аналіз структур системного моделювання

Активізація системних досліджень, що роблять акцент на розгляді явищ як складних, динамічних систем, що самоорганізуються, вказує на необхідність розробки та освоювання відповідного математичного апарату. Такі дослідження спираються на сучасні математичні методи вивчення нелінійних динамічних систем: нейронні мережі, імітаційне моделювання, структурне моделювання тощо.

Структурне моделювання (Structural Equation Modeling) – це потужний статистичний метод перевірки та оцінки причинно-наслідкових зв'язків між структурами даних, виходячи з їхньої якісної причинності. SEM дозволяє не тільки перевіряти та підтверджувати гіпотетичні моделі та конструкти, але й розвивати теорії, розробляти методики дослідження.

Однією з переваг структурного моделювання є можливість побудови латентних змінних (прихованих, які безпосередньо не вимірюються, але оцінюються в моделі за допомогою декількох вимірних величин). Тут методи факторного, регресійного та дисперсійного аналізу виступають як окремі випадки SEM і отримують свій природний розвиток та поєднання. Структурне моделювання в даний час включає шляховий аналіз (Path Analysis), конфірмаційний факторний аналіз (Confirmatory Factor Analysis), моделювання латентних змін (Latent Growth Modeling) та інші методи.

Методи структурного моделювання застосовують у різних наукових галузях: психології [1, 2, 3], соціології [4, 5], біології [6], екології [7], освіті [8] тощо.

Для створення моделей та їх аналізу існує спеціальне програмне забезпечення, серед якого найбільш популярні: AMOS на базі SPSS [9], EQS [10], Lisrel [11], Mplus [12], SAS [13], Statistica, а також вільно розповсюджуються програми, що працюють на базі середовища R: Lavaan і OpenMx.

З навчальної літератури слід особливо відзначити роботи R. E. Schumacker, R. G. Lomax [14] та R. B. Kline [15], написані доступною мовою.

У вітчизняних наукових дослідженнях методи структурного моделювання використовуються фрагментарно, зокрема у роботах психологів [16, 17, 18] та соціологів [19, 20]. Слід зазначити дефіцит, як навчальних посібників, і методичних розробок російською з викладання методів структурного моделювання [21, 22, 23]. Проте варто сказати, що проблема формування та розвитку математичної компетентності фахівців гуманітарного профілю піднімалася неодноразово [24, 25, 26].

Розвиток методології структурного моделювання у вітчизняній науці, на нашу думку, полягає у створенні наукових співтовариств усередині кожної дисципліни, які б актуалізували підготовку фахівців, які володіли б відповідними компетенціями з математичного моделювання та аналізу даних. Звідси випливає і необхідність запровадження відповідних спеціалізацій на факультетах вишів, підвищення кваліфікації викладачів, розробка навчальних та методичних посібників, удосконалення матеріально-технічної бази та спеціального програмного забезпечення [1 – 15].

Бурхливий розвиток програмних засобів обробки інформації (у тому числі он-лайн у мережі Інтернет), систематизація знань та вдосконалення методики викладання математичних дисциплін студентам різних спеціальностей надалі дозволить здійснити більш ефективне знайомство з багатовимірними методами аналізу даних та структурного моделювання. Це дозволить посилити методологічне та діагностичне значення проведених ними досліджень, актуалізує розвиток дослідницької логіки студентів та розширить їх пізнавальні здібності у вивченні наукової картини світу, дійсності [9 – 15].

Структурне моделювання як інструмент перевірки, модифікації та порівняння статистичних гіпотез, безперечно, є унікальним методом, що відкриває нові можливості щодо продуктивного аналізу даних [8 – 9]. Він дозволяє справлятися з тими завданнями, вирішення яких було неможливе у

межах традиційного багатовимірного підходу. Використання методів структурного моделювання у поєднанні з високоякісним програмним забезпеченням, що має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для статистичного аналізу даних, дозволяє фахівцеві сконцентруватися на найважливішій стороні своєї дослідницької роботи – змістовної інтерпретації отриманих результатів.

1.2 Аналіз літературних джерел

У 70-ті роки XX століття в 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 [16]. 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 XX-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 XX 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 викристалізувалися за останні десятиліття. Перший напрямок, зв'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 [17].

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 [18]. Для складних систем, про які наявна лише невелика апіорна інформація, виявилася ефективною евристична самоорганізація математичних моделей, розроблена в Інституті кібернетики НАН України, а також в роботах О.Г. Івахненка, Ю.П. Юрачковського, Ю. П. Зайченка, В. Д. Димитрова, В. С. Степашка й ін.

Моделюванню складних систем, розробці групового обліку аргумента – конкурент – метода стохастичної апроксимації, завадостійкості в моделюванні, прийняття рішень на основі самоорганізації Івахненко А.Г., Зайченко Ю.П., Дмитрова В.Д., Степашко В.С. присвячені роботи [19 – 23]. При цьому необхідно відзначити, що в роботах Івахненко О. Г. розглядаються питання структурної ідентифікації, де під структурою досліджуваного об'єкта розуміється система рівнянь, що відбиває взаємодію між заданими входом і виходом. Відповідно до цього синтез моделі [22] складається з трьох етапів: визначення структури, оцінка параметрів, адаптація параметрів. Складність моделі визначається при цьому числом алгебраїчних рівнянь.

Розглянемо основні проблеми, зв'язані з моделюванням складних систем за допомогою методів багатомірного статистичного аналізу. Слідучи за Л. Льюнгом, хочеться відзначити, що успіх у розв'язанні прикладних задач залежить від належного вибору структури моделі. Загальним питанням дослідження задач визначення структур моделей присвячені роботи Бохліна, Седерстрема, Мостеллера і Тьюкі [1 – 8].

2 АНАЛІЗ ВІДМОВ ПРИСТРОЇВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ

2.1 Особливості надійності систем залізничної автоматики

Більш надійна елементна база, структурна та елементна резервування, введення параметричної та інформаційної надмірності, застосування засобів діагностики та інші заходи призводять до того, що ймовірність відмов у нових пристроях залізничної автоматики менша, ніж у традиційних релейних пристроїв.

Підвищуючи надійність елементів, вводячи надмірність в апаратуру, застосовуючи взаємозамінність та відновлення, ми забезпечуємо безвідмовність системи, тобто. її здатність функціонувати без відмов протягом певного часу, і стійкість до відмови апаратури, тобто її здатність правильно виконувати всі чи деякі основні свої функції навіть за наявності відмов її елементів (до певної кількості).

Однак саме для складних систем (а сучасні засоби залізничної автоматики і є складними системами) характерна можливість і складних багаторазових комбінацій подій, ймовірність кожного з яких мала, а в сумі таких подій, начебто, неймовірних, набирається чимало. Робота таких систем залежить іноді від діяльності кількох операторів, включаючи обслуговуючий персонал, від їхньої кваліфікації та майстерності. При подальшому впровадженні сучасної техніки питання її надійності та безпеки, дисципліни та організованості персоналу набувають першочергового значення.

Підвищення відмовостійкості системи необхідне, але воно не забезпечує безпеку. Навіть спеціально створені «безпечні» системи, орієнтовані на простий перебір можливих небезпечних ситуацій, не можуть гарантувати захист системи від довільних комбінацій відмов, порушень правил експлуатації, позамежних впливів зовнішньої середовища, людського чинника та інших несприятливих впливів теорія надійності розвивається вже кілька десятиріч.

Однак успіхи в галузі теорії безпеки незрівнянно скромніше і менш відомі, хоча найбільші аварії та катастрофи у світі, у тому числі на залізницях, виявили суттєву роль та значимість розвитку теорії безпеки.

Недостатній рівень надійності виробів та систем призводить до великих економічних втрат. Але можуть бути такі наслідки ненадійності, які не можна чи складно оцінити економічними показниками. Безпека функціонування – це комплексна проблема, що включає крім структурно-технічних, а також питання діяльності людини, її дисциплінованості, організації праці, навчання персоналу.

Незважаючи на солідний вік теорії надійності та наявність серії міжнародних та вітчизняних стандартів, нагадаємо все ж таки основні її концепції.

Під надійністю спочатку розуміли лише безвідмовність. Потім у її включили поняття ремонтпридатності, довговічності та збереження, а деякі автори – навіть живучість, безпека та стійкість. Таке розширене розуміння надійності в науковому відношенні сумнівне, а в практичному сенсі приносить лише шкоду.

Проблема забезпечення надійності апаратно-програмних комплексів (АПК) залізничної автоматики і телемеханіки (ЗАТ), як і будь-якої іншої системи, що використовує АПК, полягає в забезпечення процесу їх функціонування протягом заданого часу при впливі внутрішніх збурюючих факторів: відмов та збоїв апаратних засобів, помилок в алгоритмічному та програмному забезпеченні, спотворень вхідної інформації, помилок операторів усередині системи (людський фактор). Ці фактори зменшують час безвідмовної роботи АПК, знижують рівень його готовності до виконання передбачених завдань та, як наслідок, погіршують показники його технічного використання. Зовнішнє середовище також надає певний негативний вплив на рівень надійності АПК ЗАТ. Тому на всіх етапах життєвого циклу системи це вплив враховується та має компенсуватися.

Надійність систем управління прийнято оцінювати рядом показників, серед яких розрізняють поодинокі та комплексні. До основних одиничних показниками відносяться:

- інтенсивність відмов технічних засобів;
- можливість безвідмовної роботи справного в момент включення пристроїв протягом певного часу;
- середній час напрацювання пристрою на відмову;
- середній час виявлення відмови та середній час відновлення пристрою, що відмовив (ремонтпридатність пристрою), що залежать від інтенсивності виявлення відмов у пристрої та інтенсивності відновлення пристрою, що відмовив.

