

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерство освіти і науки України

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЩЕБЛИКІНА ОЛЕНА ВІКТОРІВНА

УДК 656.256:681.32


ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ГОТОВНОСТІ
СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РУХОМ ПОЇЗДІВ НА ОСНОВІ КОНТРОЛЮ
ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ**

275 – транспортні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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


О.В.Щебликіна

Науковий керівник:

КАМЕНЄВ Олександр Юрійович
кандидат технічних наук, доцент

Харків – 2020

АНОТАЦІЯ

Щебликіна О.В. Підвищення експлуатаційної готовності систем керування рухом поїздів на основі контролю функціональних параметрів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 – Транспортні технології – Український державний університет залізничного транспорту, МОН України, Харків, 2020.

Дисертацію присвячено питанню підвищення експлуатаційної готовності систем керування рухом поїздів (СКРП), що реалізовані на мікроелектронній елементній базі з програмованою логікою функціонування, з метою скорочення непродуктивного простою руху поїздів на ділянках залізниць.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у вирішенні науково-прикладного завдання підвищення експлуатаційної готовності СКРП на основі контролю їх функціональних параметрів, що здійснюється шляхом вдосконалення методів і моделей функціональних випробувань зазначених систем.

Вперше отримано, розроблено і запропоновано:

– методичний підхід до визначення експлуатаційної готовності СКРП, що використовує модель оцінки глибини контролю їх функціональних параметрів, яка будується на бієктивних відношеннях між функціональними складовими систем і їх технологічних об'єктів;

– спосіб відтворення технологічних об'єктів у засобах контролю функціональних параметрів СКРП на основі графо-функціональних моделей, що враховують як статичні, так і динамічні властивості об'єктів керування та контролю із використанням функціональних вершин;

– метод аналітичної інтерпретації технологічних об'єктів СКРП, що забезпечує відтворення їх статичних і динамічних властивостей у процесі контролю функціональних параметрів та базується на представленні графо-функціональних моделей функціонально-топологічними матрицями, формування яких здійснюється на основі матриць суміжності з діагональним відтворенням наповнення функціональних вершин;

– закономірності, які встановлюють зв'язок між глибиною контролю функціональних параметрів СКРП, масштабністю і складністю технологічних об'єктів СКРП та їх експлуатаційною готовністю.

Удосконалено:

– метод блочно-діагонального синтезу моделей для функціональних випробувань СКРП, який, на відміну від існуючого, базується на використанні вихідних блоків функціонально-топологічних матриць суміжності замість параметрично-топологічних матриць інцидентності;

– спосіб оцінки ефективності заходів із забезпечення експлуатаційної готовності СКРП за результатами функціональних випробувань, який базується на встановленому законі розподілу помилок програмного забезпечення.

Набули подальшого розвитку:

– підходи до оцінювання безпеки використання ергатичних СКРП, які враховують багатозначність допоміжних технологічних режимів функціонування системи та її інтерактивний характер взаємодії з персоналом;

– результати прогнозування впливу людського й технічного чинників на експлуатаційну надійність пристроїв СКРП.

Практичні результати дисертаційної роботи полягають у її прикладній спрямованості на підвищення параметрів готовності та відновлення СКРП у процесі експлуатації, зменшення непродуктивного простою в русі поїздів, а також зменшення ресурсоємності та підвищення ефективності контролю функціональних параметрів СКРП. Використання результатів дисертації дозволяє підвищити коефіцієнт готовності СКРП до 18%, збільшити інтенсивність відновлення СКРП до 6-ти разів, зменшити непродуктивні простої руху поїздів до 16%, підвищити рівень глибини контролю при функціональних випробуваннях СКРП до двох разів і зменшити інформаційні та часові ресурси на їх підготовку до 2-х разів. Крім того, результати дисертації мають перспективи подальшого розвитку щодо застосування в технологіях експлуатації інших видів транспорту.

За темою дисертації опубліковано 27 наукових праць, у тому числі 8 наукових статей у фахових виданнях, затверджених МОН України, з яких

1 включена до міжнародної наукометричної бази Scopus, 1 наукова стаття в іноземному виданні країни ЄС, 3 додаткові праці і 15 праць апробаційного характеру.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, наведено його мету, завдання, зв'язок із науковими програмами, планами і темами університету. Представлено наукову новизну, практичну значущість дисертації та наведено її загальну характеристику.

У *першому розділі* виконано огляд сучасного стану діючих СКРП на залізничному транспорті України та рівня їх надійності, встановлені тенденції та перспективи їх розвитку, а також визначені шляхи вирішення задач, пов'язаних із підвищенням їх експлуатаційної готовності.

Технічні засоби СКРП, які забезпечують рух поїздів і забезпечують належну пропускну здатність ділянок залізниць, знаходяться у морально і фізично зношеному стані, причому останній досягає рівня більше 60%. На підставі причинного аналізу відмов пристроїв СКРП протягом 2010 – 2019 років встановлено тренд щодо зростання впливу технічного чинника на їх експлуатаційну надійність і зменшення відповідного людського чинника. Прогнозування впливу зазначених чинників із коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0.97$ дає підстави стверджувати, що за умови відсутності комплексної модернізації технічних засобів СКРП в Україні до 2024 року вплив людського і технічного чинників зрівняється, а до 2030 року технічний чинник перевищуватиме людський удвічі.

Зазначена тенденція несе загрозу як безперебійній роботі залізничного транспорту, так і забезпеченню руху поїздів, що додатково вимагає впровадження більш сучасних СКРП на магістральному залізничному транспорті. Сучасні вимоги щодо розвитку техніки, сформовані в ході Четвертої світової промислової революції (Industry-4.0), обумовлюють запровадження принципово нових програмно-апаратних засобів СКРП, що базується на принципах цифровізації та інтелектуально-аналітичного супроводження.

У таких умовах набувають актуальності перегляд та коригування традиційних методів, моделей та засобів забезпечення експлуатаційної готовності СКРП. Одним з найважливіших заходів у цьому напрямку є вдосконалення методології контролю

показників призначення, надійності та безпеки використання систем, який доцільно виконувати шляхом функціональних випробувань.

Проведений аналіз різновидів та способів реалізації функціональних випробувань, а також підготовки до них, дає підстави вважати, що ключовою умовою їх ефективності та достовірності є адекватне відтворення технологічних об'єктів СКРП при виконанні ними заданих функцій. Ефективним інструментом цього відтворення є графоаналітичне моделювання технологічних об'єктів при формуванні та використанні моделей для випробувань, дослідженню якого присвячено немало праць вітчизняних і зарубіжних науковців.

Аналіз зазначених праць та їх інтерпретація щодо умов функціонування СКРП на залізницях України дозволив сформулювати основні шляхи підвищення їх експлуатаційної готовності на основі вдосконалення методів, моделей та засобів функціональних випробувань таких систем, що запроваджуються і модернізуються на принципах цифровізації.

Другий розділ присвячено формалізації технологічних об'єктів СКРП та показників ефективності випробувань, а також розробленню моделі оцінки глибини контролю функціональних параметрів СКРП для подальшого застосування відповідних результатів при підвищенні експлуатаційної готовності систем.

У процесі дослідження встановлено й обґрунтовано, що основними параметрами раціоналізації функціональних випробувань СКРП є ресурси на їх підготовку і проведення та обсяг випробувань, що зводиться до глибини контролю функціональних параметрів систем. Для мікропроцесорних систем керування глибина контролю визначається тестовим покриттям, що забезпечується функціональними випробуваннями.

Шляхом визначення відношень і зв'язків між складовими глибини контролю та іншими показниками ефективності функціональних випробувань було встановлено пропорційний зв'язок між тестовим покриттям та іншими параметрами раціоналізації, а також визначено, що обсяг тестового покриття є рівнозначним сумарній потужності множини всіх функціональних зв'язків між його складовими.

Це дало підставу для формування моделі оцінки глибини контролю функціональних випробувань на базі системи лінійних співвідношень між

кількісними показниками, що задають зазначені зв'язки. Дані показники визначаються як розв'язок системи лінійних рівнянь щодо основних складових глибини контролю СКРП. У ході дослідження встановлено ряд додаткових обмежень щодо технологічних об'єктів СКРП, стосовно яких припустимим є застосування моделі.

Досліджені похибки та адекватність моделі дозволили встановити точні діапазони припустимості її застосування для різних систем керування з точки зору їх масштабності та складності, що в подальшому призначено для оцінки доцільності використання тих чи інших моделей для випробувань і методів їх формування.

Дослідження, виконані в *третьому розділі*, присвячені формуванню методів синтезу моделей для випробувань СКРП різного призначення та їх зв'язку із параметрами експлуатаційної готовності.

З метою зменшення ресурсоемності та підвищення глибини контролю функціональних параметрів СКРП, а також уніфікації методів його реалізації для систем різного призначення, у розділі розроблено підходи до формування графо-функціональної моделі технологічних об'єктів, яка закладається в основу формування моделей для випробувань СКРП. Аналітична інтерпретація графо-функціональних моделей здійснюється на базі матриць суміжності, які модифікуються до функціонально-топологічних матриць. На відміну від найближчого аналога – параметрично-топологічних матриць – функціонально-топологічні матриці, базуючись на принципах суміжності заданих елементів, за діагональним позиціонуванням відтворюють динамічні функціонали вершин графу та опосередкованим способом завдають кількісні й векторні характеристики зв'язків між вершинами, що моделюють об'єкти керування та контролю.

Функціонально-топологічні матриці в повному обсязі задають конфігурацію та динамічні властивості технологічних об'єктів систем керування, проте безпосереднє їх використання ускладнюється значною розмірністю щодо технологічних об'єктів великої масштабності.

Взявши за основу окремі принципи реалізації методу прямих сум, що застосовувався для параметрично-топологічних матриць, зазначений метод був

суттєво перероблений і модифікований у метод модифікованих прямих сум, що відрізняється використанням опорних елементарних дерев, які розмежують графо-функціональну модель на компоненти, для кожної з яких формується окремий блок функціонально-топологічної матриці.

Відповідно до оцінки ефективності запропонованого методу синтезу моделей для випробувань СКРП порівняно з найближчим аналогом за критеріями мінімізації кількості інформації, що вводиться під час синтезу моделі, мінімізації тривалості підготовки до випробувань, мінімізації кількості помилок проектувальника моделі та збільшення тестового покриття встановлено, що ефективність за першими трьома показниками, залежно від масштабності об'єкта випробувань, збільшується до п'яти разів, а за досягнутим тестовим покриттям – до двох разів.

Зазначені переваги свідчать про доцільність та припустимість використання запропонованого методу при контролі функціональних параметрів СКРП з метою забезпечення їх експлуатаційної готовності.

Четвертий розділ присвячено аспектам практичного застосування результатів дисертаційного дослідження.

З урахуванням закономірностей між параметрами ефективності розробленого методу контролю функціональних параметрів, визначених у третьому розділі, перш за все глибиною контролю, з одного боку, та показниками експлуатаційної готовності, з другого боку, встановлено, що залежно від масштабності та складності технологічних об'єктів використання розробленого методу дозволяє збільшити коефіцієнт готовності СКРП до 18%, а інтенсивність їх відновлення – до шести разів. Враховуючи встановлений у першому розділі кореляційний зв'язок між експлуатаційною надійністю СКРП та затримками руху поїздів досягнення таких результатів дозволяє зменшити кількість непродуктивних простоїв поїздів до 16%.

У процесі практичної реалізації результатів дисертаційного дослідження для СКРП різного призначення встановлено, що наповнення функціональних вершин для різних технологічних об'єктів керування може здійснюватися аналітично, графічно (у вигляді вкладених графів) та змішаним способом. Використання змішаного способу зважування функціональних верши досліджено

на прикладі фрагменту моделі для випробувань інтелектуально-аналітичної системи підтримки прийняття рішень диспетчерської централізації на промисловому залізничному транспорті. Аналогічні підходи запропоновані для формування та конфігурації модернізованого контрольного пункту автоматичної локомотивної сигналізації моторвагонного депо.

На прикладі системи мікропроцесорної централізації стрілок та сигналів (МПЦ) розроблено та використано систему автоматизованого проектування (САПР) моделі для випробувань, в основу якої закладено розроблений у третьому розділі метод модифікованих прямих сум. Застосування САПР для синтезу моделі для випробувань системи МПЦ однієї зі станцій регіональної філії «Південно-західна залізниця» АТ «Укрзалізниця» підтвердило коректність використання методу, а шляхом тестування моделі на базі штатних діагностичних засобів контролю обміну між підсистемами централізації доведено її адекватність при відтворенні всіх об'єктів керування та контролю.

Додатково в розділі досліджено результати випробувань зазначеної системи МПЦ, в ході яких встановлено експоненціальний закон розподілу виявлених помилок програмного забезпечення, яке реалізує логічні залежності централізації.

На основі отриманих результатів запропоновано показники ефективності підготовки програмних засобів багатоканальних мікропроцесорних систем електричної централізації, які базуються на визначенні швидкості зміни функції розподілу виявлених помилок.

Зазначені показники дозволять виконати прогнозування експлуатаційної готовності СКРП на етапах їх виробництва, технічного обслуговування та ремонту як на об'єктах експлуатації, так і в заводських або лабораторних умовах.

Розрахований економічний ефект від використання науково-практичних результатів дисертації становить приблизно 330,75 тис. грн. на рік при запланованих обсягах модернізації СКРП, що свідчить про доцільність їх впровадження.

Ключові слова: система керування рухом поїздів, експлуатаційна готовність, контроль функціональних параметрів, функціональні випробування, метод випробувань, модель для випробувань, глибина контролю, тестове покриття, відмова, надійність, безпека використання.

ABSTRACT

Shcheblykina O.V. Improving the operational readiness of train control systems based on the control of functional parameters. – Qualification scientific work – manuscript.

Thesis for a Ph.D. – Doctor of Philosophy in 275 – Transport Technologies. – Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to the issue of increasing the operational readiness of train control systems performed on the microelectronic elementary base with the programmed logic of functioning with the purpose of reducing unproductive train movement downtime at railway sections.

The scientific novelty of the dissertation is revealed in solving the scientific and applied problem of improving the operational readiness of train control systems based on the control of their functional parameters, which is carried out by improving the methods and models of functional tests for the systems defined.

It is for the first time that the following has been specified, developed and proposed:

- methodological approach to determining the operational readiness of train traffic control systems with use of the evaluation model of test coverage of functional tests, which is based on the objective relationship between functional parameters of systems and technological objects;

- the method of reproduction of technological objects in the control means of train control systems functional parameters on the basis of graph-functional models, which take into account both static and dynamic characteristics of controlled objects using functional vertices;

- the method of analytical interpretation of technological objects of train traffic control systems, which provides reproduction of their static and dynamic characteristics in the process of control of functional parameters and is based on graph-functional models presented by functional-topological matrices, which are formed on the basis of adjacency matrices with diagonal view of functional vertices;

– regularities that establish the relationship between the level of control of the functional parameters of train control systems, the scale and complexity of the technological objects of train control systems and their operational readiness.

The following have been improved:

– the method of block-diagonal synthesis of models for functional tests of train control systems, which, in contrast to the existing one, is based on the use of source blocks of functional-topological adjacency matrices instead of parametric-topological incidence matrices;

– the method for assessing the effectiveness of measures to ensure the operational readiness of train control systems based on the results of functional tests, which is based on the established law of distribution of software errors.

Further development has been given to:

– the approaches to assessing the safety of the use of ergatic train control systems, which take into account the ambiguity of the auxiliary technological modes of system operation and the interaction character of communication with operational, technical and inspection personnel;

– the results of forecasting the impact of human and technical factors on the operational reliability of devices and train control systems.

The practical results of the dissertation are revealed in the fact that the research is applicable and is aimed at improving the parameters of readiness and restoration of train control systems during operation, reducing unproductive downtime of trains, as well as reducing resource consumption and improving the control of functional parameters of train control systems. The use of practical results of the dissertation allows, first of all, increasing the train control systems readiness coefficient up to 18%, increasing the recovery intensity up to six times and reducing unproductive downtime of trains up to 16%, improving depth control level at functional tests of train control systems up to two times and reducing data and time resources for their preparation to two times. In addition, the results of the dissertation have prospects for further development when applied to operation technologies of other modes of transport.

On the topic of the dissertation there have been published 27 scientific papers, including 8 scientific articles in professional journals approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine, 1 out of which is included in the international scientometric database Scopus; 1 scientific article is in a foreign publication of an EU country; three additional works; 15 works of approbation character.

The introduction substantiates the relevance of the topic of the dissertation, its aim, objectives, in connection with scientific programs, plans and topics of the university. The scientific novelty, practical significance of the dissertation is presented and its general characteristic is given.

The first section reviews the current state of existing train control systems for railway transport of Ukraine and the level of their operational reliability, identifies trends and prospects for their development, as well as determines the ways of solving the problems of operation readiness improvement.

The technical means of train traffic control systems, which ensure the movement of trains and provide for the proper through-put capacity of railway sections, are in a morally and physically worn-out condition, the latter reaching the level of more than 60%. The analysis of failures of train control systems for the period of 2010 – 2019 gives ground to ascertain the formation of a trend to increase the technical factor impact on the operational reliability and to reduce the corresponding human factor. At the same time, predicting the impact of the defined factors with a coefficient of determination $R^2 = 0.97$ suggests that in 2024 the impact of human and technical factors will be equalized, and by 2030 the technical factor will exceed twice the human.

This trend poses a threat to both the fail-safe operation of railway transport and train safety, which further requires the introduction of more up-to-date train control systems on the main railway transport. Modern requirements to the development of technology, which were formed during the Fourth World Industrial Revolution (Industry-4.0), result in the introduction of fundamentally new technology in the means of train traffic control systems, based on the principles of digitalization and intellectual and analytical support.

The problem of revising and correcting traditional methods, models and means of ensuring operational readiness of train operation systems becomes more topical under such conditions. One of the most important steps in this direction is the introduction of the methodology of the factors of system function, reliability and safety which is to be applied through functional tests.

The analysis of varieties and methods of functional tests, as well as preparation for them, gives reason to believe that the key condition for their effectiveness and reliability is the adequate reproduction of technological objects of train control systems when performing their assigned functions. An effective tool for this reproduction is graph-analytical modeling of technological objects in the formation and use of models for testing, which has been studied in numerous domestic and foreign scientific works.

The analysis and interpretation of these works regarding the operating conditions of train control systems on the railways of Ukraine allowed determining the main ways to improve the operational suitability of train control systems based on the perfection of methods, models and means of functional testing of such systems implemented and modernized on digital principles.

The second section is devoted to the formalization of technological objects of train control systems and test performance indicators, as well as the development of a model for estimating the level of control for further application of appropriate results in improving the operational readiness of systems.

In the course of the research it was established and substantiated that the main parameters of rationalization of functional tests of train control systems are the resources for their preparation and conduct, as well as the amount of tests, which is reduced to the level of control of functional parameters. For microprocessor control systems, the level of control is determined by the test coverage provided by the tests.

By determining the relationship between the components of the test coverage and other indicators of the effectiveness of functional tests, a proportional relationship between the test coverage and other parameters of rationalization was established, and it was determined that the amount of test coverage is equivalent to the total power of all functional relationships between its components.

This gave rise to the formation of the foundations of the model for estimating the level of control (test coverage) of functional tests based on a system of linear relationships between the quantitative indicators specified in these relationships. These indicators are defined as the solution of a system of linear equations for the main components of the test coverage. The study identified a number of additional restrictions on the technological objects of train traffic control systems, for which the use of the model is acceptable.