До комплексних показників надійності відносять коефіцієнти готовності, оперативної готовності та технічного використання пристрою або системи, що показують ймовірність її справного стану, можливості вирішення конкретного оперативного завдання за заданий час та того, що в даний момент система не ремонтується і не обслуговується. Іншими словами, показники надійності визначають ймовірність того, що в даний момент часу пристрій або система справні і можуть виконувати покладені на них задачі.

У разі виникнення відмов, пов'язаних з порушенням безпеки руху поїздів, часто виникає питання, хто винен у їх виникненні і що робити? Отже тема дипломної магістерської роботи є актуальною задачею, яку необхідно вирішити.

2.2 Дані спостереження відмов елементів залізничної автоматики

Як відомо, 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, автошлагбауми 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 дільниць). 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. В 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 в 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.

В даній дипломній роботі за допомогою офіційних даних спостерігалися відмови пристроїв залізничної автоматики служби залізничної автоматики за період з 01.07.08 по 30.06.13 рр. Згідно статистичних даних відмов в пристроях СЦБ було складено табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Статистичні дані відмов в пристроях залізничної автоматики: рейкові кола; апаратура; електродвигуни стрілочних приводів; кабельних лініях; сигнали; пульти, табло, апаратури керування; пристрої електроживлення; елементи захисту

Параметр	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
III кв. 2007	8	13	5	2	0	2	1	0	4
IV кв. 2007	12	19	3	6	0	3	0	1	3
I кв. 2008	8	20	2	15	0	4	1	0	5
II кв. 2008	7	12	8	5	0	4	3	2	1
III кв. 2008	11	6	2	5	0	2	2	1	3
IV кв. 2008	14	10	5	6	0	3	0	0	4
I кв. 2009	13	15	5	5	0	3	1	1	0
II кв. 2009	14	9	2	9	0	5	1	1	1
III кв. 2009	16	3	11	4	0	3	1	0	2
IV кв. 2009	14	12	12	2	0	2	3	2	1
I кв. 2010	23	6	5	3	0	2	0	0	7
II кв. 2010	18	13	14	4	0	7	2	1	7
III кв. 2010	24	12	9	7	0	2	1	2	3
IV кв. 2010	28	6	3	4	0	1	1	1	1
I кв. 2011	14	7	6	7	0	2	0	3	5
II кв. 2011	23	6	12	4	0	3	0	1	0
III кв. 2011	28	3	5	5	0	0	1	1	3
IV кв. 2011	35	9	2	5	1	5	3	1	3
I кв. 2012	17	6	5	3	0	1	0	0	0
II кв. 2012	14	3	4	1	0	3	0	0	1
III кв. 2012	18	5	2	4	0	3	0	1	3
IV кв. 2012	27	5	7	3	0	2	2	4	0
I кв. 2013	21	7	3	1	0	1	1	1	2
II кв. 2013	23	11	3	2	0	1	1	2	3

В табл. 2.1. використовуються такі умовні позначення:

- 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 – несправність повітряних ліній,
- x_6 – відмова чи хибна робота сигналів,
- x_7 – відмова пультів, табло, апаратури керування,
- x_8 – порушення енергоживлення,
- x_9 – відмова елементів захисту.

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

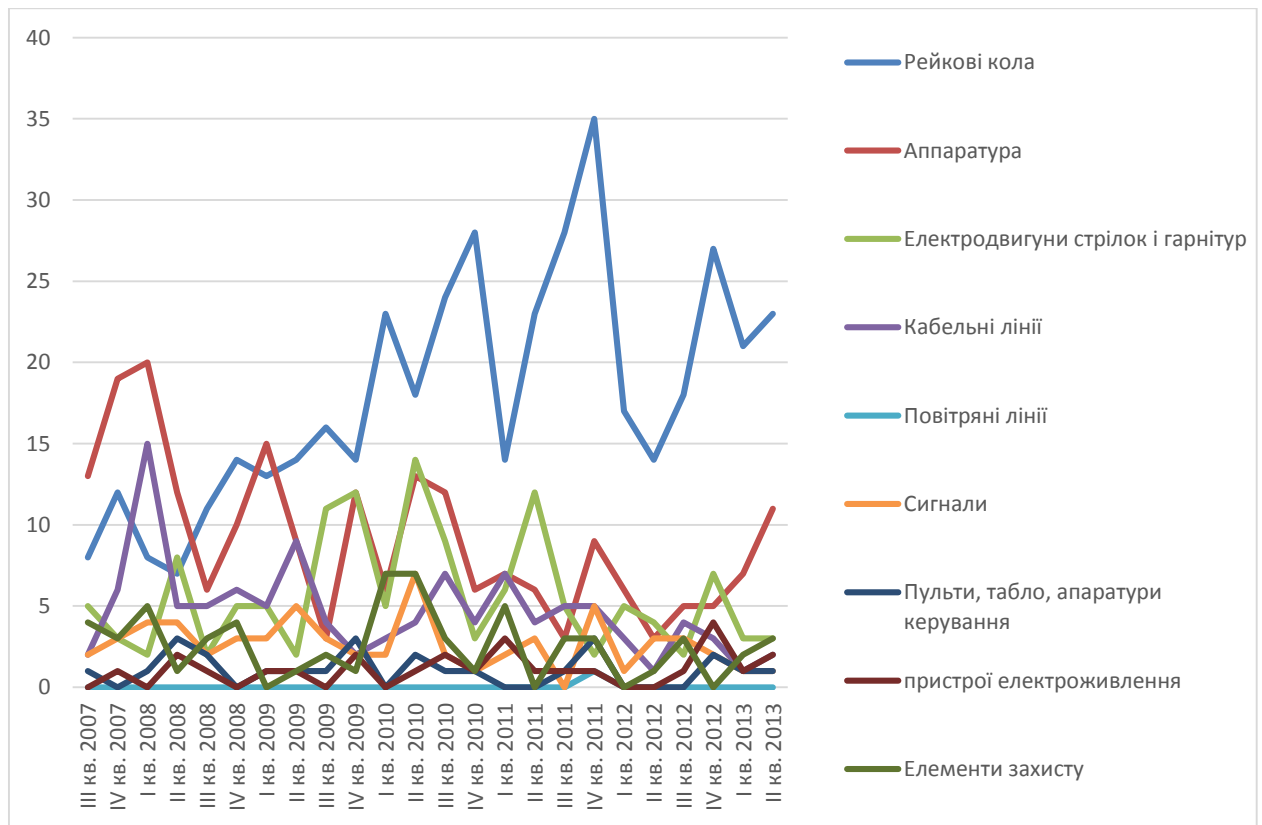


Рисунок 2.1 – Спостереження відмов пристроїв залізничної автоматики

Статистичні дані про відмови

Як відомо, основна частина відмов апаратури залізничної автоматики приходить на ізолюючі стики, основною проблемою яких являється «пробій». Проаналізувавши рис. 2.1. ми бачимо, що відмови рейкових кіл з початку року суттєво зменшилися з 43% від загальної кількості відмов до 29% завдяки масовій установці полімерних ізолюючих стиків на головних коліях станцій та в переводних кривих стрілочних переводів, які за своїми характеристиками суттєво відрізняються за ті, що використовувалися раніше. З 2009 р. ми бачимо, що збільшилась кількість відмов іншої апаратури, збільшилась кількість відмов кабельних ліній, сигналів, а також з 2012 р. збільшилась кількість відмов елементів захисту. В 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 2010 року по перший квартал 2012 року також збільшилась кількість відмов, з другого кварталу 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 табл. 2.2 та діаграму відмов пристроїв залізничної автоматики за об'єктами лінійчату (рис. 2.2).

Зростають випадки псування та розкрадання пристроїв залізничної автоматики. Матеріальні збитки з яких відшкодовуються тільки у обсязі ...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 в статистичних даних.

Таблиця 2.2 – Таблиця відмов пристроїв залізничної автоматики

Рейкові кола	38.1%
Апаратура	20.7%
Електроприводи стрілок і гарнітури	13.3%
Кабельні лінії	11.0%
Повітряні лінії	0.02%
Сигнали	6.5%
Пульти, табло, апаратура керування	3.4%
Пристрої електроживлення	3.3%
Елементи захисту	3.3%



Рисунок 2.2 – Лінійчатая діаграма відмов пристроїв залізничної автоматики за об'єктами

2.3 Причини відмов елементів системи

Причини відмов – це явища, процеси, події та стан, які обумовлюють виникнення відмов об'єкта. Дослідження причин відмов потребує залучення фізичної теорії надійності і ряду інженерних дисциплін.

Явища, які викликають відмови в пристроях залізничної автоматики – це пластична деформація, порушення міцності поверхонь і т.п. Процеси, що ведуть до відмов – зношування, зростання тріщин, корозія, ерозія, старіння матеріалів. Відмови можуть з’являтися як результат таких подій: поява перенавантаження, зміна напруги в мережі, попадання абразивних матеріалів в мастило, порушення встановлених режимів і правил експлуатації і т.п. Стан виробів, які ведуть до відмов, можуть бути макро- і мікротріщини, дефекти під збору та ін.

Відмови поділяють на конструктивні, виробничі та експлуатаційні. Крім того, в системах залізничної автоматики в окремі групи відмов від впливу грозових та комутаційних перенапруг, а також від впливу сторонніми особами та організаціями.

До конструктивних відносяться відмови, які виникають через недосконалість норм та правил конструювання об’єкта (недостатньо захищеність від впливу навколишнього середовища, неправильний вибір матеріалів та мастил). Також сюди можна долучити проектні похибки. На цей вид відмов в пристроях залізничної автоматики доводиться 1,2% від загальної кількості відмов, з них біля – проектні відмови.

До виробничих відносяться відмови, які виникають в результаті недосконалості та порушення встановленого процесу виготовлення, будівництва, монтажу об’єкта. Ці відмови займають біля 8 % від загальної кількості відмов пристроїв залізничної автоматики.

До найбільш типових дефектів технологій можна віднести: дефекти, які виникають через несправність складу матеріалів (підвищена пластичність, недостатня електропровідність); помилки при механічній обробці остаточні напруження, недостатня глибина шва, термічні пошкодження окремих ділянок основного матеріалу і т.п.); дефекти зборки (пошкодження поверхонь чи ізоляції, задирки, внесення абразиву, невідповідність розмірів деталей нормативним і т.п.); дефекти монтажу

(погана якість пайки, занадто перенавантаження або надкушування монтажних проводів), дефекти будівництва (порушення прокладання чи ізоляційних напільних кабелів).

До експлуатаційних відмов відносяться відмови, які виникають в результаті порушення встановлених правил чи умов експлуатації об'єкта: неправильне, несвоєчасне чи неякісне технічне обслуговування; низька якість перевірки чи ремонту в контрольно-вимірювальних пунктах (КІП), ремонтно-технологічних дільницях (РТУ), майстернях. На експлуатаційні відмови приходить до 86% відмов пристроїв залізничної автоматики.

В офіційній статистиці виділяють такі причини експлуатаційних відмов: неякісне виконання робіт (42...44% від експлуатаційних відмов пристроїв залізничної автоматики), невиконання термінів перевірки (12...15%), порушення правил виробництва робіт (4,0...5,5%), неякісна перевірка в РТУ (9% і більше), інші причини (16...22%), причина не встановлена (9...12%).

Відмови від впливу грозових та комутаційних перенапруг виникають, головним, чином, внаслідок не удосконалення засобів і пристроїв захисту від них. На ці відмови приходить до 2,5...3,2% від загальної кількості відмов залізничної автоматики.

Від впливу сторонніх осіб і організацій виникають 1,3...1,7% відмов. Сюди входять, наприклад, обриви кабелів при виконанні робіт сторонніми організаціями без узгодження з робітниками служби ІШ, крадіжки виробів із кольорових металів, вандалізм.

При дослідженні причин відмов повинен проводитися аналіз режимів та умов експлуатації, а також навантаження. Навантаження, які впливають на надійність об'єкту, можуть визначатися зовнішніми факторами чи функціонуванням самого об'єкту. До зовнішніх для пристроїв залізничної автоматики відносяться: кліматичні, механічні, електромагнітні, радіаційні, біологічні впливи, вплив технічного обслуговування (ТО) та ремонту. При функціонуванні виробу виникають навантаження, обумовлені нагрівом

окремих елементів чи частини їх поверхонь, деформаціями, нерівномірністю зношування чи іншими факторами.

Аналіз причин відмов виконується з метою обґрунтованої розробки заходів по їх попередженню як під час серійного виготовлення, так і експлуатації виробів, так і в наново розроблених пристроях і системах з конструктивно-технологічною і схемною подобою.

Зовнішні фактори, які впливають на пристрої залізничної автоматики

На надійність пристроїв залізничної автоматики впливають кліматичні, механічні, радіаційні фактори або вплив обслуговуючого персоналу.

Основні кліматичні фактори: сонячна радіація, температура, відносна вологість повітряного середовища, щільність, рух, наявність в ній твердих та газоподібних домішок., сніг, дощ, туман, іній, роса.

Сонячна радіація, яка поступає на земну поверхню, є одним із основних кліматичних факторів. В спектрі сонячної енергії, яка випромінюється, біля 9% приходить на ультрафіолетову частину, біля 50% - на видиму частину спектру, 41% - на інфрачервоні хвилі.

Вплив зміни температури. Підвищення температури викликає прискорення протікання хімічних реакцій. Під впливом періодичних температурних впливів виникає деформація елементів конструкцій, яка обумовлена різними механічними ушкодженнями.

Параметри напівпровідникових приладів значно залежать від температури навколишнього середовища. Діелектричні втрати та проникливість із зростанням температури, як правило збільшуються. Під дією тепла механічна міцність ізоляції зменшується, електрична міцність спочатку зростає через видалення вологи, а потім зменшується до її первинного значення і в результаті ізоляція руйнується. Дія тепла прискорює повільно діючі хімічні процеси і зветься тепловим старінням. Теплове старіння прискорюється при впливі електричного поля,

механічних навантажень. Значні перепади температури ведуть до розтріскування.

Зміни температури можуть викликати лінійні зміни розмірів деталей. Лінійні розширення матеріалів погіршують роботу зубчатих з'єднань, руйнуванню паяльних швів. Повністю захистити апаратуру від впливів зміни температури не має можливості.

Вплив вологи. Під дією вологи у металічних поверхнях змінюється колір, ступінь шороховатості, електропровідність, поверхнева міцність. Дія вологи на металічні деталі пристроїв залізничної автоматики погіршує виконання їх функцій: кріплення слабшають, гвинтові деталі погано роз'єднуються, резистори зменшують свою провідність на 20...30%. Латунні деталі в місцях значних механічних напружень (згинання із малім радіусом, витягування) під дією підвищеної вологості ламаються. Зварювальні деталі кородірують.

Вплив вологи на неметалічні матеріали вузлів залізничної автоматики викликає більш суттєву зміни їх вихідних параметрів, особливо суттєво це для пористих та слоїстих деталей, а також для текстоліту, гетинаксу, скло текстоліту, полістиролу, поліетилену, преспорошків із наповнювачами.

В результаті зміни діелектричної проникливості може змінюватися частота коливальних контурів, зменшитися їх добротність, що викликає розширення смуги частот, погіршення стабільності роботи генераторів, зменшення вихідної напруги елементів.

Засоби захисту пристроїв залізничної автоматики від впливу навколишнього середовища:

- герметизація апаратури і її окремих елементів;
- розміщення апаратури в спеціальному обладнаному приміщенні;
- обігрів апаратури в релейних шафах, колійних коробках, підігрів контактів автоперемикачів в стрілочних електроприводах;

- застосування матеріалів, мастил, лаків, антикорозійних покриттів і інших засобів захисту, які відповідають конкретним умовам роботи;
- постійне спостереження за виконанням вимог по захисту від кліматичних впливів.

Механічний вплив на пристрої залізничної автоматики виникають через удари та вібрації. Удар виникає в тих випадках, коли пристрої залізничної автоматики мають швидке прискорення. Наприклад, виводи кабелів жгутів, резисторів, конденсаторів, напівпровідникових приладів, якщо вони натягнуті, можуть обірватися. Важкі пристрої, наприклад, силові трансформатори, дроселі, через удари зрушуються зі своїх місць. Удари дуже небезпечні для зварювальних та клепальних з'єднань.

Вібрації уявляють собою періодичні коливання, частіше складні, під які можуть підпадати пристрої залізничної автоматики. Тривалий вплив вібрацій призводить до руйнування деталей за рахунок втомленості, яка при знакозмінних навантаженнях з'являється в більшій мірі, ніж при статичному навантаженні.

Низькі частоти вібрацій (декілька Гц) можуть приводити до обриву трансформаторів, блоків, електричних конденсаторів.

Вплив проникливої радіації. Рух частинок із великою енергією в речовинах призводить до втрати енергії, яка витрачається ними на збудження пов'язаних частинок. Метали є найбільш чутливими до випромінювання. Межа текучості у металів зменшується в 2...3 рази, зростає на 20...30% питомий електричний опір, знижується ударна в'язкість. Електротехнічна сталь змінює свої магнітні характеристики і після опромінення нейтронами стає радіоактивною. Найменш стійкі до радіації напівпровідникові прилади і інтегральні мікросхеми. Діоди після опромінення втрачають свої напівпровідникові властивості через збільшення питомого опору матеріалу, транзистори втрачають

підсилювальні властивості, у них зростають струми утікання, знижується пробивна електрична напруга.

Людський фактор. Всі етапи життєвого циклу, які включають формування технічних вимог до системи, її розробку, проектування, виготовлення, будівельно-монтажні роботи і експлуатацію пов'язані з впливом людини.

Людина, як ланка ергатичної системи, тобто системи, яка функціонує із участю людини, характеризується швидкодією, надійністю, напруженістю своєї діяльності. Кількісні значення цих параметрів залежать від складності задач, які необхідно вирішити, завантаженості і взаємно пов'язаної з ними втоми. Завантаженість визначається як доля часу, який необхідно для вирішення задачі, в загальному час на її вирішення і є мірою дефіциту часу. Оптимальна завантаженість оператора, в залежності від виду діяльності, коливається в межах $0,1 \dots 0,5$.

Переваги людини – адаптованість, здатність до навчання, вибірковість, самонастроюваність, самоконтрольованість, здатність до роботи в конфліктних ситуаціях.

Недоліки людини – стохастична зміна психофізичного стану, помилковість у виконанні операцій, втомленість, можливість втрати працездатності в стресових ситуаціях, залежність психофізичних властивостей від віку, стан навколишнього середовища, магнітні бурі.

Основні причина помилок людини в тому, що складність систем залізничної автоматики конфліктує з можливостями людини як розробника, обмежені можливості людини не завжди узгоджуються із технічним потенціалом розроблених систем в частині навантаження оперативного персоналу і реалізації інтерфейсу «оператор-система», підвищення рівня автоматизації систем призводить до ослаблення професійних навичок оперативного та технічного персоналу.

Таким чином, зниження впливу людського фактору на надійність систем залізничної автоматики є дієвим заходом для підвищення якості їх функціонування.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТРУКТУРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Математичне моделювання

Для розв'язання різноманітних інженерних, економічних, наукових задач все частіше використовується математичне моделювання. Розвиток і широке застосування математичного моделювання призвело до появи потужних обчислювальних засобів.

Математичне моделювання – описання поведінки фізичних, економічних, соціальних систем за допомоги математичних співвідношень, які називаються математичними моделями.

Математична модель – наближене описання якогось класа явищ зовнішнього світу, вираженої за допомоги математичної символіки чи алгоритмів.

3.2 Етапи моделювання

В процесі моделювання можна виділити 4 етапи.