The studied errors and adequacy of the model resulted in establishing the exact ranges of acceptability of its application for different control systems in terms of their scale and complexity, which is further intended to assess the feasibility of using certain models for testing and methods of their formation.

The research performed *in the third section* is devoted to the formation of methods for the synthesis of models for testing train control systems for various purposes and their relationship with the parameters of operational readiness.

With the aim of reducing power intensity and increasing the control level of functional parameters of train control systems, as well as unification of implementation methods for multipurpose systems, the section elaborates the approaches to forming grapho-functional model of technological objects which is laid at the basis of model formation for train control system tests. Analytical interpretation of grapho-functional models is carried out on the basis of adjacency matrices, which are modified to functional-topological matrices. In contrast to the closest analogue – parametric-topological matrices – functionally topological matrices, based on the principles of adjacency of given elements, diagonally positioning reproduce the dynamic functional of the vertices of the graph and indirectly cause quantitative and vector characteristics of the relationship between vertices modeling control objects and control.

Functional-topological matrices fully define the configuration and dynamic characteristics of technological objects of control systems; however, their implementation is complicated by considerable dimensions of large-scale technological objects.

Based on some principles of implementation of the method of direct sums used for parametric topological matrices, this method was significantly redesigned and modified into a method of modified direct sums, characterized by the use of reference elementary trees that delimit the graph-functional model into components for each of which form a block of functional-topological matrix.

According to the evaluation of the efficiency of the proposed method of model synthesis for testing train control systems as compared to the closest analogue by the criteria of minimizing the amount of information entered during model synthesis, minimizing the duration of test preparation, minimizing the number of model designer errors and increasing test coverage, it is determined that according to the first three indicators and depending on the scale of the test object, the efficiency increases up to five times, and according to the achieved test coverage – up to two times.

These advantages indicate the feasibility and acceptability of the use of the proposed method in controlling the functional parameters of train control systems in order to ensure their operational readiness.

The fourth section is devoted to the aspects of practical application of dissertation research results.

Taking into account the established regularities between the parameters of efficiency of the developed method of control of functional parameters established in the third section, first of all – depth of control, on the one hand, and indicators of operational readiness on the other hand, it is established that depending on scale and complexity of technological objects, the use of the developed method allows to increase the coefficient of readiness of train control systems to 18%, and the intensity of their recovery – up to six times. Taking into account the correlation between the operational reliability of control systems and train delays which was established in the first section, such results allow to reduce the number of unproductive downtime of trains up to 16%.

In the process of practical testing of the results of the dissertation for train control systems for different purposes, it has been found out that the filling of functional peaks for different technological control objects can be done analytically, graphically (in the form of nested graphs) and by a mixed method. The use of a mixed

method of weighing functional verses is investigated on the example of a fragment of the model for testing the intellectual-analytical decision support system of centralized traffic control on freight rail transport. Similar approaches are proposed for the formation and configuration of modernized control point of automatic locomotive signaling at car depot.

On the example of the system of microprocessor centralization of points and signals, the system of automated design (CAD) of the model for tests which uses the method of the modified direct sums developed in the third section has been elaborated and implemented. The use of CAD for the synthesis of a model for testing the electrical centralization system of one of the stations of the regional branch «South-Western Railway» JSC «Ukrainian railways» confirmed the correctness of the method, and by testing the model based on standard diagnostic tools to control the exchange between objects of management and control, its feasibility to all the objects of control and management is confirmed.

Additionally, the section examines the results of tests of the station centralization system, during which the exponential law of software fault distribution is established realizing the logical dependencies of signaling.

The results of the research give ground to propose the preparation efficiency indicators for multichannel microprocessor interlocking systems which are based on determining the steepness of monotonic distribution of software errors detected during tests.

These indicators will allow forecasting the operational readiness of train traffic control systems at the stage of their production, maintenance and repair both at the facilities and in the factory or laboratory conditions.

According to the calculation of the economic efficiency of the implementation of the results of the dissertation, it is established that the corresponding economic effect is about UAH 330,75 thousand a year per one technical unit with the planned volumes of modernization of train control systems.

Keywords: train traffic control system, operational readiness, control of functional parameters, functional tests, test method, test model, level of control, test coverage, failure, reliability, safety of use.

Список публікацій здобувачки

Основні наукові праці:*Наукові праці у фахових виданнях України:*

1. Каменєв О. Ю., Сіроклин І. М., Змій С. О., Щебликіна О. В. Технологічна проблема регулювання пристроїв автоматичної локомотивної сигналізації моторвагонного рухомого складу. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. Вип. 168. С. 19 – 30.

2. Бойнік А.Б., Каменєв О.Ю., Змій С.О., Щебликіна О.В., Гаєвський В.В. Дефектування технічного, технологічного та організаційного забезпечення контрольного пункту АЛСН моторвагонного депо. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті: науково-технічний журнал*. 2017. Вип. №13. С. 66 – 80.

3. Бойнік А.Б., Прилипко О.Ю., Каменєв О.Ю., Лазарєв О.В., Щебликіна О.В. Вибір типу чутливого елемента для точкового колійного датчика. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. Вип. № 2. С. 31 – 39.

4. Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Щебликіна О. В., Лазарєв О.В., Ушаков М.В. Модель диспетчерського керування взаємозалежними транспортними потоками на промисловому залізничному транспорті. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 182. С. 63 – 79.

5. Voinik, A., Prohunnyi, O., Kameniev, O. Lapko, A., Kuzmenko, D., Shcheblykina O. Development and investigation of methods of graphic-functional modeling of distributed systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 94. № 4 /4. 2018. P. 59-69. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.140636 (видання індексується у базі Scopus).

6. Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Щебликіна О.В. Прогнозна динаміка впливу людського та технічного чинників на експлуатаційну надійність пристроїв залізничної автоматики. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2020. Вип. 40. С. 168 – 178.

7. Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Щебликіна О.В. Математичні моделі верифікації ергатичних систем засобів залізничної автоматики. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. Вип. 4 (151). С. 7 – 14.

8. Щєбликіна О.В., Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Сагайдачний В.Г. Підвищення показників готовності та відновлення систем керування рухом поїздів на основі збільшення глибини контролю. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. Вип. № 2. С. 32 – 42.

Публікації у виданнях інших держав:

9. Kameniev O., Lapko A., Shcheblykina E. Improvement of technologies for the development of modern rail automation systems. *International journal for science, technics and innovations for the industry*. «MACHINES. TECHNOLOGIES. MATERIALS». Sofia, Bulgaria. 2017. Issue 11. P. 533 – 536.

Праці апробаційного характеру:

10. Бойнік А.Б., Змій С.О., Каменєв О.Ю., Щєбликіна О.В. Метод та результати моделювання операцій чергового по станції: тези X Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті», м. Дніпро (14 – 15 грудня 2016 р.). – Дніпро: ДНУЗТ ім. академіка В. Лазаряна. 2016. С. 26.

11. Каменєв О.Ю., Щєбликіна О.В. Удосконалення та формалізація процедур складання технічних завдань розробникам програмного забезпечення систем керування та регулювання руху поїздів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: матеріали доповідей 29-ї міжнародної науково-практичної конференції, м. Чорноморськ (27 – 29 вересня 2016 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. №4 (Додаток). С. 27 – 28.

12. Щєбликіна О.В., Анічін В.В. Використання мобільного додатку автоматизованого робочого місця електромеханіка. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: матеріали доповідей 29-ї міжнародної науково-практичної конференції, м. Чорноморськ (27 – 29 вересня 2016 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. №4 (Додаток). С. 51.

13. Бойнік А.Б., Кустов В.Ф., Щєбликіна О.В., Каменєв О.Ю. Развитие научных основ и практических подходов к обеспечению и доказательству безопасности систем железнодорожной автоматики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: матеріали доповідей 30-ї міжнародної

науково-практичної конференції, м. Одеса (20 – 23 вересня 2017 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2017. Вип. №4 (Додаток). С. 71 – 73.

14. Бойник А.Б., Щєблыкіна Е.В. Проведение испытаний автоматизированной системы микропроцессорной централизации стрелок и сигналов на функциональную безопасность и безотказность на имитационных моделях. *Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті: тези VIII міжнародної науково-практичної конференції, м. Чернівці (01 – 03 лютого 2017 р.).* – Дніпро: ДНУЗТ ім. академіка В. Лазаряна, 2017. С. 17 – 18.

15. Бойник А.Б., Кустов В.Ф., Каменєв О.Ю., Змій С.О., Щєблыкіна О.В. Особливості мікропроцесорного керування переїзною сигналізацією. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту: тези доповідей 79-ї міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті», м. Харків (25 – 27 квітня 2017 р.).* – Харків: УкрДУЗТ, 2017. Вип. 169 (Додаток). С. 4 – 6.

16. Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Щєблыкіна О.В. Верифікація програмних засобів, реалізованих мовою релейно-контактної логіки. *Free and open source software: матеріали X ювілейної міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків (20 – 22 листопада 2018 р.).* – Харків: ХНУБА, 2018. С. 68.

17. Мойсеєнко В.І., Каменєв О.Ю., Гаєвський В.В., Щєблыкіна О.В. Розвиток засобів технічної діагностики інформаційно-керуючих систем на залізничному транспорті. *Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали II міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ (3 – 5 квітня 2018 р.).* – Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2018. С. 168.

18. Каменєв О.Ю., Щєблыкіна О.В. Вдосконалення процедур синтезу випробувальних моделей залізничної автоматики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: тези стендових доповідей та виступів 31-ї міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків (24 – 26 жовтня 2018 р.).* – Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. №4 (Додаток). С. 64 – 65.

19. Щєблыкіна О.В., Кузьменко Д. М. Доказ безпечності мікропроцесорної системи напівавтоматичного блокування з радіоканалом. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: тези стендових доповідей та виступів 31-ї*

міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків (24 – 26 жовтня 2018 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. №4 (Додаток). С. 66.

20. Лапко А.О., Каменєв О.Ю., Щебликіна О.В., Сагайдачний В.Г., Панасенко М.О., Кладко А.С. Аналіз способів моделювання розподілених систем. *«ТАК» Телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології*: збірка доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, м. Покровськ (30 листопада 2018 р.). – Покровськ: ДВНЗ «ДонНТУ», 2018. С. 151 – 153.

21. Щебликіна О.В., Каменєв О.Ю., Лапко А.О. Автоматизація проектування об'єктів специфічного призначення. *Прикладні науково-технічні дослідження*: матеріали III міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ (3 – 5 квітня 2019 р.). – Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2019. С. 45.

22. Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Щебликіна О.В. Система тунельної ідентифікації небезпечних об'єктів. *Прикладні науково-технічні дослідження*: матеріали III міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ (3 – 5 квітня 2019 р.). – Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2019. С. 209.

23. Щеблыкина Е.В., Ушаков М.В. Повышение надежности эксплуатации эргатических систем управления путем применения технологии терминального доступа. *Проблемы безопасности на транспорте*: материалы IX международной научно-практической конференции, г. Гомель, Республика Беларусь (28 – 29 ноября 2019 г.). Часть 1. – Гомель: БелГУТ, 2019. С. 257 – 259.

24. Kameniev O., Lapko A., Shcheblykina E. Improvement of technologies for the development of modern rail automation systems. *Industry 4.0: Proceedings II International Scientific Conference, Borovets, Bulgaria (13–16 december 2017)*. – Sofia, Bulgaria: Scientific technical union of mechanical engineering “Industry-4.0”, 2017, Vol. 1/1. P. 107 – 110.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

25. Пат. на корисну модель 122882, Україна, МПК G01S 17/42 (2006.01) Канал вимірювання радіальної швидкості літальних апаратів з можливістю

розпізнавання літальних апаратів для мобільної однопунктної системи зовнішньо-траєкторних вимірювань. О.В.Коломійцев, І.І. Сачук, О.О. Зверев, О.П. Нарезній, В.О. Павлій, І.В.Помогаєв, А.А. Прилипко, Ю.П. Рондін, М.Л.Троцько, О.В. Щебликіна. Заявка u201709114 від 14.09.2017; опубл. 25.01.2018, бюл. № 2.

26. Пат. на корисну модель 122883, Україна, МПК G01S 17/42 (2006.01) Канал вимірювання кутових швидкостей літальних апаратів з можливістю розпізнавання літальних апаратів для мобільної однопунктної системи зовнішньотраєкторних вимірювань. О.В. Коломійцев, І.І. Сачук, О.О. Зверев, Д.В. Молчанов, О. П. Нарезній, В.О. Павлій, А. А. Прилипко, Ю. П. Рондін, М.Л.Троцько, О.В. Щебликіна. Заявка u201709115 від 14.09.2017; опубл. 25.01.2018, бюл. № 2.

27. Пат. на корисну модель 123393, Україна, МПК G01S 17/42 (2006.01) Канал автоматичного супроводження літальних апаратів за напрямком з можливістю розпізнавання літальних апаратів для мобільної однопунктної системи зовнішньо-траєкторних вимірювань. О.В. Коломійцев, І.І. Сачук, С.В. Герасимов, О.О. Зверев, Д.В. Молчанов, О. П. Нарезній, В.О. Павлій, Ю.П. Рондін, М.Л.Троцько, О.В. Щебликіна. Заявка u201709107 від 14.09.2017; опубл. 26.02.2018, бюл. № 4.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	23
ВСТУП	25
РОЗДІЛ 1 КОНТРОЛЬ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РУХОМ ПОЇЗДІВ У КОНТЕКСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ГОТОВНОСТІ	33
1.1 Стан діючих систем керування рухом поїздів та експлуатаційна надійність їх функціонування	33
1.2 Особливості впровадження сучасних систем керування рухом поїздів на залізницях України	47
1.3 Аналіз методів та моделей контролю функціональних параметрів систем керування рухом поїздів	56
1.4 Висновки за розділом	73
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛІ ОЦІНКИ ГЛИБИНИ КОНТРОЛЮ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ	75
2.1 Складові раціоналізації контролю функціональних параметрів	75
2.2 Умовна формалізація глибини контролю функціональних параметрів	84
2.3 Відхилення та адекватність моделі оцінки глибини контролю	96
2.4 Висновки до розділу	98
РОЗДІЛ 3 ГРАФО-ФУНКЦІОНАЛЬНІ МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ОЦІНКИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ГОТОВНОСТІ	100
3.1 Базова геометрична модель розподіленої системи керування рухом поїздів	100
3.2 Графо-функціональна модель розподіленої системи керування рухом поїздів	105
3.3 Метод опосередкованого відтворення графо-функціональних моделей	118
3.4 Процедура застосування модифікованого методу синтезу моделей для випробувань	128
3.5 Висновки за розділом	132

РОЗДІЛ 4 НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ГОТОВНОСТІ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РУХОМ ПОЇЗДІВ	133
4.1 Визначення закономірностей впливу глибини контролю на експлуатаційну готовність систем керування рухом поїздів	133
4.2 Синтез моделі для випробувань системи мікропроцесорної централізації	139
4.3 Результати випробувань системи мікропроцесорної централізації та їх оброблення	146
4.4 Висновки за розділом	154
ВИСНОВКИ	156
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	159
ДОДАТОК А Аналіз методів графоаналітичного моделювання технологічних об'єктів	182
ДОДАТОК Б Розв'язання системи лінійних рівнянь зв'язків між елементами тестового покриття систем керування рухом поїздів	187
ДОДАТОК В Таблиця перевірки адекватності моделі оцінки тестового покриття	196
ДОДАТОК Г Визначення ефективності графо-функціонального методу контролю функціональних параметрів систем керування рухом поїздів	202
ДОДАТОК Д Модель для випробувань автоматичної локомотивної сигналізації на контрольному пункті моторвагонного депо	215
ДОДАТОК Е Розрахунок економічної ефективності використання результатів дисертації на етапі експлуатації систем керування рухом поїздів	227
ДОДАТОК Ж Список публікацій здобувачки за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	233
ДОДАТОК І Матеріали впровадження результатів дисертаційної роботи	239

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АБ	–	автоматичне блокування;
АЗ	–	апаратне забезпечення;
АЛСН		автоматична локомотивна сигналізація неперервної дії;
АРМ	–	автоматизоване робоче місце;
АПС	–	автоматична переїзна сигналізація;
АСК ТП	–	автоматизовані системи керування технологічними процесами;
ДЦ	–	диспетчерська централізація;
ЕЦ	–	електрична централізація;
ЗА	–	залізнична автоматика;
ЗАТ	–	залізнична автоматика та телемеханіка;
ІАС ППР	–	інтелектуально-аналітичні системи підтримки прийняття рішень;
КП	–	контрольний пункт;
ЛМІ	–	людино-машинний інтерфейс;
МВРС	–	моторвагонний рухомий склад;
МКРД	–	мікропроцесорні контролери рейкового датчика;
МНАБ	–	мікропроцесорна система напівавтоматичного блокування;
МПЦ	–	мікропроцесорна централізація;
МПДК	–	мікропроцесорна система диспетчерського контролю;
МПДЦ	–	мікропроцесорна система диспетчерської централізації;
ММПС	–	метод модифікованих прямих сум;
МПС	–	метод прямих сум;
НАБ	–	напівавтоматичне блокування;
НДР	–	науково-дослідна робота;
НЛК	–	нижній лівий кут;
ОЕД	–	опорні елементарні дерева
ОКК	–	об'єкт керування та контролю;
ОСЖД	–	Організації співробітництва залізниць;
ПАЗ	–	програмно-апаратні засоби;

ПЗ	– програмне забезпечення;
ПМВ	– програма та методика випробувань;
ПТЕ	– правила технічної експлуатації;
ПТМ	– параметрично-топологічна матриця;
РЛСФБ	– розрахунково-логічної схеми функційної безпечності
РПЦ	– релейно-процесорна централізація;
РТД	– ремонтно-технологічний ділянка;
РШ	– релейна шафа;
САПР	– система автоматизованого проектування;
СКРП	– система керування та регулювання рухом поїздів;
СФТМ	– функціонально-топологічна матриця суміжності;
СЦБ	– сигналізація, централізація та блокування;
ТА	– технологічні алгоритми;
ТВ	– технічні вимоги;
ТЗ	– технічне завдання;
ТКД	– точковий колійний датчик;
ТО	– технічне обслуговування;
ТУ	– технічні умови;
ФАЛ	– функція алгебри логіки;
ФБ	– функційна безпечність;
ФТМ	– функціонально-топологічна матриця;
ЦШ	– департамент автоматики та телекомунікацій АТ «Укрзалізниця».

ВСТУП

Актуальність теми. Залізничний транспорт відіграє вирішальне значення у забезпеченні економічної стабільності, національної безпеки і оборони України. На нього припадає близько 82% вантажних та 50% пасажирських перевезень.

Ключове навантаження у забезпеченні безперебійності та убезпеченні залізничних перевезень покладається на системи керування рухом поїздів (СКРП). Саме від їх надійного функціонування залежить своєчасне виконання графіку руху поїздів, ефективність маневрової роботи та безаварійність транспортних процесів. У свою чергу це забезпечується, перш за все, достатнім рівнем експлуатаційної готовності систем, яка визначає ймовірність їх знаходження у справному стані в кожний момент часу протягом заданого інтервалу часу.

На даний час на магістральному залізничному транспорті України експлуатуються здебільшого морально і фізично застарілі релейно-контактні засоби СКРП, фізичний знос яких досягає 64%. Відповідно до звітної документації профільного департаменту автоматизації і телекомунікацій АТ «Укрзалізниця» станом на 2020 рік обсяг модернізації пристроїв СКРП із використанням сучасної елементної бази та гнучкої логіки функціонування не перевищує 3%. Не в останню чергу це пов'язано з недостатнім розвитком методології забезпечення належної готовності та безпеки використання таких систем і пристроїв, що пов'язано, серед іншого, з відносно невеликим досвідом їх впровадження в Україні.