Перший етап: формування законів, що зв'язують основні об'єкти моделі. Цей етап вимагає широких знань з фактів, які впливають на хід явищ, за якими ведеться спостереження, а також глибокого проникнення у їх взаємний зв'язок.

Другий етап: дослідження математичних задач, до яких приводять математичні моделі. Основним питанням є розв'язання прямої задачі. На цьому етапі важливої ролі набуває математичний апарат, необхідний для аналізу математичної моделі.

Третій етап: перевірка того, чи задовольняє прийнята (гіпотетична) модель критерію практики, тобто перевірка того, чи узгоджуються результати спостережень з теоретичними висновками моделі в межах точності спостережень.

Якщо модель є цілком визначеною (задано всі її параметри), то визначення відхилень теоретичних дій від спостережень дає розв'язання

прямої задачі. Якщо відхилення виходять за межі точності спостережень, то модель не може бути прийнята.

Задачі, в яких характеристики моделі (параметричні, функціональні) визначаються таким чином, щоб вихідна інформація була порівнянною (в межах точності спостережень) з результатами спостережень явищ, які вивчаються, називаються зворотніми задачами.

Якщо математична модель є такою, що жодний вибір характеристик не задовольняє вищевказаним характеристикам, то модель непридатна для досліджень.

Четвертий етап: подальший аналіз моделі відповідно до накопичених даних. В процесі розвитку науки та техніки дані про об'єкти спостережень дедалі більше уточнюються і настає момент, коли висновки не відповідають нашим уявленням та знанням про явище. Виникає потреба в уточненні самої математичної моделі.

При розв'язанні задач моделювання на ЕОМ виділяють наступні моменти:

- постановка задачі;
- створення математичної моделі;
- вибір і застосування метода розв'язання;
- розробка алгоритму розв'язання;
- написання програми для ЕОМ;
- відлагодження програми;
- реалізація програми на ЕОМ, розрахунок і оцінка результатів.

3.3 Види математичного моделювання

1. Статистичне моделювання - розв'язання математичних задач за допомоги моделювання випадкових величин.
2. Моделювання процесів за допомоги математичних співвідношень.
3. Машинне моделювання (на цифрових та аналогових ЕОМ), відтворення математичних моделей фізичних процесів на ЕОМ.
4. Структурне моделювання.

3.4 Наявність зв'язків між змінними

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

- 1) функціональні;
- 2) стохастичні;
- 3) статистичні.

Функціональний зв'язок - зв'язок між змінними, при якому кожному значенню однієї величини відповідає суворо визначене значення іншої

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (3.4.1)$$

Дослідженням таких зв'язків статистика не займається.

Стохастичний зв'язок відповідає залежності, коли зміна значення однієї змінної призводить до зміни закону розподілу іншої. У випадку з дискретними змінними це означає, що кожному з значень однієї змінної відповідає набір значень іншої, при чому кожне значення має свою ймовірність реалізації.

Статистичний зв'язок означає, що значення однієї змінної змінюється в середньому залежно від того які значення приймає інша змінна. Часто розглядається як функціональна залежність з випадковою помилкою

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n) + \varepsilon, \quad (3.4.2)$$

де $F(X_1, X_2, \dots, X_n)$ - функція, яка описує залежність Y від сукупності незалежних змінних $(X_1, X_2, \dots, X_n)$; ε - деяка випадкова помилка.

Як відомо, сума константи і випадкової величини є випадковою величиною. У зв'язку з цим значення Y , розраховані за вказаною формулою, також будуть випадковими величинами внаслідок додавання випадкової величини ε .

3.5 Вибір метода перевірки наявності зв'язку

Методи перевірки наявності зв'язку призначені для перевірки гіпотез про зв'язок між змінними.

Кореляційний аналіз застосовується у випадках, коли змінні вимірюються за допомоги шкал порядку, інтервалів чи відношень.

Дисперсійний аналіз проводять, якщо залежна змінна вимірюється за допомоги шкал порядку, інтервалів чи відношень, а змінні, які впливають на залежну змінну, мають нечислову природу (шкала найменувань).

Аналіз таблиць спряженості ознак використовується, коли впливаючі змінні мають нечислову природу, а залежна змінна відображає кількість спостережень (відсоток, доля і т.п.), для яких ознака присутня або відсутня.

3.6 Кореляційний аналіз

Кореляційний зв'язок є частковим випадком статистичного зв'язку

$$M(Y|X = x) = \bar{y}(x), \quad (3.6.1)$$

тобто математичне очікування змінної Y , за умови, що випадкова змінна X приймає значення x .

3.6.1 Параметрична кореляція (коефіцієнт кореляції Пірсона)

Умови, за яких можна застосовувати параметричну кореляцію:

- 1) всі спостереження взаємно незалежні;
- 2) всі спостереження мають нормальний закон розподілення.

Оцінку локальних взаємозв'язків між показниками проводитимемо на основі коефіцієнтів кореляції. Значення коефіцієнта кореляції обчислюється за формулою

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{Y})^2}}. \quad (3.6.1.1)$$

Для забезпечення симетричності величини r відносно змінних X і Y її визначають виходячи з щільності ймовірності двовимірного нормального розподілення

$$r = \frac{M(X - M[X])(Y - M[Y])}{\sqrt{D[X]D[Y]}} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}, \quad (3.6.1.2)$$

де $\text{cov}(X, Y)$ – другий центральний змішаний момент двовимірної випадкової величини (X, Y) , а σ_x і σ_y безумовні середньоквадратичні відхилення для X і Y . Лише в цьому випадку величина r симетрична відносно змінних X і Y .

3.6.2 Метод найменших квадратів

При вивченні реальних явищ або моделюванні технічних об'єктів виникає необхідність створення їх математичних моделей або уточнення параметрів математичної моделі на основі експериментальних даних. Експерименти умовно можна поділити на 2 класи: активні та пасивні. Під активним експериментом розумітимемо таку організацію дослідів (спостережень), коли на цікавлячі фактори передбачено вплив (регулювання). Якщо ж дослід полягає лише в спостереженні і без втручання дослідника, то такий експеримент називається пасивним.

На рис. 3.6.2.1 представлено типову ситуацію, з якою стикається дослідник при створенні математичної моделі.

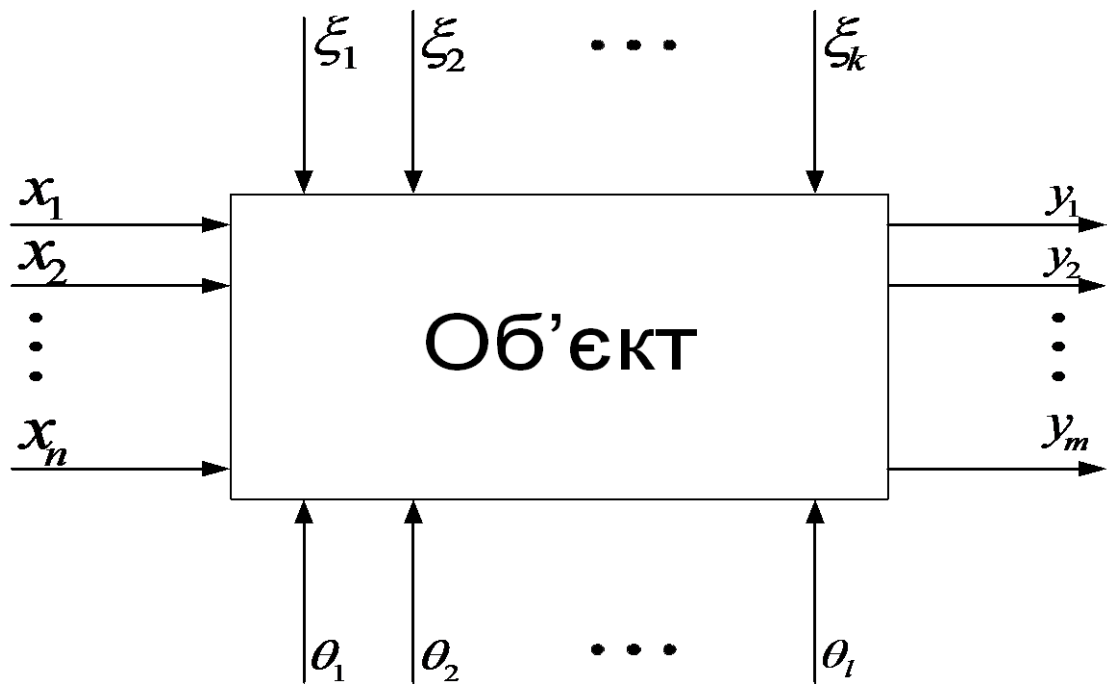


Рисунок 3.6.2.1 – Діючі на технічний об'єкт фактори.

Фактори $x_1, x_2, \dots, x_n$ - називають основними і їх можна коректувати; фактори $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ - випадкові; фактори $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_l$ - фактори середовища; фактори $y_1, y_2, \dots, y_m$ - називають відгуками об'єкта на перераховані фактори.

Якщо впливом невизначених і випадкових факторів можна знехтувати, то встановиться цілком детермінована відповідність між вхідними та вихідними факторами.

Нехай відгук технічного об'єкта є одновимірною величиною:

n -вимірний евклідовий простір.

Часто залежності між факторами (3.6.2.1) на основі законів фізики, хімії та інших природних наук буває досить непросто знайти. Тоді використовують математичну модель:

$$\tilde{y} = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (3.6.2.2)$$

Задача визначення параметрів математичної моделі може бути сформульована так: знайти такі параметри математичної моделі технічного об'єкта, який вивчається, щоб відповідні їм значення відгуків $\tilde{y}$

математичної моделі були якомога ближчими до експериментальних спостережень у при дії на об'єкт факторів $x \in E^n$.

Для розв'язання сформульованої задачі зазвичай застосовують метод найменших квадратів (МНК). Даним методом можна розв'язати задачу визначення величин, які не підлягають безпосередньому спостереженню, за результатами визначення інших величин, котрі є їх функціями.