Водночас спостерігається тенденція до зменшення експлуатаційної готовності релейно-контактних СКРП, що виявляється у збільшенні негативного впливу їх відмов на збільшення непродуктивного простою в русі поїздів через технічний чинник. Це вимагає інтенсифікації заходів із технічного переоснащення пристроїв СКРП на залізницях України із використанням технологій цифровізації, що передбачена Національною транспортною стратегією України до 2030 року.

Існуючі методичні підходи до забезпечення належної експлуатаційної готовності сучасних СКРП базуються, перш за все, на контролі їх функціональних параметрів на всіх етапах життєвого циклу. При цьому спостерігається недостатній

рівень їх результативності, що полягає в невисокій глибині контролю, що безпосередньо впливає на експлуатаційну готовність СКРП, а також рівень безпеки використання систем. Такий стан речей ставить під сумнів ефективність модернізації засобів СКРП з точки зору забезпечення ефективності та безпеки технологій залізничних перевезень.

Таким чином актуальною задачею постає необхідність вдосконалення існуючих підходів щодо контролю функціональних параметрів СКРП. Її вирішення на базі поліпшення методів, моделей та технічних засобів функціональних випробувань дозволить підвищити рівень експлуатаційної готовності СКРП, скоротити ймовірність непродуктивного простою руху поїздів після переоснащення основних технічних засобів транспортного призначення та прискорити виконання держаних заходів із розвитку і реформування залізничного транспорту в Україні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту в період 2016 – 2020 рр. відповідно до Національної транспортної стратегії України до 2030 року (розпорядження КМУ від 30.05.2018 р. № 430-р); Стратегічного плану розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року (наказ Міністерства інфраструктури України від 21.12.2015 р. № 547); планів науково-дослідних робіт Українського державного університету залізничного транспорту та Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за темами «Розроблення заходів із підвищення надійності та безпечності функціонування мікропроцесорних систем залізничної автоматики» (державний реєстраційний номер 0116U004891), «Проведення експертизи технічних рішень та методики розрахунку регулювальних таблиць тональних рейкових кіл» (державний реєстраційний номер 0118U004396), «Розроблення системи підтримки прийняття рішень з організації перетинань потоків різних видів транспорту» (державний реєстраційний номер 0115U000274), «Науково-практичний підхід підвищення безпеки дорожнього руху на залізничних переїздах» (державний реєстраційний номер 0115U003272), у виконанні яких авторка дисертації приймала безпосередню участь.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є вирішення науково-прикладного завдання з підвищення експлуатаційної готовності СКРП на основі контролю їх функціональних параметрів, що здійснюється шляхом вдосконалення методів і моделей функціональних випробувань.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені такі **основні завдання**:

- опрацювання статистичних даних щодо експлуатаційної надійності СКРП на залізничному транспорті України, аналіз її впливу на безперебійність руху поїздів для констатації поточного стану експлуатаційної готовності діючих СКРП;
- прогнозування впливу основних чинників на експлуатаційну надійність діючих пристроїв СКРП до 2030 року з метою визначення рівня критичності щодо необхідності їх комплексної модернізації;
- аналіз відомих методів, моделей та засобів контролю функціональних параметрів СКРП, спрямованих на підвищення їх експлуатаційної готовності, визначення серед них таких, що беруться за основу для подальшого вдосконалення;
- опрацювання відомих графоаналітичних методів моделювання технологічних об'єктів СКРП, що можуть використовуватися при контролі їх функціональних параметрів, та визначення на їх основі таких, що беруться за основу підвищення експлуатаційної готовності СКРП;
- розроблення моделі оцінки глибини контролю СКРП на розподілених технологічних об'єктах для оцінки показників експлуатаційної готовності СКРП та ефективності контролю їх функціональних параметрів;
- розроблення підходів до побудови графо-функціональної моделі технологічних об'єктів СКРП довільного призначення з метою верифікації їх статичних і динамічних параметрів під час функціональних випробувань, спрямованих на підвищення експлуатаційної готовності СКРП;
- розроблення методу аналітичної інтерпретації графо-функціональних моделей технологічних об'єктів СКРП для можливості їх оброблення засобами комп'ютерної техніки при формуванні засобів контролю функціональних параметрів СКРП;
- удосконалення методу синтезу моделей для функціональних випробувань СКРП на базі вихідного блочно-діагонального розділення функціонально-

топологічних матриць, реалізованих на базі матриць суміжності, які інтерпретують графо-функціональні моделі систем;

– оцінка ефективності використання розробленого методу синтезу моделей для випробувань СКРП за ресурсними критеріями та критерієм збільшення глибини контролю;

– визначення впливу результатів вдосконалення методів та моделей контролю функціональних параметрів на експлуатаційну готовність СКРП та безперебійність дотримання графіку руху поїздів;

– дослідження результатів практичного використання методів та моделей контролю функціональних параметрів СКРП у процесі їх виробництва та експлуатації в контексті забезпечення належної експлуатаційної готовності систем керування рухом поїздів.

Об'єкт дослідження – процес забезпечення експлуатаційної готовності СКРП.

Предмет дослідження – показники експлуатаційної готовності СКРП, що досягаються шляхом контролю їх функціональних параметрів в процесі виробництва, експлуатації та ремонту.

Методи дослідження. Вирішення поставлених завдань виконано на основі системного підходу. Методи математичної статистики використано при опрацюванні експлуатаційної надійності систем залізничної автоматики різного призначення та при обробленні результатів випробувань. Апарат теорії графів та матриць застосовано при розробленні графо-функціональних моделей об'єктів функціональних випробувань. Методи теорії надійності та функційної безпечності застосовані при обґрунтуванні різних способів випробувань при забезпеченні експлуатаційної готовності систем керування. Методи імітаційного та фізичного моделювання використано при синтезі засобів випробувань та при доказі адекватності моделей випробувань. Теорію дискретних автоматів застосовано при формуванні моделей для випробувань різного призначення.

Наукова новизна одержаних результатів. Вирішено науково-прикладне завдання з підвищення їх експлуатаційної готовності СКРП на основі контролю функціональних параметрів, що здійснюється шляхом вдосконалення методів і моделей функціональних випробувань у процесі виробництва, експлуатації, технічного обслуговування та ремонту.

Вперше отримано, розроблено і запропоновано:

– методичний підхід до визначення експлуатаційної готовності СКРП, що базується на використанні моделі оцінки глибини контролю при здійсненні їх функціональних випробувань, яка будується на бієктивних відношеннях між об'єктами керування та контролю, їх функціями, програмно-апаратними засобами та технологічними ситуаціями;

– спосіб відтворення технологічних об'єктів у засобах контролю функціональних параметрів СКРП на основі графо-функціональних моделей, що враховують як статичні, так і динамічні властивості об'єктів керування та контролю із використанням функціональних вершин;

– метод аналітичної інтерпретації технологічних об'єктів СКРП, що забезпечує відтворення їх статичних і динамічних властивостей у процесі контролю функціональних параметрів та базується на представленні графо-функціональних моделей функціонально-топологічними матрицями, формування яких здійснюється на основі матриць суміжності з діагональним відтворенням наповнення функціональних вершин;

– закономірності, які встановлюють зв'язок між глибиною контролю функціональних параметрів СКРП, масштабністю і складністю технологічних об'єктів СКРП та їх експлуатаційною готовністю;

Удосконалено:

– метод блочно-діагонального синтезу моделей для функціональних випробувань СКРП, який, на відміну від існуючого, базується на використанні вихідних блоків функціонально-топологічних матриць суміжності замість параметрично-топологічних матриць інцидентності;

– спосіб оцінки ефективності заходів із забезпечення експлуатаційної готовності СКРП за результатами функціональних випробувань, який базується на встановленому законі розподілу помилок програмного забезпечення;

Набули подальшого розвитку:

– підходи до оцінювання безпеки використання ергатичних СКРП, які враховують багатозначність допоміжних технологічних режимів функціонування

системи та її інтерактивний характер взаємодії з експлуатаційним, технічним й інспекційним персоналом;

– результати прогнозування впливу людського й технічного чинників на експлуатаційну надійність пристроїв і СКРП.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційного дослідження мають прикладний характер та спрямовані на підвищення показників експлуатаційної готовності, а також на зменшення ресурсоемності та підвищення ефективності контролю функціональних параметрів СКРП. Фактичне застосування результатів дисертації відбувається під час виробництва та експлуатації мікропроцесорних СКРП на об'єктах транспортної інфраструктури регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця», ПАТ «МК «Запоріжсталь», ТОВ «Вуглепромтранс», ТОВ «Хартрон-Енерго» та в освітньому процесі Українського державного університету залізничного транспорту. Крім того, результати дисертації мають перспективи подальшого розвитку щодо застосування в технологіях експлуатації інших видів транспорту – автомобільного, авіаційного, морського і річкового.

Практична цінність результатів дисертації полягає в:

– можливості відтворення в процесі формування моделей для випробувань не тільки статичних, але й динамічних характеристик об'єктів випробувань у файлах конфігурації, що виключає необхідність використання праці професійних програмістів навіть при нарощуванні функціональних властивостей об'єктів випробувань;

– підвищенні коефіцієнту експлуатаційної готовності СКРП у процесі контролю функціональних параметрів за розробленими методами до 18%;

– підвищенні інтенсивності відновлення СКРП у процесі контролю функціональних параметрів за розробленими методами до 6-ти разів;

– збільшенні глибини контролю при проведенні випробувань із використанням моделей, синтезованих за розробленими методами, до 2-х разів;

– зменшенні обсягу програмної інформації, тривалості процесу та кількості прогнозованих помилок під час синтезу моделей для випробувань;

- універсальності розроблених методів і моделей для СКРП довільного призначення (станційних, перегінних, бортових тощо);
- скороченні простою у графіку руху поїздів у результаті контролю функціональних параметрів СКРП до 16%.

Прогнозований річний економічний ефект від впровадження результатів дисертації складає 330,75 тис. грн. при запланованих обсягах модернізації СКРП.

Особистий внесок здобувачки. Усі положення і результати, які виносяться на захист, отримані авторкою самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертантці належать: способи реалізації аналітичного та програмно-апаратного забезпечення контрольного пункту автоматичної локомотивної сигналізації [1, 2]; моделі технологічних об'єктів та підходи щодо їх застосування при контролі функціональних параметрів СКРП [3 – 5, 11, 18]; прогнозні моделі впливу людського і технічного чинників на експлуатаційну надійність СКРП [6]; обґрунтування та формалізація впливу інтерактивної взаємодії різного роду персоналу на безпеку використання ергатичних СКРП [7, 10, 12, 17]; модель оцінки глибини контролю функціональних параметрів СКРП, взаємозалежність показників готовності й відновлення та ефективності контролю функціональних параметрів СКРП [8]; методи та процедури випробувань мікропроцесорних СКРП [9, 13, 16, 19, 24]; опрацювання та систематизація результатів імітаційного моделювання мікропроцесорної централізації стрілок та сигналів [14]; методи контролю функціональних параметрів мікропроцесорних систем автоматичної переїзної сигналізації [15]; графоаналітичні способи моделювання розподілених СКРП [20]; спосіб автоматизованого проектування моделей для випробувань СКРП, базований на графо-функціональному моделюванні [21]; графоаналітичний метод ідентифікації та диференціації об'єктів контролю [22]; способи контролю функціональних параметрів СКРП в умовах термінального доступу оперативного і технічного персоналу [23]; програмно-реалізовані способи визначення координат рухомих об'єктів при контролі їх кінематичних параметрів [25 – 27].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на таких наукових конференціях:

- IX міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми безпеки на транспорті» (м. Гомель, Республіка Білорусь, 2019 р.);
- III міжнародній науково-практичній конференції «Прикладні науково-технічні дослідження» (м. Івано-Франківськ, Україна, 2019 р.);
- всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених «ТАК: Телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології» (м. Покровськ, Україна, 2018 р.);
- 29-й, 30-й, 31-й міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (м. Чорноморськ, Україна, 2016 р.; м. Одеса, Україна, 2017 р.; м. Харків, Україна, 2018 р.);
- X ювілейній міжнародній науково-практичній конференції «Free and open source software» (м. Харків, Україна, 2018 р.);
- VI міжнародній науково-практичній конференції «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті» (м. Чернівці, Україна, 2018 р.);
- II міжнародній науковій конференції «Industry-4.0» (сел. Боровець, Болгарія, 2017 р.).

Повністю дисертація доповідалася, обговорювалася і була схвалена на засіданні кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів та на фаховому семінарі кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту за участю рецензентів.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 27 наукових праць, в т.ч. 8 наукових статей у фахових виданнях, затверджених МОН України, з яких 1 включена до міжнародної наукометричної бази; 1 наукова стаття в іноземному виданні країни – члена ЄС; три додаткові праці (патенти на корисну модель); 15 праць апробаційного характеру (матеріали доповідей на наукових конференціях).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота оформлена на 244 сторінках, з яких 128 сторінок основного тексту, 47 рисунків, 8 таблиць, список джерел із 201 назви на 23 сторінках і 8 додатків на 63 сторінках.

РОЗДІЛ 1

КОНТРОЛЬ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РУХОМ ПОЇЗДІВ У КОНТЕКСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ГОТОВНОСТІ

Запровадження в експлуатацію сучасних систем керування рухом поїздів вимагає контролю їх функціональних параметрів на всіх етапах до експлуатаційного життєвого циклу. Це пов'язано як з факторами безпеки їх використання, так і забезпеченням належної експлуатаційної готовності та виконання заданих показників призначення. Розділ присвячено аналізу тенденцій розвитку сучасних систем керування руху поїздів, методів та підходів щодо контролю їх функціональних параметрів. На підставі аналізу формуються шляхи вирішення завдань, пов'язаних із підвищенням експлуатаційної готовності систем керування з огляду на ефективність виконаного контролю.

1.1 Стан діючих систем керування рухом поїздів та експлуатаційна надійність їх функціонування

Відповідно до Національної транспортної стратегії України на період до 2030 р., яка була прийнята у травні 2018 р., передбачено подальше використання високотехнологічних та ергономічних засобів транспорту, принципів мультимодальності, супутникової навігації, інтелектуальних транспортних систем, інформаційних технологій, електронного документообігу, прискорення і забезпечення своєчасної доставки пасажирів та вантажів завдяки швидкісним видам транспорту та розвитку логістики, підвищення рівня екологічної безпеки, інвестиційної та іншої привабливості всіх видів транспорту [28].

Одними з ключових очікуваних результатів із реалізації зазначеної Транспортної стратегії в контексті засвоєння передових досягнень світового науково-технічного прогресу є [28]:

– створення модернізованої високотехнологічної транспортної інфраструктури, включаючи розбудову мережі логістичних систем інноваційного

типу для обслуговування пасажирів та обробки вантажів, формування інтелектуальних транспортних систем;

– впровадження інтелектуальних транспортних систем та систем управління рухом на наземному та водному транспорті (ERTMS, ITS, SST та LRIT, RIS, СМАРТ-тахографи);

– забезпечення створення умов для впровадження на залізницях високошвидкісного пасажирського руху (до 400 кілометрів на годину), експрес-доставки цінних вантажів (до 350 кілометрів на годину), прискореної доставки контейнерів (не менш як 200 кілометрів на годину).

Реалізація зазначених підходів та досягнення очікуваних результатів становить найбільш актуальну задачу саме для залізничного транспорту України, є провідною галуззю в дорожньо-транспортному комплексі країни, який забезпечує майже 82% вантажних і 50% пасажирських перевезень, здійснюваних всіма видами транспорту. Експлуатаційна мережа залізниць України складає майже 19,8 тис. км (без урахування окупованих територій, мережа яких на сьогодні не експлуатується), з яких понад 47,2% електрифіковано. За обсягами вантажних перевезень залізниці України займають четверте місце на Євразійському континенті, поступаючись лише залізницям Китаю, Росії та Індії. Вантажонапруженість українських залізниць (річний обсяг перевезень на 1 км) у 3 – 5 разів перевищує відповідний показник розвинених європейських країн [29, 30].

Досягнення результатів Транспортної стратегії для залізничного транспорту можливо лише в умовах комплексного переоснащення систем керування рухом поїздів (СКРП), що інтерпретуються технічними засобами залізничної автоматики. Ключовим напрямом їх розвитку слід вважати подальшу інтеграцію та уніфікацію на базі сучасних систем промислової цифровізації [31 – 35].

Виходячи з діючих національних документів із розвитку залізничного транспорту, зокрема – Транспортної стратегії [28], галузевих програм і концепцій [13, 36 – 42], узагальнена структура напрямків розвитку залізничного транспорту, із урахуванням засобів СКРП, представляється у вигляді рисунка 1.1.



Рисунок 1.1 – Основні напрямки розвитку залізничного транспорту України

Як вбачається з наведеної структури, важливими піднапрямами модернізації засобів СКРП є підвищення обсягів цифровізації систем, диверсифікація розробників систем для транспортних потреб, зменшення людського фактору впливу на процес перевезень та удосконалення техніки й технологій для розроблення, експлуатації та обслуговування відповідних систем.

Наявна класифікація технічних засобів СКРП за функціональним призначенням (рисунок 1.2) визначає диференціацію принципів і підходів щодо реалізації наведених у зазначеній структурі (рисунок 1.1) заходів щодо технічного й технологічного розвитку СКРП [13, 43].

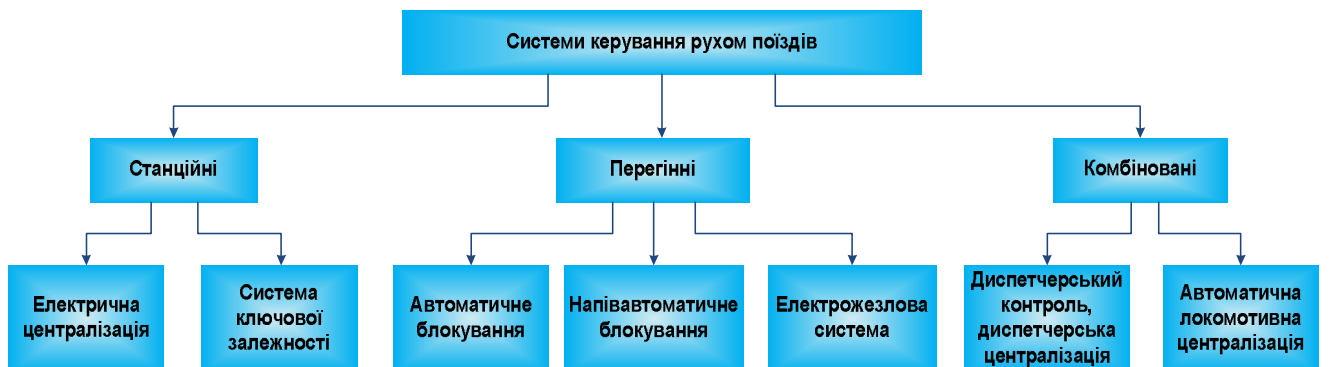


Рисунок 1.2 – Узагальнена класифікація СКРП за функціональними ознаками

Зазначені показники функціонального призначення технічних засобів СКРП залежать від підгалузі їх використання (магістральний, промисловий залізничний транспорт, метрополітен) та встановлюються, головним чином, відповідними нормативно-технічними документами – Правилами технічної експлуатації, Інструкціями з сигналізації, Інструкціями з руху поїздів і маневрової роботи, погодженими з ними типовими проектними рішеннями [43 – 51].

Місцеві умови експлуатації, технічного обслуговування та ремонту засобів СКРП визначаються додатковими нормативними документами, зокрема регламентами та інструкціями виробників продукції [52 – 56].

Сучасний стан технічних засобів СКРП, технічної діагностики та телекомунікацій, що наразі знаходяться в експлуатації на магістральному залізничному транспорті України, визначається значним ступенем зношеності основних фондів (рисунок 1.3) [57 – 59].

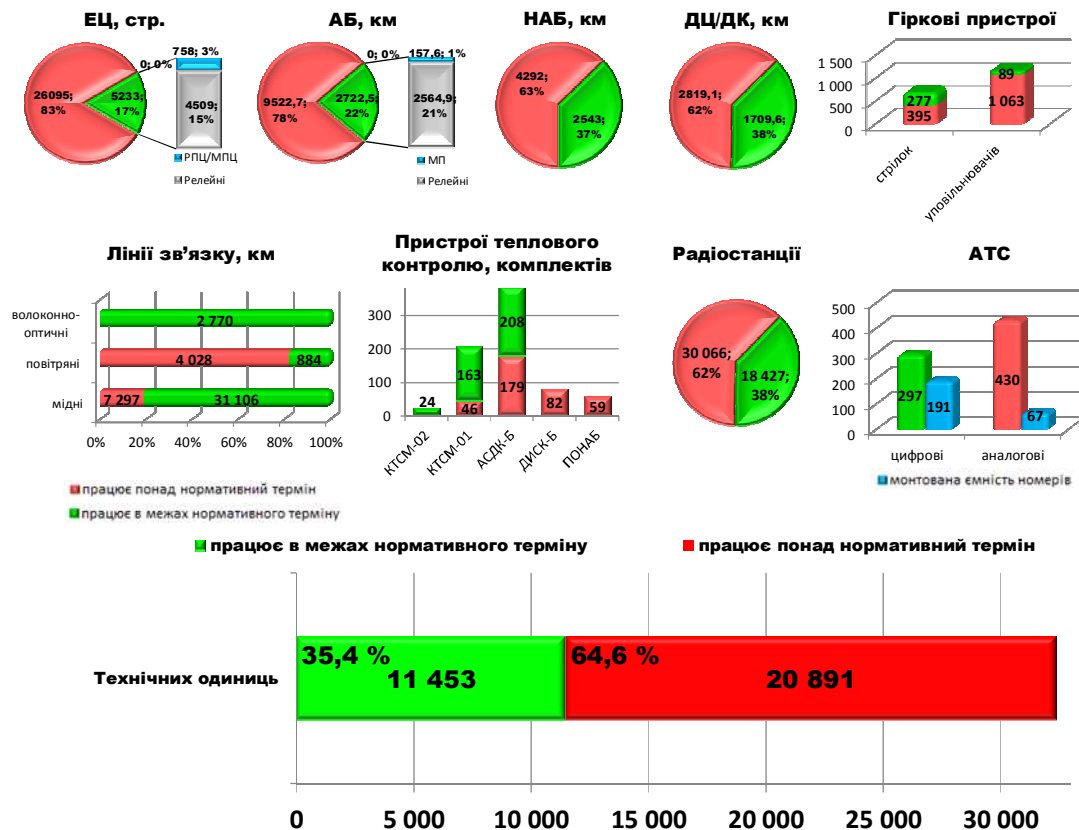


Рисунок 1.3 – Показники фізичного зносу технічних засобів автоматики, діагностики та телекомунікацій на магістральному залізничному транспорті

Як вбачається з наведених діаграм, для різних пристроїв СКРП за функціональним призначенням (рисунок 1.3) поточний їх фізичний знос складає від 62% до 83%, причому часткової модернізації шляхом запровадження сучасних систем, побудованих на мікропроцесорній елементній базі, зазнали лише пристрої електричної централізації (ЕЦ) та автоматичного блокування (АБ). Проте обсяги впровадження сучасних систем ЕЦ і АБ при значному фізичному зносі основних фондів на сьогоднішній день залишаються край низькими – 3% і 1% відповідно.

У нормативних вимірюваннях кількості СКРП у технічних одиницях [60, 61] відповідний обсяг засобів, що функціонують у понаднормативний термін, складає більше 64%.

Узагальнені значення фізичного зносу пристроїв СКРП за різним функціональним призначенням (з урахуванням її підвидів) наведені в таблиці 1.1 [57].

Таблиця 1.1 – Зведені показники фізичного зносу пристроїв СКРП на магістральному залізничному транспорті України

Система, вимірювач	Працює в межах нормативного терміну		Працює понад нормативний термін	
	кількість	%	кількість	%
Електрична централізація, стрілки	5233	17	26095	83
Автоблокування, км	2722,5	22	9522,7	78
Напівавтоматичне блокування, км	2543	37	4292	63
Диспетчерська централізація, км	1709,6	38	2819,1	62
Гіркові пристрої, стрілки	277	41	395	59
Гіркові пристрої, уповільнювачі	89	8	1063	92
Загалом, технічні одиниці	11453	35,4	20891	64,6

В таких умовах спостерігається доволі низький рівень експлуатаційної надійності функціонування пристроїв СКРП на залізницях України, зокрема експлуатаційної готовності, як невід’ємної її складової (рисунок 1.4). Остання визначається, як здатність системи функціонувати належним чином у даний момент часу протягом заданого інтервалу часу [57 – 64].

Як видно з наведених діаграм, обсяг відмов окремих компонентів елементної бази технічних засобів залізничної автоматики може досягати майже 50% у процесі експлуатації. Діаграми на рисунку 1.4 враховують елементну базу релейно-контактних пристроїв СКРП.



Рисунок 1.4 – Обсяг виявленого браку основної елементної бази діючих пристроїв залізничної автоматики

Найбільш поширеними технічними засобами, реалізованих на мікроелектронній елементній базі, є автоматизовані системи діагностичного контролю нагрівання букс (АСДК-Б) рухомого складу, для яких найбільш поширеними відмовами є пошкодження оптичних камер, що не є мікроелектронними пристроями (рисунок 1.5).

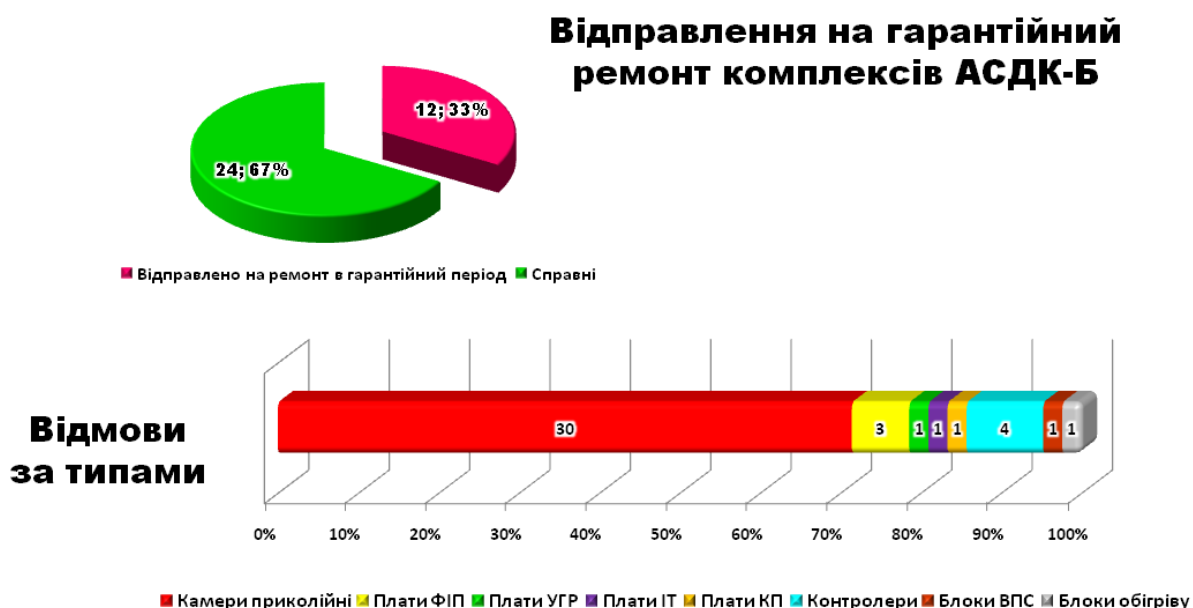


Рисунок 1.5 – Статистика відмов мікроелектронних діагностичних комплексів

У той же час внесок у загальні відмови мікроелектронних компонентів (плат, контролерів) та додаткових елементів складає менше 30%, що свідчить на користь використання саме мікроелектронної елементної бази в аспекті експлуатаційної надійності залізничної техніки.

Зведені дані щодо статистики відмов пристроїв СКРП, опрацьовані протягом 2010 – 2019 рр. у науковій праці [57] та звітній документації [62], що викликані через фактори, пов'язані із функціонуванням господарства автоматики і телекомунікацій АТ «Укрзалізниця» (служби Ш), наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Зведені статистичні дані щодо відмов пристроїв залізничної автоматики протягом 2010 – 2019 років

Роки	Кількість відмов пристроїв ЗА	Відмови пристроїв СКРП, що віднесені за службою Ш:						
		кількість	%	з експлуатаційних причин		які викликали затримку поїздів		кількість затримок поїздів
				кількість	%	кількість	%	
2010	6016	1432	23,8	1262	88,13	324	22,63	905
2011	4837	1515	31,3	1337	88,25	298	19,67	863
2012	4963	1552	31,3	1322	85,18	397	25,58	902
2013	4144	1467	35,4	1197	81,6	409	27,88	884
2014	4890	1196	24,5	968	80,94	302	25,25	720
2015	4832	1299	26,9	1011	77,83	431	33,18	1038
2016	4296	1241	28,9	969	78,08	472	38,03	1123
2017	5310	1330	25,1	1135	85,34	674	50,68	1656
2018	4954	1261	25,5	1065	84,46	664	62,34	1584
2019	4155	1193	28,7	1005	84,2	522	43,76	1669
Коефіцієнт кореляції між відмовами СКРП та затримками поїздів								0,91

Зазначений у таблиці 1.2 вплив експлуатаційної надійності СКРП на експлуатаційні показники роботи залізниць України наочно демонструється діаграмою на рисунку 1.6.

Наведений у таблиці 1.2 коефіцієнт кореляції між кількістю відмов B_i пристроїв СКРП та затримок руху поїздів Z_i , визначений на рівні $\tilde{r}_{BZ} = 0,91$ відповідно до методики, що опублікована в праці [39] із використанням прикладного пакета MS Excel

$$\tilde{r}_{B3} = \frac{\left[\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (B_i \times Z_i - \tilde{m}_B \times \tilde{m}_Z) \right] \times \frac{n}{n-1}}{\sqrt{\tilde{D}_B \times \tilde{D}_Z}},$$

де \tilde{D} , \tilde{m} з відповідними індексами (B – відмови, Z – затримки) – дисперсія та математичне сподівання випадкових величин;

n – кількість реалізацій відповідних випадкових величин.

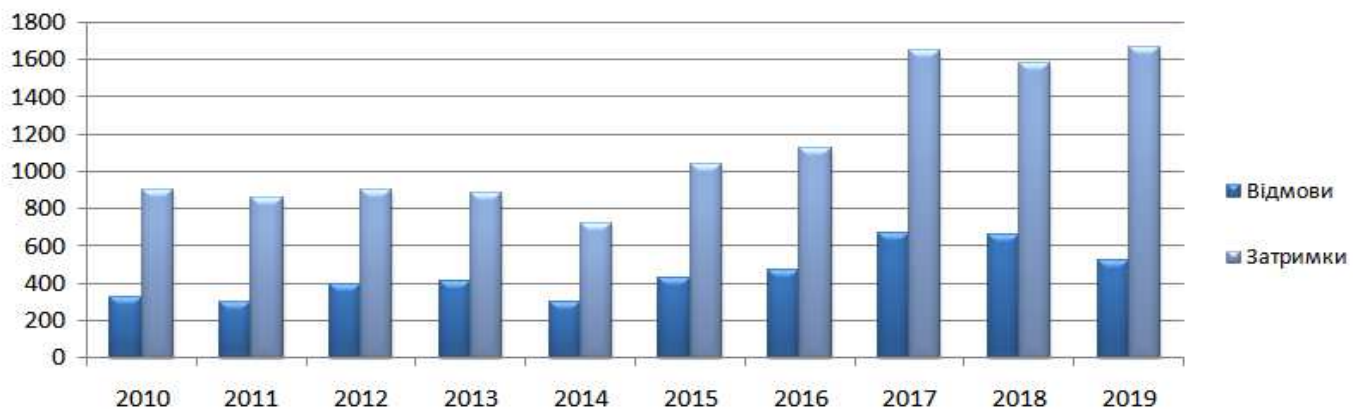


Рисунок 1.6 – Діаграма відповідності кількості відмов і затримок руху поїздів на залізницях України по рокам

Такий доволі значний коефіцієнт кореляції свідчить про глибокий причинно-наслідковий зв'язок між відмовами засобів СКРП та безперервністю процесів перевезень. Це вказує на ключове значення високої експлуатаційної готовності СКРП на експлуатаційні показники роботи залізниць.

Із наведених табличних даних випливає тенденція до зниження експлуатаційної готовності СКРП, що виявляється у збільшенні кількості затримок руху поїздів через відмови пристроїв залізничної автоматики, не дивлячись на фактичні зменшення обсягів перевезень. Об'єктивно це свідчить про збільшення негативного впливу фактичного зносу технічних засобів на експлуатаційні показники діяльності залізниць [65].

Результати проведеного в роботах [57, 66] статистичного аналізу відмов пристроїв СРРП за причинами наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Статистика відмов пристроїв СКРП за причинами

Причини відмов		Роки										Середнє значення
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
Невиконання робіт	кількість	1	0	0	0	1	0	0	2	1	5	1
	%	0,07	0	0	0	0,08	0	0	0,27	0,08	0,42	0,07
Порушення технології виконання робіт	кількість	825	901	829	742	584	601	321	365	541	391	610
	%	57,6	59,5	53,4	50,6	48,8	46,3	47,7	49,7	42,9	32,77	45,2
Порушення термінів заміни	кількість	1	0	1	3	0	1	2	0	1	14	2,3
	%	0,07	0	0,06	0,2	0	0,08	0,3	0	0,08	1,17	0,17
Помилки РТД	кількість	46	49	73	80	57	50	30	20	33	54	49,2
	%	3,21	3,2	4,7	5,45	4,77	3,85	4,46	2,72	2,62	4,53	3,65
Фізичне старіння приладів	кількість	278	277	285	274	242	263	170	209	399	426	282,3
	%	19,4	18,5	18,4	18,7	20,2	20,3	25,3	28,5	31,64	35,71	20,92
Схемний недолік	кількість	6	5	22	16	13	4	2	5	6	4	8,30
	%	0,4	0,3	1,42	1,09	1,09	0,31	0,3	0,68	0,48	0,34	0,62
Невідомі експлуатаційні причини	кількість	105	105	112	83	71	92	36	62	84	111	86,1
	%	7,3	6,93	7,22	5,66	5,94	7,08	5,35	8,45	6,66	9,3	6,38
Інші причини	кількість	170	178	230	269	228	288	112	69	1196	188	292,8
	%	11,8	11,8	14,8	18,3	19,1	22,2	16,6	940	15,54	15,76	21,7

Як вбачається з наведених даних, ключовими причинами відмов пристроїв СКРП є порушення технології виконання робіт з технічного обслуговування (52,38%) та фізичне старіння приладів (20,25%).

Не дивлячись на те, що фізичний знос пристроїв СКРП знаходиться на другому місці серед причин їх відмов (що, однак, саме по собі є наочним показником), спостерігається тенденція до поступового вирівнювання впливу зазначених перших двох причин – зменшення впливу людського чинника та збільшення впливу чинника технічного (рисунок 1.7) [6].

Така тенденція цілком узгоджується із зоною відставання у розвитку техніки та інтелектуально-технічних можливостей людини, що була опрацьована в роботах [66 – 69]. Вона пояснюється прискореним розвитком та розширенням можливостей сучасної техніки і технологій.



Рисунок 1.7 – Графіки зміни впливу двох основних факторів на експлуатаційну надійність пристроїв СКРП

Схематично зона відставання зображується на рисунку 1.8 у вигляді графіків розвитку можливостей людини та розвитку техніки [56, 68, 69].

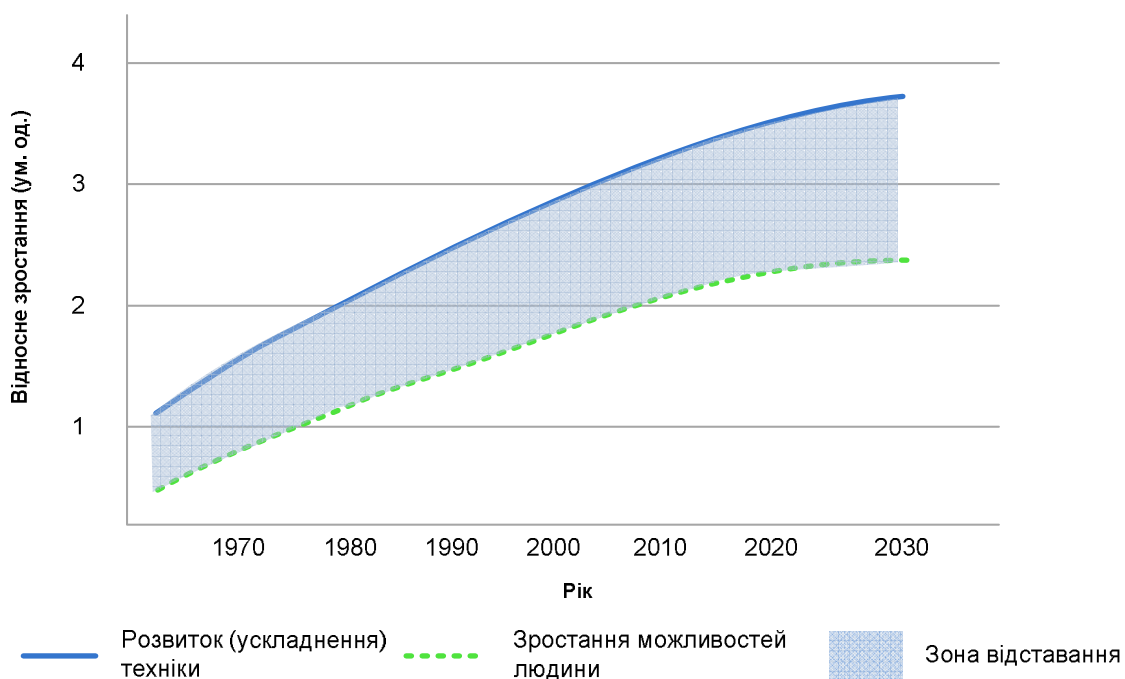


Рисунок 1.8 – Співвідношення розвитку техніки та можливостей людини

Не зважаючи на тенденції в світовому техніко-технологічному прогресі щодо зменшення впливу технічного чинника на користь людського в аспекті експлуатаційної надійності технічних засобів СКРП, що експлуатуються на залізницях України, наразі не спостерігається масової модернізації технічних засобів при збереженні тенденції до підвищення можливостей технічного персоналу, що і підтверджується зіставленням графіків на рисунках 1.7 та 1.8. Отже, за відсутності подальшої комплексної модернізації пристроїв залізничної автоматики очевидним стає поступове зрівняння впливу людського і технічного чинників з подальшим перевищенням впливу другого порівняно із першим.