В якості моделі розглянемо лінійну модель:

(3.6.2.3)

де $\tilde{y}$ - відгук, x_j - значення фактора, j – номер фактора, β_j - параметри моделі. Нехай проведено m дослідів, в яких спостерігали значення відгуків y_i і значення факторів x_{ij} , i – номер дослідів, j – номер фактора. У відповідності до обраної моделі (3.6.2.3) спостереження представимо у вигляді:

(3.6.2.4)

Задача полягає у визначенні параметрів β_j , $j = \overline{1, n}$. Нехай кількість дослідів n більше числа параметрів m ($n > m$).

Систему (3.6.2.4) безпосередньо розв'язати неможливо, так як праві частини рівнянь замість точних значень y_i містять вимірювання $y_i = \tilde{y}_i + \Delta_i$ з випадковими похибками Δ_i . Якщо ($n > m$), то на основі принципу максимальної правдоподібності можна знайти таку сукупність значень $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$, яка з найвищою ймовірністю задовольняла б вихідні залежності. Нехай y_i випадкова величина з нормальним законом розподілу

(3.6.2.5)

Для щільності ймовірності випадкової вибірки $(y_1, y_2, \dots, y_m)$ і лінійної математичної моделі (3.6.2.3) маємо:

$$f(y_1, y_2, \dots, y_m) = (\sigma\sqrt{2\pi})^{-n} \exp \left\{ \frac{-1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^m \left(y_i - \sum_{j=1}^n x_{ij} \beta_j \right)^2 \right\}. \quad (3.6.2.6)$$

Функція щільності ймовірності досягає максимуму при мінімумі функції, яка знаходиться в показнику експоненти у виразі (3.6.2.5). Відповідно до теореми Ферма, часткові похідні по β_j , $j = 1, \dots, n$ від виразу

$$\delta^2(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) = \sum_{i=1}^m (y_i - \sum_{j=1}^n x_{ij} \beta_j)^2 \quad (3.6.2.7)$$

мають обертатися в нуль:

$$\frac{\partial \delta^2}{\partial \beta_k} = -2 \sum_{j=1}^m \left(y_i - \sum_{j=1}^m x_{ij} \beta_j \right) x_{ik} = 0, \quad k = \overline{1, n}. \quad (3.6.2.8)$$

Таким чином для визначення значень $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ отримаємо систему лінійних рівнянь:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n c_{kj} \beta_j &= \sum_{j=1}^m x_{ik} y_i, \\ c_{kj} &= c_{jk} = \sum_{j=1}^m x_{ik} y_{ij}, \quad k = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (3.6.2.9)$$

Умови максимальної правдоподібності співпадають з вимогою мінімуму суми квадратів похибок:

$$\sum_{j=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^m (y_i - \tilde{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^m \left(y_i - \sum_{j=1}^n x_{ij} \beta_j \right)^2 = \sum_{i=1}^m y_i^2 - \sum_{j=1}^n \beta_j \sum_{i=1}^m x_{ij} y_i. \quad (3.6.2.10)$$

При обґрунтуванні даного методу вводилось припущення про нормальний розподіл величин y_i , але доведено, що оцінки, отримані за допомоги МНК, мають найменші похибки незалежно від типу розподілу.

При застосуванні МНК для визначення параметрів математичної моделі його суть можна сформулювати так: найімовірнішими значеннями параметрів математичної моделі

$$\tilde{y} = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (3.6.2.11)$$

де $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ - деякі фактори, є ті, для яких сума квадратів відхилень спостережень відгуків від значень відгуків математичної моделі $\tilde{y}$ для одних і тих самих значень факторів приймає мінімальне значення:

$$\sum_{i=1}^m (y_i - \tilde{y}_i)^2 \rightarrow \min, \quad (3.6.2.12)$$

де y_i - значення відгуку в i -му досліді, $\tilde{y}_i$ - значення відгуку, визначеного відповідно до математичної моделі для тих самих значень дослідів.

Обравши певну структуру математичної моделі показник x_2 розкриватимемо у вигляді:

$$\tilde{x}_2 = f_2(x_1, x_5), \quad (3.6.2.13)$$

проте вид цієї залежності залишається невідомим. Залежність може бути лінійною:

$$\tilde{x}_2 = a_0 + a_1 x_1 + a_5 x_5, \quad (3.6.2.14)$$

квадратичною:

$$\tilde{x}_2 = a_0 + a_1 x_1 + a_5 x_5 + a_{12} x_1^2 + a_{52} x_5^2 \quad (3.6.2.15)$$

або деяким поліномом n -ї степені:

$$\tilde{x}_2 = a_0 + (a_1 x_1 + a_5 x_5) + (a_{12} x_1^2 + a_{52} x_5^2) + (a_{1n} x_1^n + a_{5n} x_5^n) \quad (3.6.2.16)$$

Разом з тим залежність можна шукати і у вигляді:

$$\tilde{x}_2 = a_1 \varphi_1(x_1, x_5) + a_2 \varphi_2(x_1, x_5) + \dots + a_n \varphi_n(x_1, x_5), \quad (3.6.2.17)$$

де $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ - відомі функції.

Перш ніж обрати конкретний вигляд залежності $\tilde{x}_2 = f_2(x_1, x_5)$, бажано по дослідним точкам побудувати експериментальну залежність між $\tilde{x}_2$ і (x_1, x_5) .

Для виконання розрахунків по методу найменших квадратів (МНК) бажано скористатися обчислювальною технікою.

Коротко визначимо у чому полягає даний метод.

Нехай є набір пар:

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n), \quad (3.6.2.18)$$

де x_i - значення предикторної змінної x в i -му спостереженні; y_i - значення змінної, яка визначається, в i -му спостереженні; n – загальна кількість спостережень.

Обмежимося найпростішим варіантом – лінійною моделлю, тобто будемо описувати залежність y від x як

$$y = a_0 + a_1 x. \quad (3.6.2.19)$$

В даній моделі коефіцієнти a невідомі. Їх обирають таким чином, щоб сума квадратів відхилень значень, які спостерігаються, від тих, які розраховані по моделі, була мінімальною.

Нехай

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2, \quad (3.6.2.20)$$

тоді МНК полягає в мінімізації S^2 по a_0 і a_1 відповідно. З необхідної умови екстремуму отримаємо:

$$\begin{cases} \frac{\partial S^2}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i) = 0; \\ \frac{\partial S^2}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i) x_i = 0 \end{cases}. \quad (3.6.2.21)$$

Склавши рівності і поділивши на число спостережень n , отримаємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення невідомих параметрів a_0 і a_1 :

$$\begin{cases} a_0 + a_1 \bar{x} = \bar{y}; \\ a_0 \bar{x} + a_1 \overline{x^2} = \overline{xy}, \end{cases} \quad (3.6.2.22)$$

де

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (3.6.2.23)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \quad (3.6.2.24)$$

$$\overline{x^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2; \quad (3.6.2.25)$$

$$\overline{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i. \quad (3.6.2.26)$$

Розв'язавши систему відносно a , отримаємо:

$$\begin{cases} a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x}; \\ a_1 = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - (\bar{x})^2}. \end{cases} \quad (3.6.2.27)$$

Метод найменших квадратів, як обчислювальна процедура був описаний Лагранжем в 1806 р. в його праці “Nouvelles methodes pour la determination des orbites des cometes”. Гаус застосовував цей метод ще в 1795 р.

Висновок за розділом 3

Для планування робіт, пов'язаних з підтриманням справності та працездатності елементів обладнання систем залізничної автоматики рекомендується використовувати математичну модель. За допомогою математичної моделі можна раціонально розподіляти людські та матеріальні ресурси для забезпечення необхідної надійності пристроїв та систем залізничної автоматики.

4 СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ВІДМОВАМИ ПРИСТРОЇВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ

Побудова структурної математичної моделі аналізу зв'язків відмов пристроїв залізничної автоматики

Як було зазначено в п. 3.3 існують такі види математичного моделювання: статистичного моделювання, яке використовується для розв'язання математичних задач за допомоги моделювання випадкових величин; моделювання процесів за допомоги математичних співвідношень; машинного моделювання, яке виконується на цифрових та аналогових ЕОМ і відтворює математичні моделі фізичних процесів на ЕОМ; структурного моделювання.

Звернемо найбільшу увагу на структурне моделювання за дослідними даними. За період 2007 – 2013 рр. на дистанціях сигналізації, централізації та зв'язку (ШЧ) Укрзалізниці фіксувалися середньомісячні показники відмов по кожному з обраних видів. Тоді надійність систем залізничної автоматики, як об'єктів моделювання, можна представити у вигляді:

$$\Omega = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}, \quad (4.1)$$

Значення факторів якого на основі спостережень задано у вигляді матриці

[illegible]

в котрій кожна строка представляє значення показників з множини Ω в деякому спостереженні. Матриця містить N строк, що відповідає N-об'єктам дослідження, і M стовпців, які відповідають M-періодам спостереження за кожним з N-об'єктів.

Отже, матрицю X побудуємо на основі табл. 4.1, в якій фіксувалися відмови по кожному з об'єктів системи залізничної автоматики за певний період.

Таблиця 4.1 – Щоквартальні відмови пристроїв залізничної автоматики за період з 2007 по 2013 рр.

X_1	8	12	8	7	11	14	13	14	16	14	23	18	24	28	14	23	28	35	17	14	18	27	21	23
X_2	13	19	20	12	6	10	15	9	3	12	6	13	12	6	7	6	3	9	6	3	5	5	7	11
X_3	5	3	2	8	2	5	5	2	11	12	5	14	9	3	6	12	5	2	5	4	2	7	3	3
X_4	2	6	15	5	5	6	5	9	4	2	3	4	7	4	7	4	5	5	3	1	4	3	1	2
X_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
X_6	2	3	4	4	2	3	3	5	3	2	2	7	2	1	2	3	0	5	1	3	3	2	1	1
X_7	1	0	1	3	2	0	1	1	1	3	0	2	1	1	0	0	1	3	0	0	0	2	1	1
X_8	0	1	0	2	1	0	1	1	0	2	0	1	2	1	3	1	1	1	0	0	1	4	1	2
X_9	4	3	5	1	3	4	0	1	2	1	7	7	3	1	5	0	3	3	0	1	3	0	2	3
Параметр																								
III кв. 2007																								
IV кв. 2007																								
I кв. 2008																								
II кв. 2008																								
III кв. 2008																								
IV кв. 2008																								
I кв. 2009																								
II кв. 2009																								
III кв. 2009																								
IV кв. 2009																								
I кв. 2010																								
II кв. 2010																								
III кв. 2010																								
IV кв. 2010																								
I кв. 2011																								
II кв. 2011																								
III кв. 2011																								
IV кв. 2011																								
I кв. 2012																								
II кв. 2012																								
III кв. 2012																								
IV кв. 2012																								
I кв. 2013																								
II кв. 2013																								

Згідно з цими даними матриця X матиме вигляд:

$$X = \begin{pmatrix} 8 & 12 & 8 & 7 & 11 & 14 & 13 & 14 & 16 & 14 & 23 & 18 & 24 & 28 & 14 & 23 & 28 & 35 & 17 & 14 & 18 & 27 & 21 & 23 \\ 13 & 19 & 20 & 12 & 6 & 10 & 15 & 9 & 3 & 12 & 6 & 13 & 12 & 6 & 7 & 6 & 3 & 9 & 6 & 3 & 5 & 5 & 7 & 11 \\ 5 & 3 & 2 & 8 & 2 & 5 & 5 & 2 & 11 & 12 & 5 & 14 & 9 & 3 & 6 & 12 & 5 & 2 & 5 & 4 & 2 & 7 & 3 & 3 \\ 2 & 6 & 15 & 5 & 5 & 6 & 5 & 9 & 4 & 2 & 3 & 4 & 7 & 4 & 7 & 4 & 4 & 5 & 3 & 1 & 4 & 3 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 3 & 4 & 4 & 2 & 3 & 3 & 5 & 3 & 2 & 2 & 7 & 2 & 1 & 2 & 3 & 0 & 5 & 1 & 3 & 3 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 3 & 2 & 0 & 1 & 1 & 1 & 3 & 0 & 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 3 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 2 & 1 & 3 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 2 \\ 4 & 3 & 5 & 1 & 3 & 4 & 0 & 1 & 2 & 1 & 1 & 7 & 3 & 1 & 5 & 0 & 3 & 3 & 0 & 1 & 3 & 0 & 2 & 3 \end{pmatrix}$$

4.2 Застосування параметричної кореляції

При використанні кореляційного аналізу слід пам'ятати, що коефіцієнт кореляції відображає щільність лише лінійних зв'язків. А тому, у випадках, де залежності більш складні, ніж лінійні, коефіцієнт кореляції буде свідчити про відсутність зв'язків.

За даними матриці X складемо матрицю коефіцієнтів кореляції r :

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

Так як $r_{xy} = r_{yx}$, то звідси слідує, що матриця r – симетрична, а тому може бути представлена верхньою трикутною формою (матриця R):

$$R = \begin{pmatrix} 1 & -0,451 & -0,011 & -0,287 & 0,503 & -0,212 & 0,091 & 0,243 & -0,171 \\ & 1 & -0,026 & 0,521 & -0,004 & 0,372 & 0,174 & -0,029 & 0,363 \\ & & 1 & -0,215 & -0,215 & 0,234 & 0,234 & 0,199 & 0,02 \\ & & & 1 & 0,027 & 0,381 & -0,039 & -0,062 & 0,354 \\ & & & & 1 & 0,32 & 0,418 & -0,017 & 0,077 \\ & & & & & 1 & 0,29 & -0,119 & 0,347 \\ & & & & & & 1 & 0,381 & 0,016 \\ & & & & & & & 1 & -0,085 \\ & & & & & & & & 1 \end{pmatrix}.$$

4.3 Значущість коефіцієнта кореляції

Оскільки ми маємо справу з випадковими величинами, то однієї величини коефіцієнта парної кореляції недостатньо для висновку про статистичну значущість зв'язку. Необхідно перевірити чи значущо він відрізняється від нуля. Це можна зробити за допомоги критерію Ст'юдента. Фактично

перевіряється гіпотеза про рівність коефіцієнта кореляції нулю. Для цього розраховується критеріальне значення за формулою

$$t_p = r \sqrt{\frac{N-2}{1-r^2}}, \quad (4.3.1)$$

де r – значення коефіцієнта кореляції, а N – кількість спостережень.

Якщо розрахункове значення t (t_p) більше табличного, взятого з $(N-2)$ степенями свободи, то нулева гіпотеза відкидається. Це означає, що коефіцієнт кореляції значущо відрізняється від нуля (за обраним рівнем значущості). Півширина довірчого інтервалу для коефіцієнта кореляції визначається за формулою

$$\Delta = \frac{t_{N-2, \alpha} (1-r^2)}{\sqrt{N}}, \quad (4.3.2)$$

де $t_{N-2, \alpha}$ – табличне значення критерія Ст'юдента, взятого з $(N-2)$ степенями свободи для заданого рівня значимості α .

Оскільки число спостережень (N) – кінцеве, то значущість коефіцієнта кореляції визначається за наступним правилом:

- r_{xy} значущий, якщо $|r_{xy}| \geq r_{kp}(N, P)$;
- r_{xy} незначущий, якщо $|r_{xy}| < r_{kp}(N, P)$,

де $r_{kp}(N, P)$ - критичне значення коефіцієнта кореляції, а P – довірчий інтервал (в розрахунках приймемо $P=0,95$).

Стосовно нашого випадку $N=24$, $P=0,75$, $r_{kp}(24;0,75)=0,499$. Звідси випливає, що всі коефіцієнти кореляції, які за модулем (абсолютною величиною) є меншими ніж 0,499, мають бути прирівняні до нуля.

Враховуючи це, по матриці R побудуємо матрицю τ , елементи якої визначимо наступним чином:

$$\tau_{xy} = \begin{cases} 1, & |r_{xy}| \geq 0,499; \\ 0, & |r_{xy}| < 0,499. \end{cases} \quad (4.3.3)$$

Матриця τ матиме вигляд:

$$\tau = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & 1 & 0 & 0 \\ & & & & & & & 1 & 0 \\ & & & & & & & & 1 \end{pmatrix}. \quad (4.3.4)$$

4.4 Структурний аналіз

В результаті структурного аналізу [18] з використанням спеціального математичного забезпечення встановлено наступні залежності: фактори $\{x_3, x_4, x_5\}$ не пов'язані з факторами $\{x_1, x_2, x_6, x_7, x_8, x_9\}$, а тому кожний з наборів факторів може розглядатися окремо, разом з тим фактори $\{x_1, x_5\}$ не пов'язані з факторами $\{x_2, x_3, x_4, x_6, x_7\}$, а тому теж можуть розглядатися окремо.

Змінні, які не мають зв'язків (дуг) між собою, називаються предикторними змінними (лат. *predicatum* – логічний присудок; те, що в міркуванні висловлюється про об'єкт міркування). Предиктори слід розуміти як незалежні змінні, за допомогою яких можна розрахувати інші показники по математичній моделі.

Визначимо набори предикторних змінних:

$$\begin{aligned} M_1 &= \{x_3, x_4, x_5\}, \\ M_2 &= \{x_1, x_5\}. \end{aligned} \quad (4.4.1)$$

Тобто, якщо обрати набір предикторів M_1 , то показники $\{x_1, x_2, x_6, x_7, x_8, x_9\}$ можуть бути вираховані за показниками $\{x_3, x_4, x_5\}$ (аналогічно показники $\{x_2, x_3, x_4, x_6, x_7\}$ можуть визначатися за $\{x_1, x_5\}$). Формально цей факт записується у вигляді

$$\begin{cases} \tilde{x}_1 = f_1(x_3, x_4, x_5); \\ \tilde{x}_2 = f_2(x_3, x_4, x_5); \\ \tilde{x}_6 = f_3(x_3, x_4, x_5); \\ \tilde{x}_7 = f_7(x_3, x_4, x_5); \\ \tilde{x}_8 = f_8(x_3, x_4, x_5); \\ \tilde{x}_9 = f_9(x_3, x_4, x_5). \end{cases} \quad (4.4.2)$$

і називається структурою математичної моделі, що відповідає набору предикторних змінних M_1 . Структура для набору M_2 виглядатиме як

$$\begin{cases} \tilde{x}_2 = f_2(x_1, x_5); \\ \tilde{x}_3 = f_3(x_1, x_5); \\ \tilde{x}_4 = f_4(x_1, x_5); \\ \tilde{x}_6 = f_6(x_1, x_5); \\ \tilde{x}_7 = f_7(x_1, x_5); \\ \tilde{x}_8 = f_8(x_1, x_5); \\ \tilde{x}_9 = f_9(x_1, x_5). \end{cases} \quad (4.4.3)$$

Таким чином, було отримано дві різні структури математичних моделей і наступною задачею є визначення тієї структури, якій буде віддано перевагу. Відповідь на це питання перш за все залежить від того, по яким показникам потрібна інформація. Так, наприклад, якщо потрібно визначити надійність роботи рейкових кіл (X_1), то необхідно скористатися математичною структурою (4.4.2); а якщо потрібні дані по відмовам електродвигунів стрілок і стрілочних гарнітур (X_3), то потрібно звернутися до структури (4.4.3). Якщо ж ніякої апріорної інформації немає (або показник можна розрахувати за будь-якою математичною структурою), то слід обрати ту структуру, яка забезпечує вищу точність.