Для прогнозування подальшого впливу зазначених двох чинників при збереженні наведеної на рисунку 1.8 тенденції, зокрема, з метою встановлення періоду, коли вплив людини і техніки зрівняється, доцільно скористатися методами екстраполяції наявних у таблиці 1.3 статистичних даних.

Екстраполяція – метод наукового пізнання, за якого відбувається поширення висновків, показників, тенденцій та закономірностей одних явищ процесів, а також стадій та етапів цілісної економічної системи на інші майбутні очікувані явища і процеси, на більш розвинуті стадії та етапи цієї системи на основі обґрунтованих та чинних законів і їх внутрішніх суперечностей. У математиці й статистиці екстраполяція означає продовження динамічного ряду даних за певними формулами, продовження кривої, що характеризувала попередні зміни технічних або економічних показників. Екстраполяція застосовується для аналізу та прогнозу розвитку окремих елементів технологічної системи, її підсистем, технічних тенденцій загалом за умови їх стабільного розвитку. Надійнішою є екстраполяція щодо розвитку технологічного способу виробництва (продуктивних сил і техніко-економічних відносин), а в його межах – щодо перспектив розвитку техніки і технології. [70, 71].

Ефективними методами екстраполяції для прогнозування подій на середньостроковий період є методи регресії, використання яких підтримуються багатьма прикладними математичними та офісними програмними середовищами, зокрема, середовищем MS Excel [72].

Для цього виконано квадратичну апроксимацію наданих статистичних даних із експлуатаційної надійності пристроїв СКРП використанням методу найменших квадратів.

У результаті зазначеного прогнозу до 2030 року з використанням прикладного пакету MS Excel отримані прогнозовані значення причин відмов пристроїв СКРП за двома факторами (рисунок 1.9) [6].

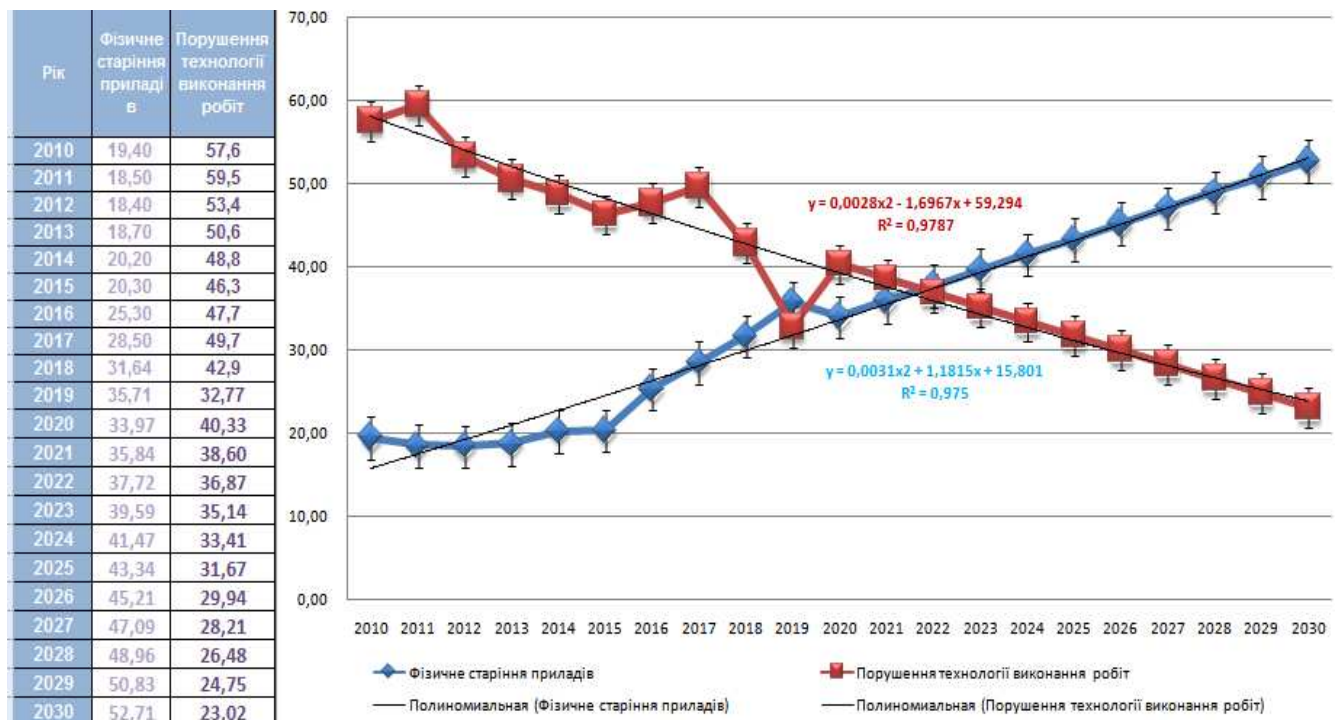


Рисунок 1.9 – Прогноз впливу людського і технічного чинників на експлуатаційну надійність пристроїв СКРП до 2030 року

Прогнозування статистики відмов до 2030 року обумовлено державними планами розвитку, що зазначені в Транспортній стратегії України [28].

Точність апроксимації визначено на підставі розрахунку коефіцієнту детермінації R^2 . З результатів його розрахунку (рисунок 1.9) випливає, що для обох графіків (впливу людського і технічного чинника) цей параметр перевищує значення 0,95, що свідчить про високу точність прогнозу.

Для покрокової оцінки точності прогнозу виконане згладжування статистичних даних за методом ковзного середнього.

При використанні методу застосовується просте ковзне середнє, яке обчислюється для групи значень проценту відмов (по ряду суміжних років) як їх середнє арифметичне значення

$$m_t = \frac{1}{n} \sum_{t=i}^n w_t, \quad (1.1)$$

де m_t – ковзне середнє за проміжок часу $t \in [i, i+n]$;

n – кількість значень проценту відмов у послідовності (часовому ряді);

w_t – значення проценту відмов у поточному році t .

З урахуванням формули (1.1) прогнозоване значення проценту відмов пристроїв на кожний наступний рік $t+1$ (за умови наявної або обчисленої визначеності цього значення за попередній рік t) розраховується по формулі

$$w_{t+1} = \frac{1}{n} \sum_{t=0}^{n-1} w_{t-1} + \frac{1}{3} (w_t - w_{t-1}) = m_{t-1} + \frac{1}{3} (w_t - w_{t-1}). \quad (1.2)$$

Шляхом поєднання виразів (1.1) і (1.2) знаходиться узагальнена формула для прогнозування проценту відмов пристроїв СКРП на поточний період

$$w_{t+m} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n+p} w_{t-p} + \frac{1}{p+2} (-1) \sum_{t=p+1}^{r+p+n} w_t = m_{t-p} + m_t, \quad (1.3)$$

де p – кількість дискретних прогнозованих значень відмов пристроїв на майбутні періоди (роки).

Узагальнюючи вирази (1.2) і (1.3) на загальний випадок, з урахуванням досліджень [72] для звичайного ковзного середнього (достатність якого обґрунтовується високими значеннями коефіцієнту детермінації), та використовуючи прикладний програмний пакет MS Excel, виконано розрахунок згладжених даних та відповідних їм відхилень.

Як видно з наведених даних, середньоквадратичне відхилення становить прийнятні значення, що додатково підтверджує достатню точність виконаного прогнозу (рисунок 1.10) [6].

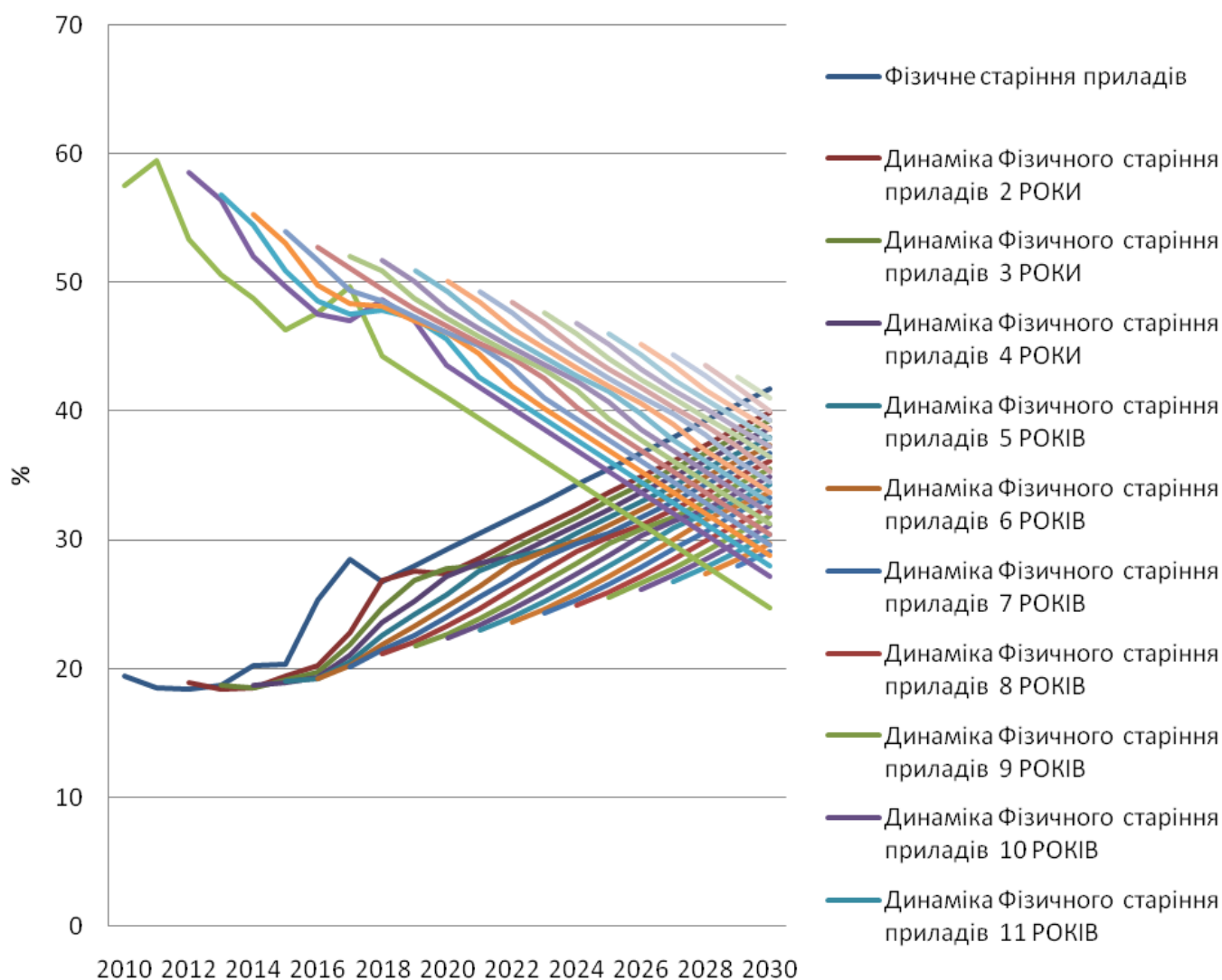


Рисунок 1.10 – Результати згладжування вихідних та прогнозованих даних щодо експлуатаційної надійності застарілих СКРП

Відповідно до нього із графіків на рисунках 1.9, 1.10 випливає, що вже в 2024 році вплив людського і технічного чинників на експлуатаційну надійність ймовірно зрівняються. Після цього почнеться поступове перевищення першого над другим. Така тенденція додатково свідчить про необхідність термінового

вжиття заходів щодо комплексної модернізації застарілої техніки із використанням сучасних прогресивних технологій.

1.2 Особливості впровадження сучасних систем керування рухом поїздів на залізницях України

Впровадження мікроелектронних систем залізничної автоматики на світових залізницях розпочато з 70-х років минулого століття, головним чином – у контексті мікропроцесорних (МПЦ) або релейно-процесорних (РПЦ) систем ЕЦ. Пріоритетність вибору саме систем ЕЦ порівняно з іншими засобами СКРП пояснюється тим, що переважну кількість пристроїв СКРП на залізницях України (за технічною оснащеністю) становлять системи електричної централізації стрілок та сигналів (ЕЦ), відповідно до чого основний внесок у процес модернізації СКРП має припадати на станційні системи автоматики (рисунок 1.11) [56, 69, 95 – 97].

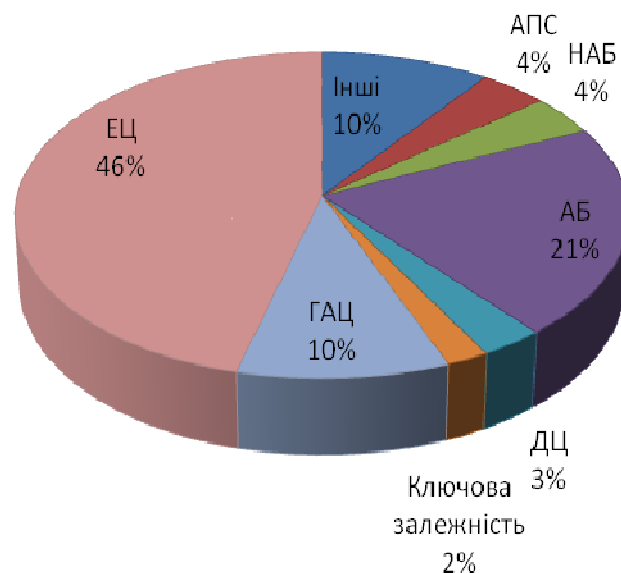


Рисунок 1.11 – Внесок пристроїв СКРП в загальну технічну оснащеність

Найбільша інтенсивність запровадження СКРП новітніх поколінь відбувалася в США, Німеччині, Японії, Великій Британії, Швеції та Австрії [73 – 81]. Наразі

спостерігається тенденція щодо першочергової прогресивної модернізації зазначених систем у даних країнах із використанням передових методів та засобів цифровізації [82 – 93].

В Україні процес запровадження мікропроцесорних СКРП розпочався в середині 90-х із реалізації систем РПЦ на промисловому залізничному транспорті [53, 69, 94 – 97]. У подальшому розвиток СКРП на промисловому транспорті визначався переважно впровадженням систем МПЦ, мікропроцесорних систем диспетчерського контролю (МПДК), диспетчерської централізації (МПДЦ) та напівавтоматичного блокування (МНАБ) [95, 98 – 103].

Відповідно до планів профільного департаменту автоматики і телекомунікацій (ЦШ) АТ «Укрзалізниця» у модернізацію діючих пристроїв СКРП, у тому числі, їх переоснащення на мікроелектронній елементній базі, на період з 2019 по 2025 роки передбачені цільові інвестиції сумарних обсягом 18 124 млн. грн. (рисунок 1.12) [58, 59].

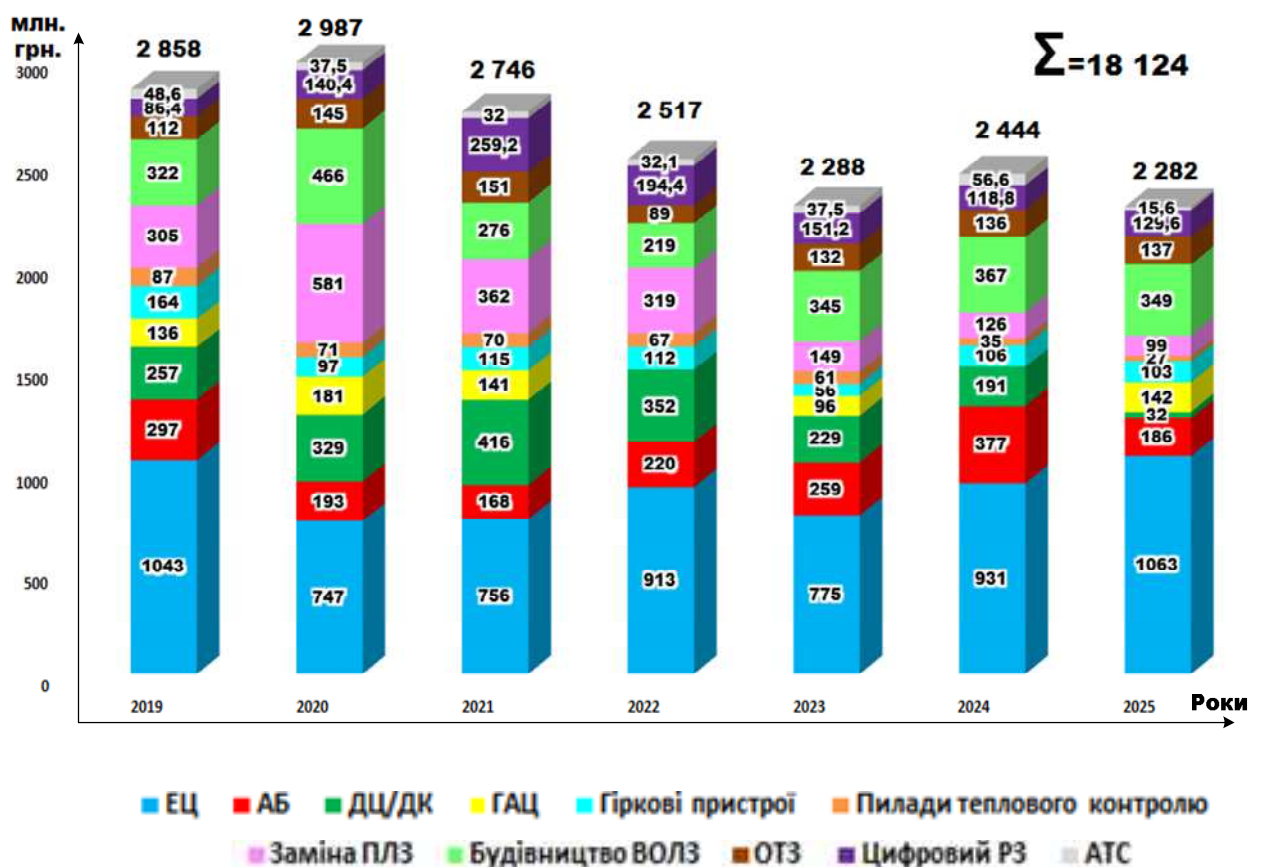


Рисунок 1.12 – Перспективні плани цільового фінансування щодо модернізації пристроїв СКРП на АТ «Укрзалізниця»

Як вбачається з наведених планів найбільший обсяг інвестицій передбачено в переоснащення систем ЕЦ, що повністю узгоджується з їх пропорційним внеском у технічну оснащеність засобів СКРП відповідними пристроями (рисунок 1.11). При цьому виникає дилема щодо раціонального вибору між реалізацією систем, базованих виключно на мікропроцесорній основі, та комбінованими (релейно-процесорними) системами (рисунок 1.13) [58, 59].

Впровадження сучасних систем залізничної автоматики

ПОТРЕБУЄ ВИРІШЕННЯ ПИТАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМ, ЩО ВПРОВАДЖУЮТЬСЯ (ВСТАНОВЛЕННЯ КРИТЕРІЇВ ВИБОРУ З УРАХУВАННЯМ СВІТОВОГО ДОСВІДУ)

	МПЦ	РПЦ
+	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сучасність елементної бази 2. Функціональність 3. Скорочення експлуатаційних витрат 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вартість 2. Простіша будова
-	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вартість 2. Супроводження 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Наявність релейної апаратури (зокрема, російського виробництва) 2. Технічна безперспективність

Рисунок 1.13 – Дилема вибору релейних або релейно-процесорних засобів СКРП на прикладі систем ЕЦ, зазначена ЦШ АТ «Укрзалізниця»

Як впливає з позиції департаменту ЦШ, виходячи із технічної перспективності, доцільнішим є подальша реалізація саме мікропроцесорних СКРП.