4.5 Матричний підхід до застосування методу найменших квадратів

Побудуємо лінійну математичну модель:

$$\tilde{x} = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_mx_m. \quad (4.5.1)$$

Нехай відомі спостереження факторів:

і відповідні значення відгуків

де x_{ij} - значення фактора j в експерименті i , Y_i - значення відгуку в експерименті i , $j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$, m - кількість факторів, n - кількість експериментів. Введемо матрицю спостережень, у якої перший стовпчик складатиметься з одиниць:

Також визначимо матриці Y , $\tilde{X}$, a :

де вектор y – вектор спостережень відгуків в експерименті, вектор $\tilde{y}$ - вектор значень відгуків, що відповідають математичній моделі, вектор b – вектор коефіцієнтів математичної моделі, які визначаються. Тоді модель (4.2.1) в матричній формі прийме вигляд:

де

Відхилення емпіричних відгуків від відгуків математичної моделі матимуть вигляд:

Сума квадратів відхилень в матричній формі матиме вигляд:

Матимемо:

Вектор X^T матиме $(m+1)$ елементів, а матриця $S = X^T X$ буде квадратною $(m+1) \times (m+1)$. Нехай вона має зворотню:

Враховуючи все це, система лінійних рівнянь в матричному вигляді для визначення коефіцієнтів b_i може бути записана наступним чином:

а її розв'язання як:

До речі, до такої ж системи лінійних рівнянь приводяться поліноміальні залежності.

Застосуємо матричний підхід МНК у нашому випадку. Для структури математичної моделі (4.4.2) матимемо:

матриця спостережень з одиничним стовпчиком X_1 для структури математичної моделі виглядатиме як:

матриці відгуків спостережень для кожного з факторів матимуть вигляд:

$$\begin{array}{ccccccc}
 \begin{pmatrix} 8 \\ 12 \\ 8 \\ 7 \\ 11 \\ 14 \\ 13 \\ 14 \\ 16 \\ 14 \\ 23 \\ 18 \\ 24 \\ 28 \\ 14 \\ 23 \\ 28 \\ 35 \\ 17 \\ 14 \\ 18 \\ 27 \\ 21 \\ 23 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 13 \\ 19 \\ 20 \\ 12 \\ 6 \\ 10 \\ 15 \\ 9 \\ 3 \\ 12 \\ 6 \\ 13 \\ 12 \\ 6 \\ 7 \\ 6 \\ 3 \\ 9 \\ 6 \\ 3 \\ 5 \\ 7 \\ 3 \\ 11 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 5 \\ 3 \\ 2 \\ 8 \\ 2 \\ 5 \\ 5 \\ 2 \\ 11 \\ 12 \\ 5 \\ 14 \\ 9 \\ 3 \\ 6 \\ 12 \\ 5 \\ 2 \\ 5 \\ 4 \\ 2 \\ 7 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 2 \\ 6 \\ 15 \\ 5 \\ 5 \\ 6 \\ 5 \\ 9 \\ 4 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 7 \\ 4 \\ 7 \\ 4 \\ 4 \\ 5 \\ 3 \\ 1 \\ 3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 4 \\ 2 \\ 3 \\ 5 \\ 3 \\ 2 \\ 2 \\ 7 \\ 2 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 0 \\ 5 \\ 1 \\ 3 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 3 \\ 2 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 3 \\ 0 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 3 \\ 0 \\ 0 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \\ 3 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 4 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} \\
 Y_1 := & Y_2 := & Y_3 := & Y_4 := & Y_6 := & Y_7 := & Y_8 := \\
 & ; & ; & ; & ; & ; & ;
 \end{array}$$

вектори коефіцієнтів математичної моделі, що визначаються як:

матимуть вигляд:

$$A1_1 := \begin{pmatrix} 20.061 \\ 0.075 \\ 0.001 \\ 18.39 \end{pmatrix};$$

$$A1_2 := \begin{pmatrix} 4.41 \\ 0.118 \\ 0.866 \\ 0.021 \end{pmatrix};$$

$$A1_7 := \begin{pmatrix} 0.369 \\ 0.096 \\ 0.007 \\ 2.402 \end{pmatrix};$$

$$A1_8 := \begin{pmatrix} 0.79 \\ 0.057 \\ 0.001 \\ 0.13 \end{pmatrix};$$

отже математична модель (1) остаточно матиме вигляд: t

$$\begin{cases} \tilde{x}_1 = 20,061 + 0,075x_3 + 0,001x_4 + 18,39x_5 ; \\ \tilde{x}_2 = 4,41 + 0,118x_3 + 0,866x_4 + 0,021x_5 ; \\ \tilde{x}_6 = 0,408 + 0,18x_3 + 0,242x_4 + 3,022x_5 ; \\ \tilde{x}_7 = 0,396 + 0,096x_3 + 0,007x_4 + 2,402x_5 ; \\ \tilde{x}_8 = 0,79 + 0,057x_3 + 0,001x_4 + 0,13x_5 ; \\ \tilde{x}_9 = 1,348 + 0,052x_3 + 0,242x_4 + 3,022x_5 . \end{cases}$$

Аналогічно для структури (4.4.3):

$$A1_n = (X1^T X1)^{-1} X1^T Y_n$$

математична модель (2)

виглядатиме:

$$A2_4 := \begin{pmatrix} 7.418 \\ 0.001 \\ 3.307 \end{pmatrix};$$

$$A2_6 := \begin{pmatrix} 4.399 \\ 0.001 \\ 4.339 \end{pmatrix};$$

$$A2_7 := \begin{pmatrix} 1.334 \\ 0.001 \\ 2.436 \end{pmatrix};$$

EMBED Equation.3

$$A2_2 := \begin{pmatrix} 15.82 \\ 0.001 \\ 6.902 \end{pmatrix};$$

$$\begin{cases} \tilde{x}_2 = 15,82 + 0,001x_1 + 6,902x_5 ; \\ \tilde{x}_3 = 4,68 + 0,064x_1 + 0,001x_5 ; \\ \tilde{x}_4 = 7,418 + 0,001x_1 + 3,307x_5 ; \\ \tilde{x}_6 = 4,399 + 0,001x_1 + 4,339x_5 ; \\ \tilde{x}_7 = 1,334 + 0,001x_1 + 2,436x_5 ; \\ \tilde{x}_8 = 0,274 + 0,001x_1 + 0,001x_5 ; \\ \tilde{x}_9 = 3,376 + 0,001x_1 + 1,808x_5 . \end{cases}$$

4.5 Перевірка математичної моделі на адекватність

Під адекватністю математичної моделі розуміють її відповідність емпіричним даним того процесу, явища якого вона описує.

Перевага буде у того метода, який забезпечує найменше розсіювання результатів вимірювань, тобто найменшу дисперсію.

Нехай випадкові величини X і Y розподілені нормально (об'єми вибірок n_1 і n_2 відповідно). Нехай знайдено виправлені дисперсії S_x^2 і S_y^2 . Потрібно по виправленим дисперсіям при заданому рівні значущості α перевірити нульову гіпотезу про те, що генеральні дисперсії сукупностей, які досліджуються, рівні між собою:

$$H_0 : D(X) = D(Y). \quad (4.5.1)$$

Так як виправлені дисперсії є незміщеними оцінками дисперсій, матимемо:

$$M[S_x^2] = D(X), \quad M[S_y^2] = D(Y), \quad (4.5.2)$$

а нульова гіпотеза запишеться так:

$$H_0 : M[S_x^2] = M[S_y^2]. \quad (4.5.3)$$

Таким чином, потрібно перевірити, чи рівні між собою математичні очікування виправлених вибірових дисперсій. Зазвичай виправлені дисперсії виявляються нерівними. У зв'язку з цим виникає питання: значущо (значно) чи незначущо (незначно) відрізняються виправлені дисперсії.

В якості критерія перевірки нульової гіпотези про рівність генеральних дисперсій приймається випадкова величина F , яка є відношенням більшої виправленої дисперсії до меншої:

$$F = \frac{S_\delta^2}{S_\mu^2}. \quad (4.5.4)$$

Розподілення F буде розподіленням Фішера за умови справедливості нульової гіпотези зі степенями свободи $k_1 = n_1 - 1$ і $k_2 = n_2 - 1$:

$$\begin{aligned} H_0 : D(X) &= D(Y); \\ H_1 : D(X) &> D(Y), \end{aligned} \quad (4.5.5)$$

де H_1 - конкуруюча гіпотеза.

Рівень значущості визначається як:

$$P\{F > F_{KP}(\alpha, k_1, k_2)\} = \alpha. \quad (4.5.6)$$

Область прийняття гіпотези H_0 визначається нерівністю $F < F_{KP}$.

Для того, щоб при заданому рівні значущості перевірити нульову гіпотезу $H_0: D(X) = D(Y)$ про рівність генеральних дисперсій нормальних сукупностей при конкуруючій гіпотезі $H_1: D(X) > D(Y)$ потрібно обчислити відношенням більшої виправленої дисперсії до меншої:

$$F_{СПОСТЕРЕЖЕНЬ} = \frac{S_{\delta}^2}{S_{\mu}^2}. \quad (4.5.7)$$

По таблиці критичних точок розподілу Фішера-Снедекора, по заданому рівню значущості α і кількості ступенів свободи k_1 і k_2 (k_1 - число ступенів свободи більшої виправленої дисперсії) знайти критичну точку $F_{KP}(\alpha, k_1, k_2)$.

Якщо при цьому $F_{СПОСТЕРЕЖЕНЬ} < F_{KP}$, то немає приводів відкидати нульову гіпотезу.

Моделі (1) і (2) перевірялися на адекватність з застосуванням критерія Фішера. Враховуючи те, що сума квадратів нев'язок у моделі (1) є меншою ніж у моделі (2), то рекомендується в задачах прогнозування використовувати модель (1).