Виходячи зі світових тенденцій, обумовлених Четвертою промисловою революцією (Industry-4.0), актуальним стає питання не тільки модернізації діючих СКРП на мікроелектронній основі, але й запровадження вже

мікропроцесорних систем новітнього покоління, що передбачають розширені інтелектуально-аналітичні можливості, базовані на сучасних методах та засобах цифровізації технологічних процесів [104 – 109].

Зокрема, згідно останніх тенденцій у предметній галузі [109], цифровізація інтелектуально-аналітичних можливостей у сфері використання СКРП передбачає достовірне прогнозування збоїв у роботі систем, електронний автоматизований облік робіт із ТО та ремонту, а також реалізацію формування рекомендацій із раціоналізації процесів маршрутизації транспортних потоків. Загалом концепція Industry-4.0 у сфері залізничного транспорту передбачає повноцінну реалізацію дванадцяти основних можливостей, поставлених за мету комплексної модернізації засобів транспорту (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 – Очікувані результати щодо можливостей реалізації концепцій Industry-4.0 у сфері залізничного транспорту

У аспекті розвитку методів та засобів СКРП такі можливості визначаються, перш за все, збільшенням обсягу автоматизації процесів перевезень, раціоналізацією оброблення великих обсягів даних, введенням інтелектуально-аналітичних систем (ІАС) допомоги учасникам руху, запровадженням інтелектуальних потягів, інтеграцією систем керування різними видами транспорту [109].

Світова тенденція цифровізації залізничних сполучень спрямована при цьому, в першу чергу, на підвищення безпеки та прискорення руху поїздів в умовах нерівномірної завантаженості транспортної мережі. При такому підході передбачається, що всі дані систем керування, рухомого складу, управління пасажиро- та вантажопотоками об'єднуються на єдиній інтелектуально-обчислювальній платформі, у результаті чого забезпечується оптимальний та прискорений обмін даних у єдиній мережі. Таким чином забезпечується єдиний інтегрований принцип управління всіма системами і складовими залізничного транспорту, у якому СКРП виступають інтегрованою ланкою єдиного інтелектуально-обчислювального керуючого комплексу. Джерелом цифровізації систем при цьому слугує функціональна сумісність підсистем різного призначення при збереженні критичного підходу до убезпечення єдиних баз даних (технологічної, сервісної та іншої інформації) [109].

Цілісне управління даними при цьому (в умовах інтеграції транспортних систем і технологій) призводить до трансформаційних змін в інтелектуальному керуванні трафіком у реальному часі. Це підвищує ступінь задоволеності споживачів продукції залізничного транспорту (пасажирів, вантажовідправників, підприємств оборонного комплексу тощо) завдяки наявності інформаційних станцій та персоніфікованих повідомлень, що отримують актуальну інформацію із централізованих баз даних. У таких умовах комплексна цифровізація залізничного транспорту визначається складовими процесу розвитку транспортних технологій, зазначеними на схемі, зображеній на рисунку 1.15 [107, 109].

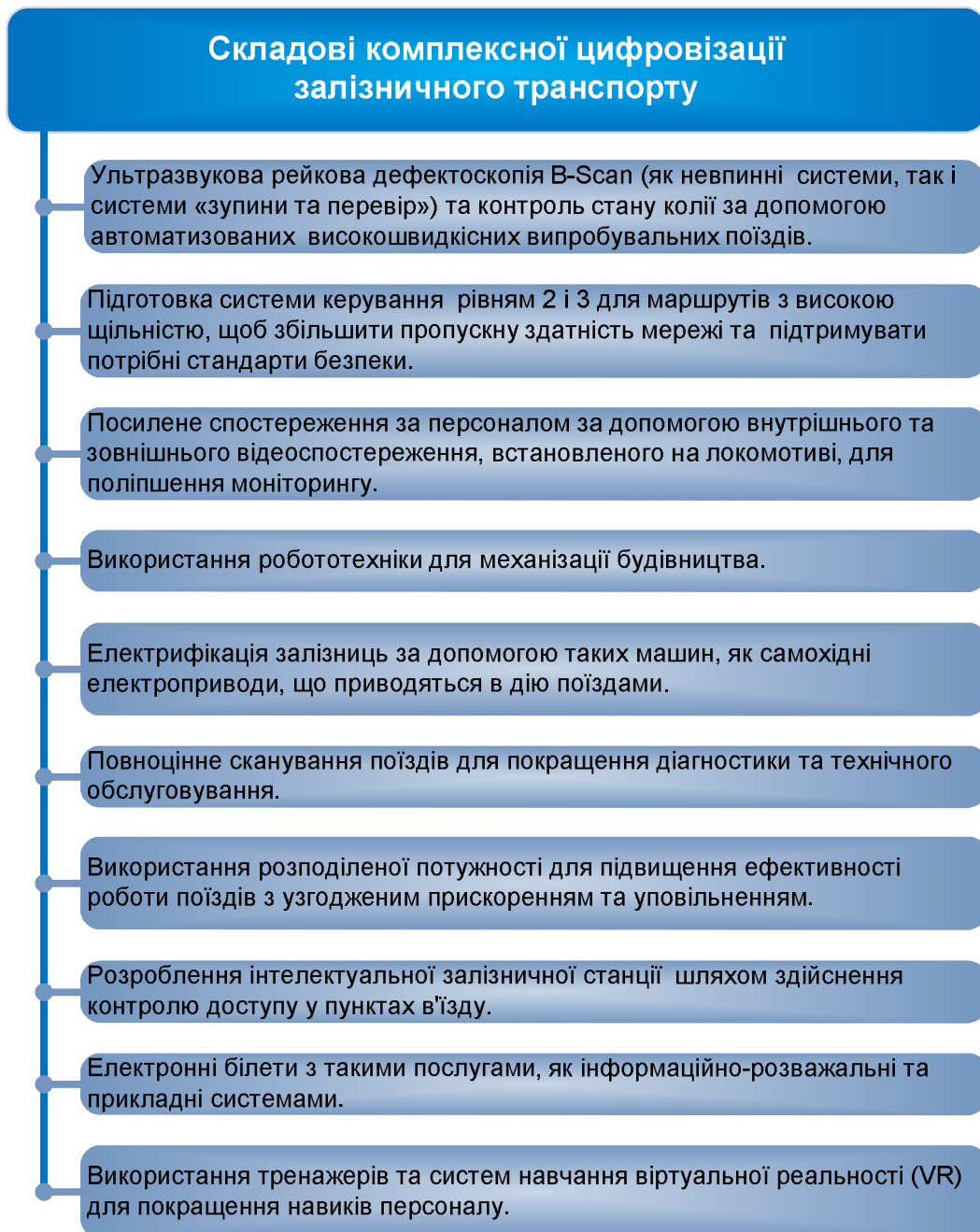


Рисунок 1.15 – Складові комплексної цифровізації залізничного транспорту

Реалізація зазначених складових передбачає комплексне сенсорне обладнання всіх рівнів і компонент цифрових засобів СКРП на базі фізичних і віртуальних датчиків, реалізація яких здійснюється на основі технології «цифрового двійника». Поєднання зазначеної технології із технологією Інтернету речей (IoT) забезпечує можливість інтелектуально-інтеграційного поєднання усіх складових, пов'язаних із керуванням транспортно-технологічними процесами (рисунок 1.16) [107 – 110].

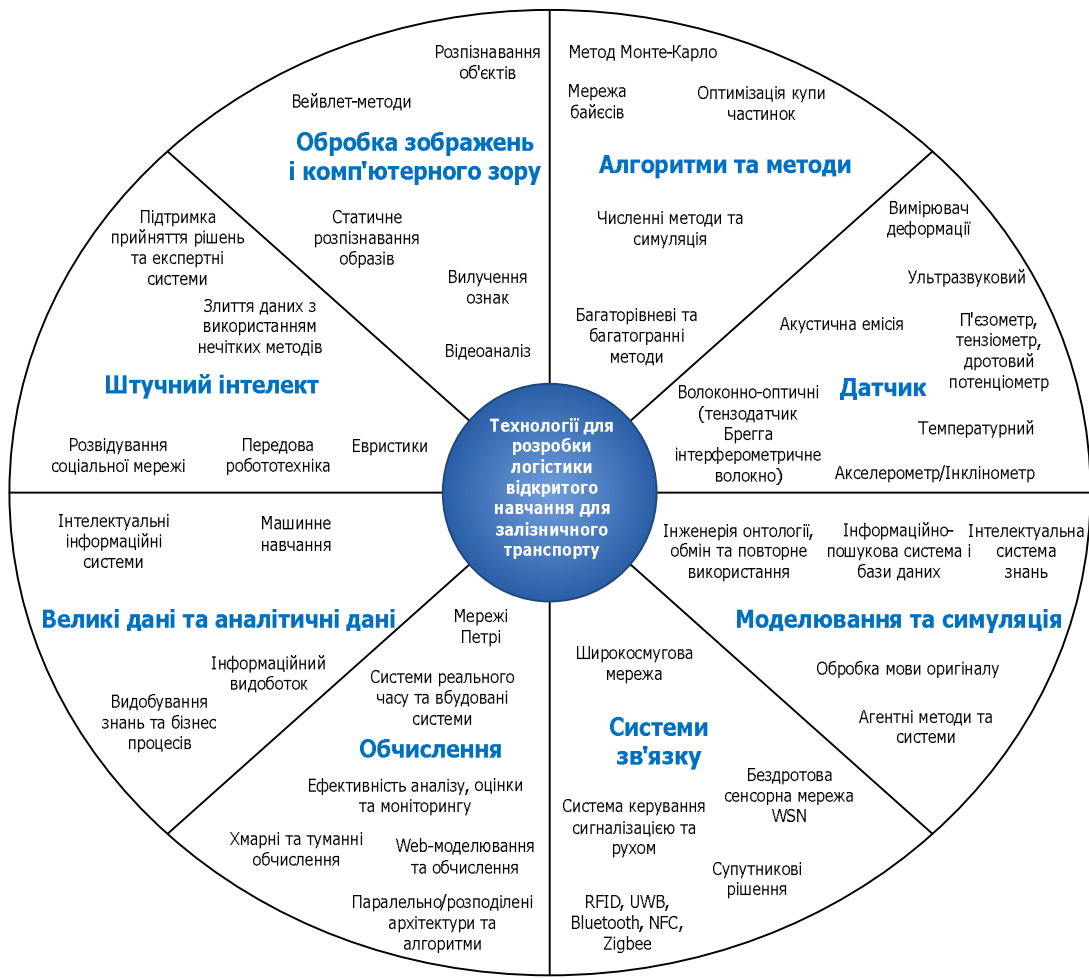


Рисунок 1.16 – Діаграма запровадження технологій IoT у сфері керування та регулювання на залізничному транспорті

Одне з останніх досліджень, в якому виконано інтерпретацію світових досягнень Industry-4.0 в сфері залізничного транспорту на залізниці України, опубліковано в праці [110].

Сучасні цифрові інформаційно-керуючі системи, виходячи з результатів дослідження, повинні відповідати таким вимогам:

- автоматизація наскрізних комплексних інформаційних технологій, що повністю підтримують бізнес-процеси галузі;
- орієнтування на найбільш передові програмно-технічні засоби і сучасні мережі передачі даних;
- максимальне усунення «людського фактора» за рахунок автоматичного введення даних;

- застосування засобів аналітичної обробки інформації для підтримки прийняття рішень;
- побудова на базі оптимізаційних та імітаційних моделей.

Такі вимоги цілком узгоджуються із світовими тенденціями, зокрема, очікуваннями, що відображені на рисунках 1.15 і 1.16. При цьому зазначено, що попередній підхід до реалізації мікропроцесорних засобів СКРП базований на застарілій технології реалізації технологічних функцій та взаємодії з персоналом, який був характерним для старих релейно-контактних систем. Передбачувана в дослідженні інтеграція та уніфікація систем СКРП різного призначення на першому етапі комплексної цифровізації зображена на рисунку 1.17 [17, 110].

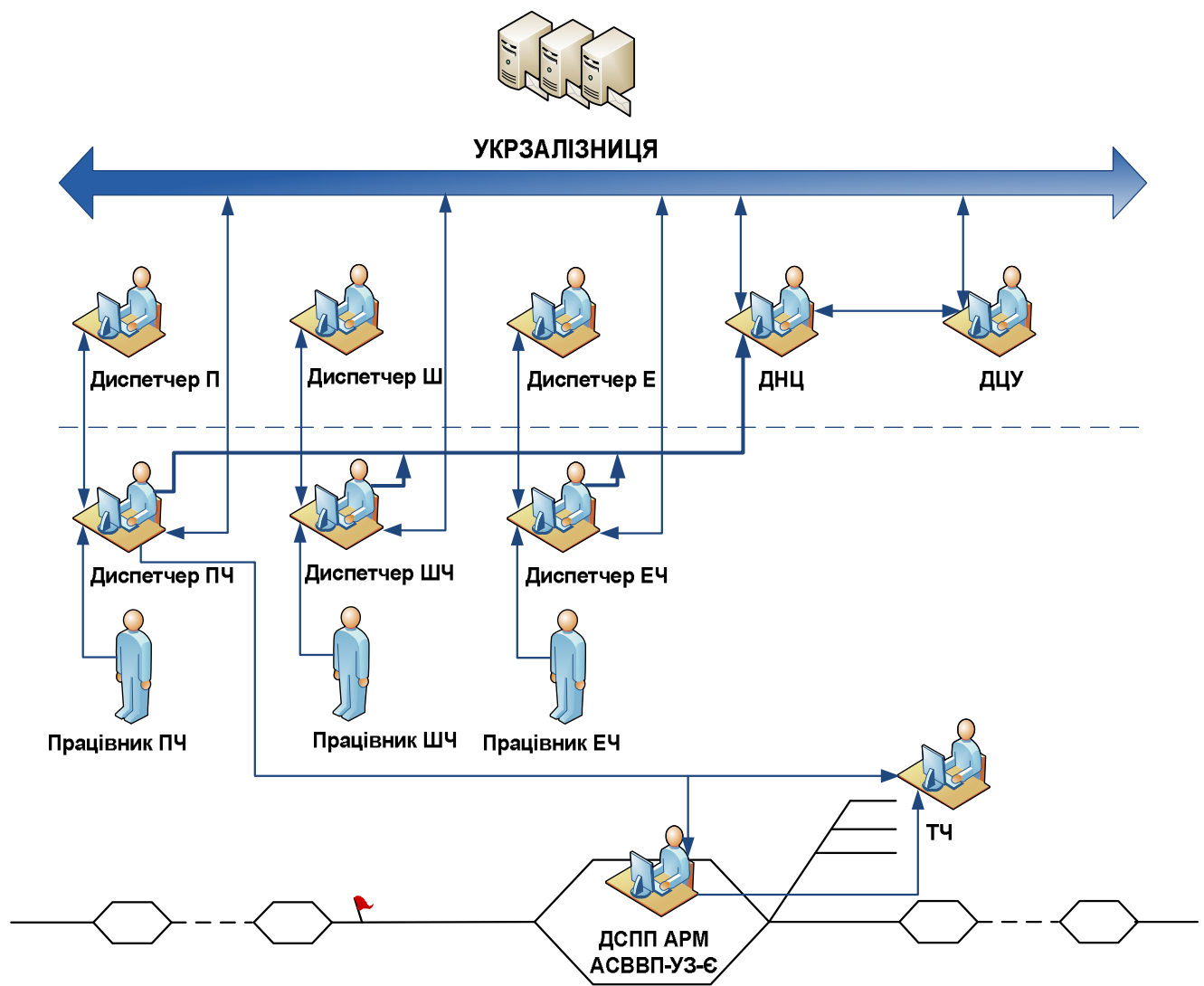


Рисунок 1.17 – Приклад технології інформаційної взаємодії автоматизованих систем залізничної інфраструктури

Основна сутність наведеного принципу полягає в інтеграції інтелектуальних можливостей і баз даних в єдину платформу на базі хмарних технологій та IoT. На прикладі об'єднання автоматизованих робочих місць (АРМ) різного призначення такий підхід зображено на рисунку 1.18 [110].

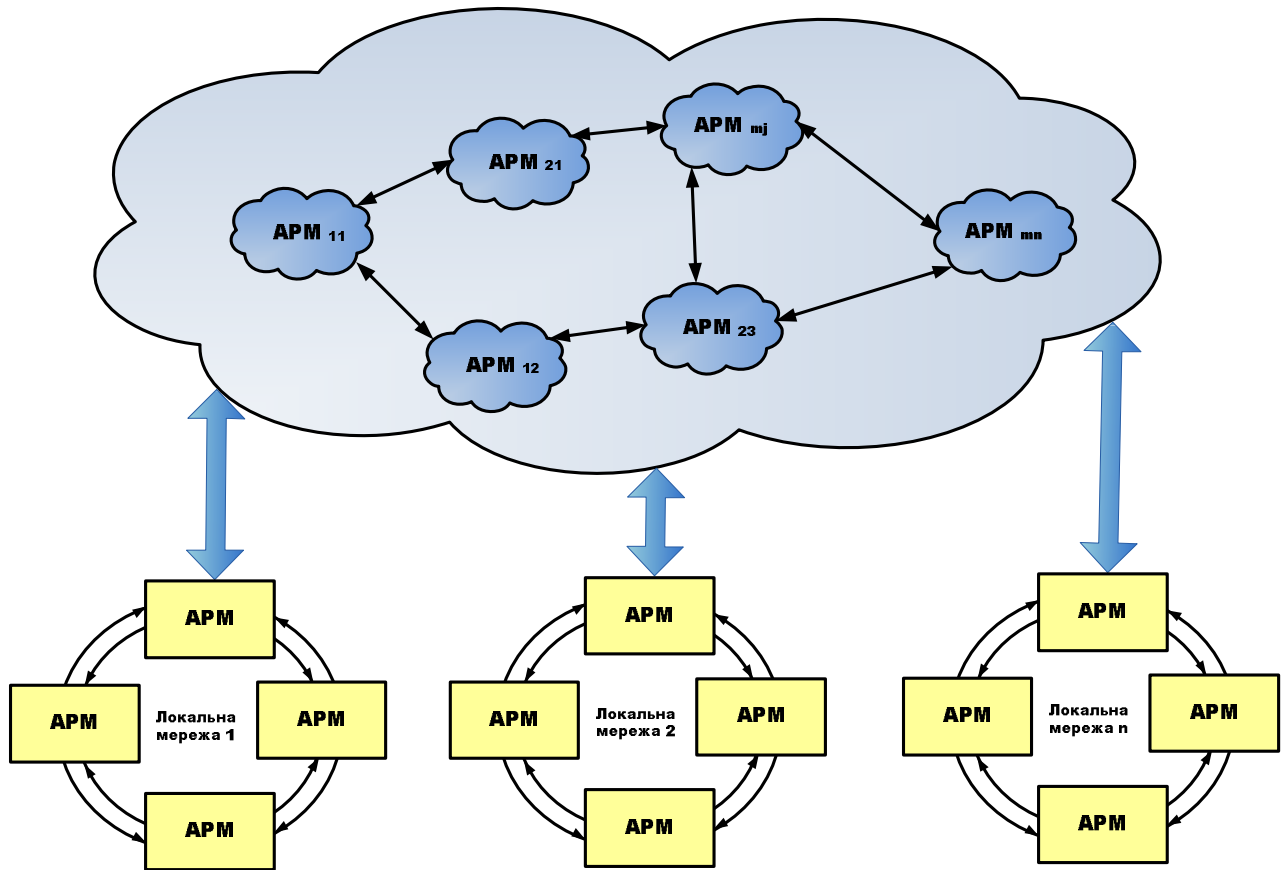


Рисунок 1.18 – Приклад інтеграції автоматизованих робочих місць оперативного та технічного персоналу інформаційно-керуючого комплексу СКРП

Реалізація такого підходу обов'язково передбачає наявність незалежної інтелектуально-аналітичної бази даних, що охоплює всі наявні робочі станції. В більш загальному випадку така технологія охоплює всі інформаційно-керуючі вузли СКРП певного масштабу [110].

Розвиток систем залізничної автоматики із використанням мікропроцесорної цифрової бази, особливо, із застосуванням сучасних технологій Industry-4.0, вимагає контролю функціональних параметрів (верифікації) програмно-апаратних засобів СКРП на усіх етапах життєвого циклу. Тільки в умовах достатньої верифікованості

убезпечується функціонування та забезпечуються необхідні показники призначення та експлуатаційної готовності системи [14, 16, 19, 24, 69, 107].

Таким чином, невід’ємною складовою розвитку цифрових систем СКРП є зростання їх експлуатаційної готовності, що базується відповідному становленні та вдосконаленні методів, моделей та засобів технічного контролю їх архітектурних та функціональних параметрів.

1.3 Аналіз методів та моделей контролю функціональних параметрів систем керування рухом поїздів

Задачі контролю функціональних параметрів СКРП, що встановлює та визначає відповідність їх побудови та функціонування заданим вимогам (ПТЕ, типовим проектним рішенням, регламентам тощо), були актуальними на всіх етапах становлення та розвитку відповідних систем [12 – 19, 24, 68, 69, 111 – 126].

З точки зору експлуатаційної готовності відповідність СКРП зазначеним параметрам зводиться до забезпечення її основного показника – коефіцієнта готовності K_g , який визначається як імовірність того, що об’єкт виявиться працездатним у довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких використання об’єкта за призначенням не передбачено. У загальному випадку цей коефіцієнт підраховується як параметр, що визначається відношенням часу справної роботи $T_{спр}$ до суми часів справної роботи і вимушених простоїв $T_{пр}$ об’єкта, взятих за один і той же календарний термін [63, 64]

$$K_g = \frac{T_{спр}}{T_{спр} + T_{пр}}, \quad (1.4)$$

$$T_{пр} = \sum_{i=1}^n t_i,$$

де t_i – тривалість одного окремого вимушеного простою СКРП.

Враховуючи стохастичний характер параметрів формули (1.4), на практиці використовується ймовірнісне трактування коефіцієнту K_z , для чого параметри $T_{сп}$ та $T_{пр}$ замінюються математичними сподіваннями часу між сусідніми відмовами $T_{сп}$ і часу відновлення T_B відповідно. У результаті вираз (1.4) трансформується таким чином [63]

$$K_z = \frac{T_{сп}}{T_{сп} + T_B}. \quad (1.5)$$

З теорії надійності відомо, що для нерезерованих технічних засобів параметр $T_{сп}$ не залежить від техніки та методології реалізації контролю функціональних параметрів, а для резервованих – залежить тільки від періодичності контролю, і не залежить від інших його показників (зокрема, глибини контролю, його тривалості тощо) [63, 64].

У той же час як відповідно до класичної теорії, так і ряду прикладних досліджень середній час відновлення T_B для всіх систем прямо залежить від глибини контролю, що визначається середньою кількістю складових СКРП (блоків, модулів, компонентів тощо) з точністю до яких аналізується правильність функціонування, працездатність, а отже – здійснюється локалізація дефекту, відмови або помилки СКРП під час верифікації [63, 64].

Таким чином, підвищення експлуатаційної готовності СКРП на основі контролю функціональних параметрів здійснюється за рахунок зменшенням часу T_B при збільшенні глибини контролю, у результаті чого відповідно до формули (1.5) підвищується коефіцієнт готовності K_z . Це пояснюється скороченням часових ресурсів на здійснення верифікаційних процедур для системи в комплексі порівняно із технічним контролем окремих її складових, а також своєчасністю виявлення дефектів (передвідмовних станів, помилок), що сприяє підвищенню інтенсивності відновлення систем [126 – 132].

Для релейно-контактних СКРП основні заходи із контролю функціональних параметрів зводяться до перевірки залежностей на об'єктах впровадження й

експлуатації (для систем у комплексі) або до випробувань елементної бази в заводських умовах чи умовах ремонтно-технологічних дільниць (РТД) [113, 115 – 118].

Методи та засоби, що використовуються для контролю функціональних параметрів релейно-контактних СКРП, є неприйнятними або малоприйнятними для їх мікропроцесорних аналогів через суттєві відмінності в елементній базі та техніці забезпечення виконання покладених функцій [13 –19, 119, 120].

Для більш сучасних цифрових систем СКРП, що відповідають тенденціям Industry-4.0, ще в більшому ступені є неприйнятними методи та засоби верифікації, характерні для релейно-контактних систем, проте повністю або частково є реалізованими відповідні підходи, сформовані для мікропроцесорних технічних засобів. Повнота відповідності при цьому визначається ступенем взаємної інтеграції або уніфікації СКРП із суміжними системами [24, 119].

Питанням контролю функціональних параметрів мікроелектронних систем та засобів керування технологічними процесами на залізничному транспорті та в інших відповідальних сферах займалися багато вітчизняних та закордонних вчених.

Серед науковців України та країн близького зарубіжжя вагомий внесок у розвиток методології контролю функціональних параметрів та забезпечення експлуатаційної надійності (зокрема готовності) СКРП зробили Сапожніков В.В., Костромінов О.М., Гавзов В.С., Наседкін О.О., Лисенков В.М., Горелік А.В., Кравцов В.М., Мойсеєнко В.І., Бойнік А.Б., Грицук І.В., Бабаєв М.М., Загарій Г.І., Тартаковський Е.Д., Бутько Т.В., Кустов В.Ф., Огар О.М., Куценко М.Ю., Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Ананьєва О.М., Прохорченко А.В., Жуковицький І.В., Гаврилюк В.І., Сердюк Т.М., Маловічко В.В., Самсонкін В.М., Фурман І.О., Бочков К.А., Харлап С.Н., Шевченко Д.Н., Розенберг Е.Н., Шубинський І.Б., Ургансков Д.І., Тарадін М.О. та ін. Серед закордонних вчених значну роль у розвитку методів та засобів контролю функціональних параметрів відповідальних систем керування, переважно шляхом моделювання технологічних процесів, відіграли Yang L., Yin J., Mutlu I., Ovatmam T., Soylemez M., Trgenc A., Wang Y., Feng J., Lee J., Choi H., Park D., Chung Y., Kim H., Yoon S., Short R., Celebe B., Kaymakci O., Kaymakci T., Chen X., Huang H., Busard S., Cappart Q., Limbree C.,

Pecheur C., Schaus P., Bonacchi A., Bacherin S., Tempestini M., Fantechi A., Fokkink W., Morzenti A., Estevan A., Kumar U., Tretten P., Garmabaki A., Ahmadi A., Larsson-Kråik P., Gustafson A., Söderholm P., Tamarit J., Wisten A., Niska S. та інші.

Аналіз відповідних наукових та прикладних праць, зокрема робіт [67 – 69, 110, 122 – 144], а також нормативно-технічних документів [145 – 155], вказує на те, що ключовими предметами контролю функціональних параметрів є не тільки експлуатаційна готовність, але й функційна безпечність СКРП. Нормативні документи та науково-прикладні підходи, що їх імплементують, спрямовані в такому випадку на дослідження та доказ функційної безпечності (ФБ) відповідних систем керування.

У ряді робіт при цьому, зокрема в [56, 68, 69, 120], запропоновано в контексті убезпечення із застосуванням ергатичних СКРП (до яких належать ЕЦ, НАБ, АЛС, ДЦ) самого процесу руху потягів перейти від проблематики «функційної безпечності» до концепції «безпеки використання», яка охоплює не тільки показники ФБ, але й безвідмовності, експлуатаційної готовності, ремонтпридатності та інших показників надійності відповідних систем.

В обґрунтування такого підходу в зазначених працях зазначається та доводиться, що ергатичні СКРП передбачають перехід у позаштатний режим функціонування, при якому нівелюється частина блокувальних залежностей систем. У таких умовах людина-оператор системи при визначенні безпеки функціонування системи враховується як повноцінний її компонент, що послідовно включається до розрахунково-логічної схеми функційної безпечності (РЛСФБ). Виходячи з того, що інтенсивність небезпечних помилок людини-оператора становить $10^{-3} - 10^{-4}$ 1/год, у відповідних роботах встановлено, що верифікація таких СКРП на предмет безпеки функціонування повинна враховувати безвідмовність компонентів, захисна відмова яких призводить систему до допоміжного режиму функціонування, в якому людина-оператор враховується при визначенні показників безпечності. Стан системи, при якому вона продовжує (повністю або частково) виконувати свої функції, але без достатньої мінімізації людського фактору, класифікується при цьому не як захисний, а як «потенційно небезпечний», експлуатація СКРП у якому обумовлюється збереженням належної готовності [56, 68, 69, 152, 154].

Подальший розвиток СКРП із урахуванням тенденцій Industry-4.0 (рисунки 1.13 – 1.15), особливо в комплексі тотальної цифровізації, передбачає становлення інтерактивної взаємодії СКРП не тільки з експлуатаційним персоналом (людиною-оператором), але й з технічним (обслуговуючим), а в ряді випадків – і з контрольно-ревізійним (інспекційним, аудиторським) персоналом. Зокрема, в роботі [155] закладені основи, згідно з якими відбувається зазначена взаємодія в рамках систем залізничної автоматики із використанням вкладених алгоритмів самодіагностики та зворотного зв'язку між представниками персоналу всіх видів і категорій.

Реалізація режимів функціонування при цьому безпосередньо пов'язано із санкціонуванням з боку належних посадових осіб та діагностичних висновків технічних засобів [9, 12, 17].

У роботах [110, 156] здійснено прикладну адаптацію наукових положень, наведених у роботі [155], до СКРП, що впроваджуються або знаходяться в експлуатації в Україні. Для мікропроцесорних СКРП розвиток такого роду взаємодії передбачається, перш за все, за рахунок можливостей системного та прикладного програмного забезпечення і т.д.

Із розвитком інтерактивної взаємодії між технічними засобами та персоналом СКРП підходи до визначення безпеки використання систем керування з огляду на збереження їх експлуатаційної готовності повинні враховувати такі фактори [7, 9, 10, 16, 17, 23, 24, 56, 68, 69]:

- врахування показників надійності та безпечності представників не тільки оперативного, але й технічного та інших видів персоналу (залежно від типу системи, що використовується);
- перехід від оцінювання функційної безпечності до безпеки використання не тільки ергатичних (автоматизованих), але й автоматичних СКРП.

У такому випадку узагальнена функціональна схема формування, передачі та виконання команди керування довільної СКРП з урахуванням штатного та різних варіацій допоміжного режимів керування при інтерактивній взаємодії різних видів персоналу виглядає згідно рисунку 1.19 [7, 10, 17, 23].

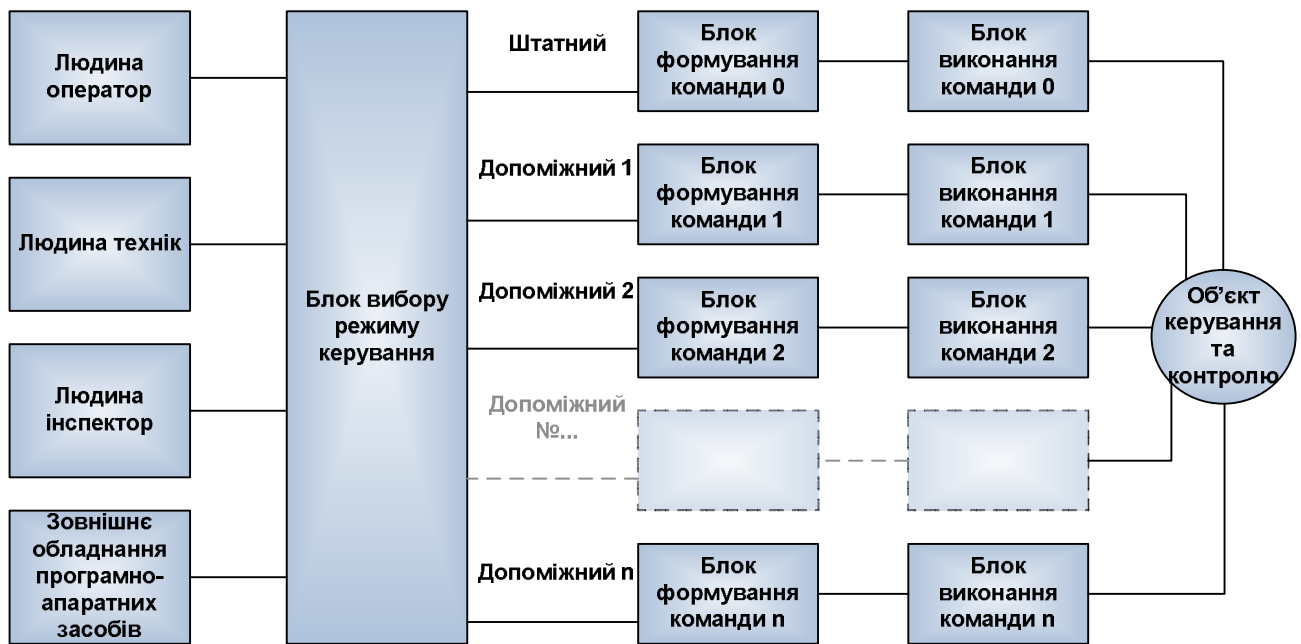


Рисунок 1.19 – Узагальнена функціональна схема реалізації команди керування СКРП з урахуванням інтерактивної взаємодії з персоналом

Підсистема технічного діагностування, інтегрована в блок вибору режиму функціонування, визначає конкретний режим із урахуванням вихідних даних, наданих представниками всіх видів персоналу (оперативного, технічного та інспекційного) та зовнішніх технічних засобів у рамках інтерактивної взаємодії визначає конкретний режим функціонування системи при виконанні команди об'єкту керування та контролю (ОКК) – штатний (режим №0) або один чи декілька з допоміжних (№№ 1–n).

При штатному режимі функціонування системи (режим №0) через відповідні блоки керування та виконання команди із перевіркою всіх умов безпеки (програмно-апаратними засобами) здійснюється необхідна комутація керуючих кіл ОКК. У такому випадку людський фактор не є задіяним в безпосередньому процесі реалізації команди керування, тому не враховується у верифікації процесів забезпечення руху потягів технічними засобами.

У разі виявлення засобами технічного діагностування необхідних ознак, згідно з якими передбачено перехід системи (в аспекті реалізації конкретної команди або групи команд) в один або декілька допоміжних режимів,

відбувається реалізація цього переходу, після чого необхідним є врахування людського фактору в контексті забезпечення руху потягів.

З урахуванням результатів робіт [68, 69], зокрема – параметру припустимого простою в роботі СКРП після захисної відмови, ймовірність небезпечної відмови СКРП при експоненціальному законі надійності, якщо знехтувати параметрами безпеки технічних компонентів системи в допоміжному режимі, визначається таким чином [7, 154]

$$Q_{n_СКРП} = \begin{cases} Q_{n_ПАЗ}(t), t \in [t_0; t_3) \cup [t_3 + T_m + \Delta t; t_k], \\ 0, t \in [t_3; t_3 + T_m), \\ \left. \begin{cases} \prod_{i=1}^n X_i Q_{n_pi}(t), L_{ПЛСФБ} = seq, \\ 1 - \prod_{i=1}^n Y_i P_{\sigma_pi}(t), L_{ПЛСФБ} = par, \\ 1 - \prod_{j=1}^m \left[1 - \prod_{k=1}^r Y_k P_{\sigma_pjk}(t) \right], L_{ПЛСФБ} = mix, \end{cases} \right\} , t \in [t_3 + T_m; t_3 + T_m + \Delta t), \end{cases} \quad (1.6)$$

$$\sum_j j + \sum_k k = \sum_i i = m + r = n,$$

де $Q_{n_ПАЗ}(t)$ – ймовірність небезпечної відмови програмно-апаратних засобів (ПАЗ) СКРП протягом часу експлуатації t ;

t_0 – вихідний опорний час експлуатації СКРП (що визначається початком експлуатації або початком попередньої верифікації СКРП);

t_3 – момент виникнення захисної відмови СКРП;

T_m – тривалість припустимого простою в роботі СКРП після виникнення захисної відмови (до переходу системи в допоміжний режим);

Δt – перевищення часу відновлення ПАЗ СКРП над часом її припустимого простою після захисної відмови;

$Q_{n_pi}(t)$ – ймовірність небезпечної відмови людських ресурсів та ПАЗ при реалізації допоміжного режиму функціонування № i ($i = \overline{1, n}$) та їх послідовному з'єднанні в РЛСФБ;

$P_{\bar{o}_pi}(t)$ – ймовірність безпечної роботи людських ресурсів та ПАЗ при реалізації допоміжного режиму функціонування № i ($i = \overline{1, n}$) та їх паралельному з'єднанні в РЛСФБ;

$P_{\bar{o}_pjk}(t)$ – ймовірність безпечної роботи людських ресурсів та ПАЗ при реалізації допоміжного підрежиму функціонування № k ($k = \overline{1, r}$) режиму № j ($j = \overline{1, m}$) та їх змішаному з'єднанні в РЛСФБ;

X_i, Y_i, Y_k – параметри, що визначають включення або відсутність включення відповідних людських ресурсів та ПАЗ відповідних режимів функціонування СКРП до РЛСФБ;

$L_{РЛСФБ}$ – параметр, що визначає характер включення людських ресурсів та ПАЗ СКРП до РЛСФБ (*seq, par, mix* – відповідно послідовне, паралельне та змішане з'єднання елементів у схемі).

Параметри X_i, Y_j, Y_k у формулі (1.6) визначаються як значення, що зберігають або невілюють ймовірності небезпечних відмов або безпечної роботи залежно від наявності/відсутності впливу відповідних режимів на безпеку використання СКРП [7]

$$X_i = \begin{cases} 1, M_{pi} \subset M_{РЛСФБ}, \\ \frac{1}{Q_{n_pi}(t)}, M_{pi} \not\subset M_{РЛСФБ}, \end{cases} \quad Y_i = \begin{cases} 1, M_{pi} \subset M_{РЛСФБ}, \\ \frac{1}{P_{\bar{o}_pi}(t)}, M_{pi} \not\subset M_{РЛСФБ}, \end{cases}$$

$$Y_k = \begin{cases} 1, M_{pjk} \subset M_{РЛСФБ}, \\ \frac{1}{P_{\bar{o}_pjk}(t)}, M_{pjk} \not\subset M_{РЛСФБ}, \end{cases} \quad (1.7)$$

де M_{pi} , M_{pj} – відповідно множини елементів (людських ресурсів та ПАЗ), що забезпечують функціонування режиму № i та підрежиму № k режиму № j функціонування СКРП;

$M_{РЛСФБ}$ – множина елементів РЛСФБ для певного режиму або групи режимів функціонування СКРП.