З інженерної точки зору базові елементи моделей (1) і (2) слід було б об'єднати, оскільки в модель (1) входить фактор x_1 (відмова у роботі рейкових кіл), надійність роботи яких відбивається на функціонуванні системи в цілому.

Після об'єднання базових елементів моделей (1) і (2) отримаємо набір предикторних змінних:

$$M_3 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}. \quad (4.5.8)$$

Тоді структура об'єднаної математичної моделі (моделі 3) матиме наступний вигляд:

$$\begin{cases} \tilde{x}_2 = f_2(x_1, x_3, x_4, x_5); \\ \tilde{x}_6 = f_6(x_1, x_3, x_4, x_5); \\ \tilde{x}_7 = f_7(x_1, x_3, x_4, x_5); \\ \tilde{x}_8 = f_8(x_1, x_3, x_4, x_5); \\ \tilde{x}_9 = f_9(x_1, x_3, x_4, x_5). \end{cases} \quad (4.5.9)$$

Для моделі (3) матриця спостережень X_3 матиме вигляд:

$$X_3 = \begin{pmatrix} 1 & 8 & 5 & 2 & 0 \\ 1 & 12 & 3 & 6 & 0 \\ 1 & 8 & 2 & 15 & 0 \\ 1 & 7 & 8 & 5 & 0 \\ 1 & 11 & 2 & 5 & 0 \\ 1 & 14 & 5 & 6 & 0 \\ 1 & 13 & 5 & 5 & 0 \\ 1 & 14 & 2 & 9 & 0 \\ 1 & 16 & 11 & 4 & 0 \\ 1 & 14 & 12 & 2 & 0 \\ 1 & 23 & 5 & 3 & 0 \\ 1 & 18 & 14 & 4 & 0 \\ 1 & 24 & 9 & 7 & 0 \\ 1 & 28 & 3 & 4 & 0 \\ 1 & 14 & 6 & 7 & 0 \\ 1 & 23 & 12 & 4 & 0 \\ 1 & 28 & 5 & 4 & 0 \\ 1 & 35 & 2 & 5 & 1 \\ 1 & 17 & 5 & 3 & 0 \\ 1 & 14 & 4 & 1 & 0 \\ 1 & 18 & 2 & 4 & 0 \\ 1 & 27 & 7 & 3 & 0 \\ 1 & 21 & 3 & 1 & 0 \\ 1 & 23 & 3 & 2 & 0 \end{pmatrix}; \quad (4.5.10)$$

$$A_{Z_2} = \begin{pmatrix} 0,838 \\ 0,001 \\ 0,001 \\ 0,048 \\ 0,337 \end{pmatrix}, \quad A_{Z_6} = \begin{pmatrix} 0,001 \\ 0,001 \\ 0,001 \\ 0,001 \\ 0,001 \end{pmatrix}, \quad A_{Z_7} = \begin{pmatrix} 0,001 \\ 0,001 \\ 0,004 \\ 0,001 \\ 0,015 \end{pmatrix}, \quad A_{Z_8} = \begin{pmatrix} 0,001 \\ 0,001 \\ 0,001 \\ 0,006 \\ 0,001 \end{pmatrix}, \quad A_{Z_9} = \begin{pmatrix} 0,337 \\ 0,001 \\ 0,015 \\ 0,001 \\ 1,522 \end{pmatrix}$$

Остаточно об'єднана математична модель (3) матиме вигляд:

$$\begin{cases} \tilde{x}_2 = 0,838 + 0,001x_1 + 0,001x_3 + 0,048x_4 + 0,337x_5; \\ \tilde{x}_6 = 0,001 + 0,001x_1 + 0,001x_3 + 0,001x_4 + 0,001x_5; \\ \tilde{x}_7 = 0,001 + 0,001x_1 + 0,004x_3 + 0,001x_4 + 0,015x_5; \\ \tilde{x}_8 = 0,001 + 0,001x_1 + 0,001x_3 + 0,006x_4 + 0,001x_5; \\ \tilde{x}_9 = 0,337 + 0,001x_1 + 0,015x_3 + 0,001x_4 + 1,522x_5. \end{cases} \quad (4.5.11)$$

4.6 Висновки за розділом 4

Для планування робіт, пов'язаних з підтриманням справності та працездатності пристроїв СЗАТ рекомендується використовувати математичну модель (1), модель (2) або узагальнену модель (3). За допомогою моделі (1) можна раціонально розподіляти людські та матеріальні ресурси для забезпечення необхідної надійності СЗАТ.

ВИСНОВКИ

Покращення експлуатаційних показників роботи пристроїв залізничної автоматики та телемеханіки може бути досягнуто удосконаленням їх системи утримання.

Розроблено структурну математичну модель для короткострокового прогнозування відмов елементів СЗАТ.

В основу виділення структур досліджуваного процесу відмов покладено існування кореляційного зв'язку між його елементами. Кореляційний зв'язок представляється графом. Структури процесу відмов утворюються на основі поняття відношення толерантності (виділення підграфів зв'язності) між показниками.

За моделлю запропоновано допоміжну систему утримання.

Допоміжну систему утримання СЗАТ можна розділити на три підсистеми:

- підсистема електродвигунів стрілок і гарнітур;
- підсистема кабельних ліній;
- підсистема повітряних ліній.

Покращення роботи рейкових кіл, апаратури, сигналів, пультів, табло, апаратури керування, енергоживлення, елементів захисту може бути досягнуто додатковими профілактичними впливами на підсистеми електродвигунів стрілок і гарнітур, кабельних ліній та повітряних ліній.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Hoyle R.H. Introduction to the special section: structural equation modeling in clinical research // Journal of consulting and clinical psychology, 1994. 62 (3) – P.427–428.
- Applications of structural equation modeling in psychological research // Annual review of psychology, 2000. 51. – P.201–226.
3. Martens M.P. The use of structural equation modeling in counseling psychology research // The counseling psychologist, 2005. 33. – P.269–298.
4. Liu A.. Building structural equation models in social science. – RM Institute, 2009. – P.75.
5. Stevens J. Applied multivariate statistics for the social sciences. – Eye. Structural equation modeling: applications in ecological and evolutionary biology. –CambridgeUniversityPress;Cambridge,UK, 2003.
- Large-scale and long-term case studies and methods, S. L. Miao, S. Carstenn, and Nungesser, Eds. // Springer. – N.Y., 2009. – P.19–46.
- Cambridge,England:CambridgeUniversityPress., 2009.
9. Byrne B.M. Structural equation modeling with AMOS – basic concepts, 2nd ed.). – Mahwah; NJ: Erlbaum., 2006.
11. Byrne B.M. Structural equation modeling with LISREL, PRELIS, and SIMPLIS: Basic concepts, applications, and programming. – Mahwah; NJ: Erlbaum., 2001.
12. Muthen L.K., Muthen B.O. Mplus users guide (version 2.0). –Los Angeles; CA: Muthen & Muthen, 2007.
13. Hatcher L. A step-by-step approach to using the SAS system for factor analysis and structural equation modeling. – Cary; N.C.: SAS Institute., 1994.
14. Schumacker R.E., Lomax, R.G. A beginner's guide to structural equation modeling. – Hillsdale; NJ: Erlbaum., 1996.

15. Kline R.B. Principles and practice of structural equation modeling. –
16. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы. М.: Мир, 1978. 311 с.
17. Винер Н. Кибернетика. М.: Советское радио, 1968. –137 с.
18. 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.
19. Ивахненко А.Г. Метод группового учета аргумента – конкурент метода стохастической аппроксимации. Автоматика: Киев. 1968. №3. 587 с.
20. Ивахненко А.Г., Зайченко Ю.П., Димитров В.Д. Принятие решений на основе самоорганизации. – М.: Советское радио, 1976. – 280 с.
21. Ивахненко А.Г., Степашко В.С. Помехоустойчивость моделирования. – Киев: Наукова думка, 1985. – 214 с.
22. Ивахненко А.Г., Мюллер Й.А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. К.: Техніка, 1985. 224 с.
23. Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. М.: Радио и связь, 1987. –120 с.
24. Воробьёв А.В., Баркова Т.Ю. Латентно-структурная математическая модель влияния психосоциальных факторов на психосоматическое состояние подростков // Естественные и технические науки. 2011. № 3.
25. Остапенко Р.И. О корректности применения количественных методов в психолого-педагогических исследованиях [Электронный ресурс] // Перспективы науки и образования, 2013. № 3.
26. Остапенко Р.И. Структурные связи ценностных ориентаций и поведенческого стиля в конфликтной ситуации работников организации

[Электронный ресурс] // Перспективы науки и образования, 2013. №

27. Девятко И.Ф. Диагностическая процедура в социологии: очерк истории и теории. М., 1993.

28. Остапенко Р.И. Структурное моделирование в психологии и педагогике [Электронный ресурс] // Перспективы науки и образования, 2013. № 2. URL: <http://pnojurnal.wordpress.com/archive> (дата обращения:

29. Крамер Д., Математическая обработка данных в социальных науках: Современные методы: Учебное пособие для вузов. – М., 2007. – 288 с.

30. Наследов А.Д. IBM SPSS Statistics 20 и AMOS: профессиональный статистический анализ данных. – СПб: Питер, 2013. – 416 с.

31. Остапенко Р.И. Основы структурного моделирования в психологии и педагогике. – Воронеж.: ВГПУ, 2012. – 128 с.

32. Остапенко Р.И. Формирование информационно-математической компетентности студентов гуманитарных специальностей: методические аспекты [Электронный ресурс] // Перспективы науки и образования, 2013. № 4. URL: <http://pnojurnal.wordpress.com/archive> (дата обращения:

33. Остапенко Р.И. Методические аспекты формирования информационно-математической компетентности студентов гуманитарных специальностей. // Современные научные исследования и инновации. – М

а 34. Остапенко Р.И. О формировании математической компетентности студентов-экономистов. // Современные научные исследования и

и

н

н

у

о

р

е

а

ц