Значення ймовірностей безпечної роботи та небезпечних відмов у формулах (1.6) і (1.7) при експоненціальному законі розподілу, за умови послідовного з'єднання елементів у складі РЛСФБ для кожного окремого режиму (під режиму), відповідно до [68, 69, 154] визначаються як

$$\begin{aligned} Q_{n_ПАЗ}(t) \Big|_{L_{РЛСФБ}=seq} &= 1 - P_{\bar{o}_ПАЗ}(t) \Big|_{L_{РЛСФБ}=seq} = 1 - e^{-\sum_{a=1}^b \lambda_{n_ПАЗ_a} t}, \\ Q_{n_pi}(t) \Big|_{L_{РЛСФБ}=seq} &= 1 - P_{\bar{o}_pi}(t) \Big|_{L_{РЛСФБ}=seq} = 1 - e^{-\left(\sum_{l=1}^s \lambda_{ЛР_l} + \sum_{u=1}^w \lambda_{ПАЗ_u}\right) t}, \\ P_{\bar{o}_pj}(t) \Big|_{L_{РЛСФБ}=seq} &= 1 - Q_{n_pj}(t) \Big|_{L_{РЛСФБ}=seq} = e^{-\left(\sum_{h=1}^g \lambda_{ЛР_h} + \sum_{o=1}^v \lambda_{ПАЗ_o}\right) t}, \end{aligned} \quad (1.8)$$

де $P_{\bar{o}_ПАЗ}(t)$ – ймовірність безпечної роботи ПАЗ СКРП у штатному режимі функціонування СКРП (режим №0);

$Q_{n_pj}(t)$ – ймовірність небезпечної роботи ресурсів і засобів підрежиму № k режиму № j функціонування СКРП;

$\lambda_{n_ЛР}$, $\lambda_{n_ПАЗ}$ – відповідно інтенсивності небезпечних відмов (помилки) елементів людських ресурсів та ПАЗ (індекс у формулі визначає порядковий номер елемента у складі ресурсів);

b , w , v – кількість елементів ПАЗ, включених до фрагментів РЛСФБ відповідно до режиму №0, режиму № i , підрежиму № k режиму № j ;

s , g – кількість людських ресурсів, включених до фрагментів РЛСФБ відповідно до режиму № i , підрежиму № k режиму № j .

У разі паралельного та/або змішаного характеру з'єднань елементів у фрагментах РЛСФБ для окремих режимів, вирази (1.8) перетворюються відповідно до правил, зазначених у праці [154].

За умови нехтування ПАЗ СКРП у складі режиму за наявності в ньому включених до РЛСФБ людських ресурсів ($\lambda_{н_ЛР} \gg \lambda_{н_ПАЗ}$), нижні два вирази у формулі (1.8) приймають вигляд

$$Q_{н_pi}(t) \Big|_{L_{РЛСФБ}=seq, \lambda_{ЛР} \ll \lambda_{ПАЗ}} = 1 - e^{-\sum_{l=1}^s \lambda_{ЛР_l} t},$$

$$P_{б_pjk}(t) \Big|_{L_{РЛСФБ}=seq, \lambda_{ЛР} \ll \lambda_{ПАЗ}} = e^{-\sum_{h=1}^g \lambda_{ЛР_h} t}.$$
(1.9)

З урахуванням максимальної тривалості робочої зміни оперативного й технічного персоналу на залізничному транспорті на рівні 12 годин відповідно до формул (1.6) – (1.9) у програмному середовищі MathCAD_15.0 побудовано сімейство графіків залежностей ймовірності небезпечної відмови СКРП у допоміжному режимі функціонування від часу (протягом зміни) та кількості представників людського ресурсу, задіяних у інтерактивній взаємодії із системою, з такими припущеннями:

- інтенсивність небезпечних відмов ПАЗ $\lambda_{н_ПАЗ} = 0$;
- однакове постійне значення інтенсивності небезпечних відмов для кожного представника людського ресурсу $\lambda_{н_ЛР_l} = const = 10^{-6}, 10^{-5}, \dots, 10^{-2}$ 1/год.

Побудовані графічні залежності наведено на рисунку 1.20. Аналогічно із використанням того ж програмного середовища із тими ж припущеннями побудовано також графіки залежності $Q_{н_СКРП}(\lambda_{н_ЛР}, N_{ЛР}, t)$ відповідно при $N_{ЛР} = const = 3, 5, 10, 15, 20$ чол.; $t = const = 1, 3, 6, 8, 12$ год. (рисунки 1.21, 1.22).

З аналізу всіх трьох сімейств залежностей вбачається, що навіть при мінімальних значеннях часу експлуатації системи, задіяного людського ресурсу та показників його функційної безпечності ризик використання СКРП відповідно до Міжнародної шкали визначається як винятково високий [7].

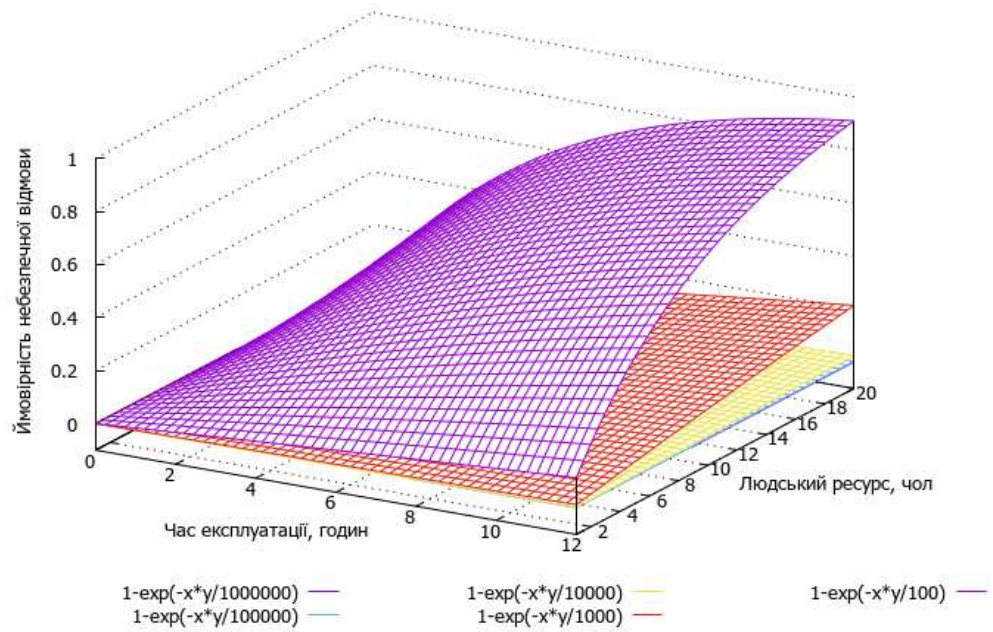


Рисунок 1.20 – Сімейство поверхневих графіків залежності ймовірності небезпечної відмови СКРП від часу та обсягу людського ресурсу протягом робочої зміни

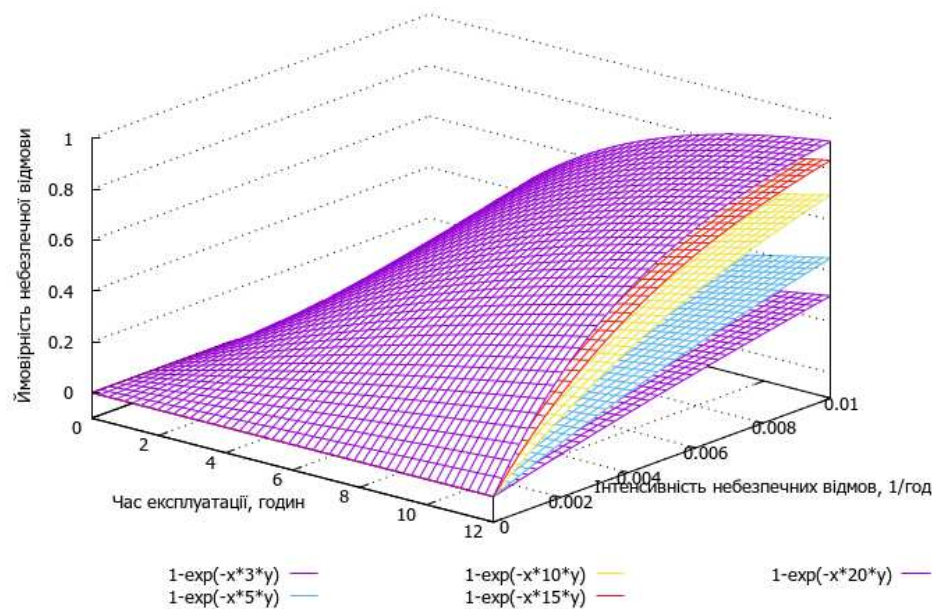


Рисунок 1.21 – Сімейство поверхневих графіків залежності ймовірності небезпечної відмови СКРП від часу та інтенсивності небезпечних відмов елементів людського ресурсу протягом робочої зміни

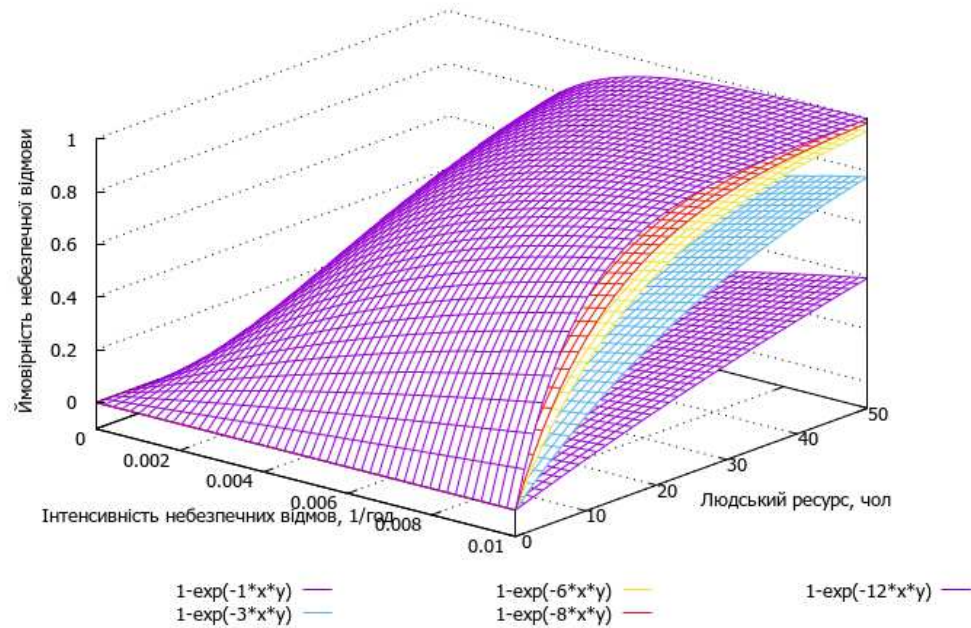


Рисунок 1.22 – Сімейство поверхневих графіків залежності ймовірності небезпечної відмови СКРП від обсягу та інтенсивності небезпечних відмов людського ресурсу протягом робочої зміни

Вже при середніх значеннях аргументів функції $Q_{н_СКРП}(\lambda_{н_ЛР}, N_{ЛР}, t)$ ймовірність небезпечної відмови СКРП у допоміжних режимах коливається в діапазоні від 0,4 до 0,6, а при граничних значеннях, зокрема – наприкінці робочої зміни, досягає значення 1.

Порівнюючи отримані результати опосередкованого впливу безвідмовності на безпеку використання СКРП при інтерактивній взаємодії всіх видів персоналу із системою із результатами дослідження взаємодії системи тільки з оперативним персоналом, опублікованих у працях [68, 69], вбачається значно вищий ступінь такого впливу, виходячи із крутизни відповідних графіків.

Встановлення кореляційного або безпосереднього зв'язку між показниками безвідмовності техніки, надійності людини (оперативного, технічного та інспекційного персоналу) та безпекою використання системи виходить за межі цієї дисертаційної роботи та потребує окремого дослідження.

Так чи інакше, отримані результати додатково підтверджують недостатність врахування виключно показників ФБ техніки при вирішенні питань її верифікації при прагненні зберегти належну експлуатаційну готовність в умовах сучасного розвитку науково-технічного прогресу.

Крім того, в умовах розвитку потреб суспільства, зокрема, в контексті потреб та досягнень Industry-4.0 у сфері залізничного транспорту (рисунок 1.13 – 1.15), не менш важливими параметрами СКРП ніж показники безпеки використання є показники їх призначення з позиції задоволення клієнтів у якісних пасажирських та вантажних перевезеннях. Таким чином, забезпечення заданих показників призначення становить не менш важливу функцію верифікації таких систем, що, зокрема, зображено на діаграмі рисунка 1.15 у контексті імітації та моделювання елементів і процесів керування рухом поїздів на різних етапах життєвого циклу відповідних систем [17, 24].

Враховуючи наявний досвід у предметній галузі, зокрема праці [67 – 69, 110, 120, 122 – 157], методи контролю функціональних параметрів СКРП поділяються на чотири основні групи та представляються у вигляді структурної схеми, зображеної у вигляді дерева на рисунку 1.23.

Розрахункові та експертні методи контролю функціональних параметрів СКРП призначені для попередньої оцінки безпеки використання, надійності та показників призначення систем, як правило – на етапі розроблення та проектування [56, 69, 120, 158]. На інших етапах життєвого циклу СКРП застосування таких методів можливо при реконфігурації систем, проте розрахунок параметрів системи завжди базується на ряді припущень і обмежень, що знижують достовірність його результатів. Крім того, застосування експертно-розрахункових методів базується на наявних чисельних вихідних даних щодо елементної бази та модульної компоновки, отримання яких від виробників або постачальників первинної продукції в багатьох випадках становить проблему, розв'язання якої не завжди можливе [69].

Таким чином, більш достовірними методами верифікації є експериментальні, що включають у себе різні види контролю якості продукції, реалізовані рядом способів та інструментальних засобів [56, 69, 157].

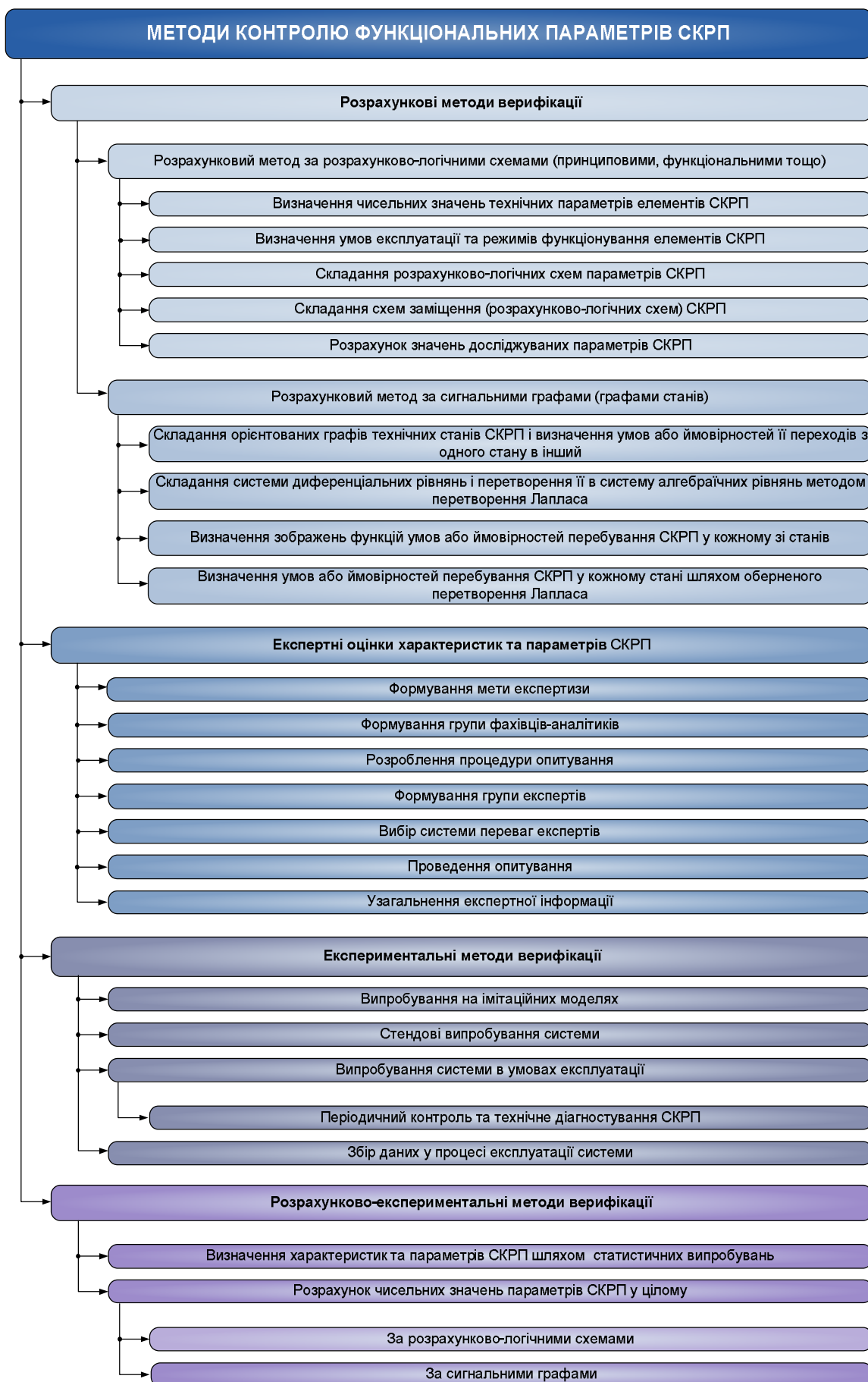


Рисунок 1.23 – Методи контролю функціональних параметрів СКРП

Найбільш достовірними методами верифікації серед експериментальної групи вважаються випробування, класифікація яких відповідно до праць і документів [56, 69, 120, 157, 158] та інших зображується рисунком 1.24.

Розділення випробувань на лабораторні і експлуатаційні є умовним, враховуючи можливість застосування одних і тих самих методів їх реалізації як в умовах виробництва й доексплуатаційних досліджень, так і безпосередньо на об'єктах впровадження (залізничних станціях, перегонах тощо).

З точки зору встановлення та підтвердження показників призначення систем, в тому числі – показників безпеки використання (що регламентовано більшістю експлуатаційних документів у сфері залізничної автоматики, зокрема – Правилами технічної експлуатації), а також забезпечення належної експлуатаційної готовності СКРП, найважливішою групою випробувань за призначенням є функціональні випробування. Їх реалізація як в лабораторних, так і в експлуатаційних умовах передбачає верифікацію виконання СКРП покладених на неї функцій, що і визначаються показниками призначення [157].

В напрямку розроблення та вдосконалення різних методів та засобів випробувань за останні п'ять років і в Україні, і в світі здійснено значний обсяг науково-прикладної роботи, спрямованої на підвищення глибини контролю (тестового покриття), зменшення ресурсів на проведення випробувань (людських, часових, матеріальних тощо), збільшення достовірності результатів випробувань, уніфікацію методів випробувань (зокрема – їх адаптацію під різні умови та зовнішні інструментальні засоби, а також СКРП різної побудови та призначення) тощо [56, 69, 104, 120, 122 – 126].

При цьому основним напрямком розвитку методології функціональних випробувань СКРП в останні роки залишається вдосконалення та нарощування можливостей імітаційних та комбінованих (фізико-імітаційних, поєднаних) моделей для випробувань, що становлять основний інструментарій для реалізації випробувально-діагностичних процедур. В таких умовах, головним чином – у результаті синтезу імітаційного та фізичного моделювання, досягаються широкі можливості по відтворенню всіх функцій і умов систем з

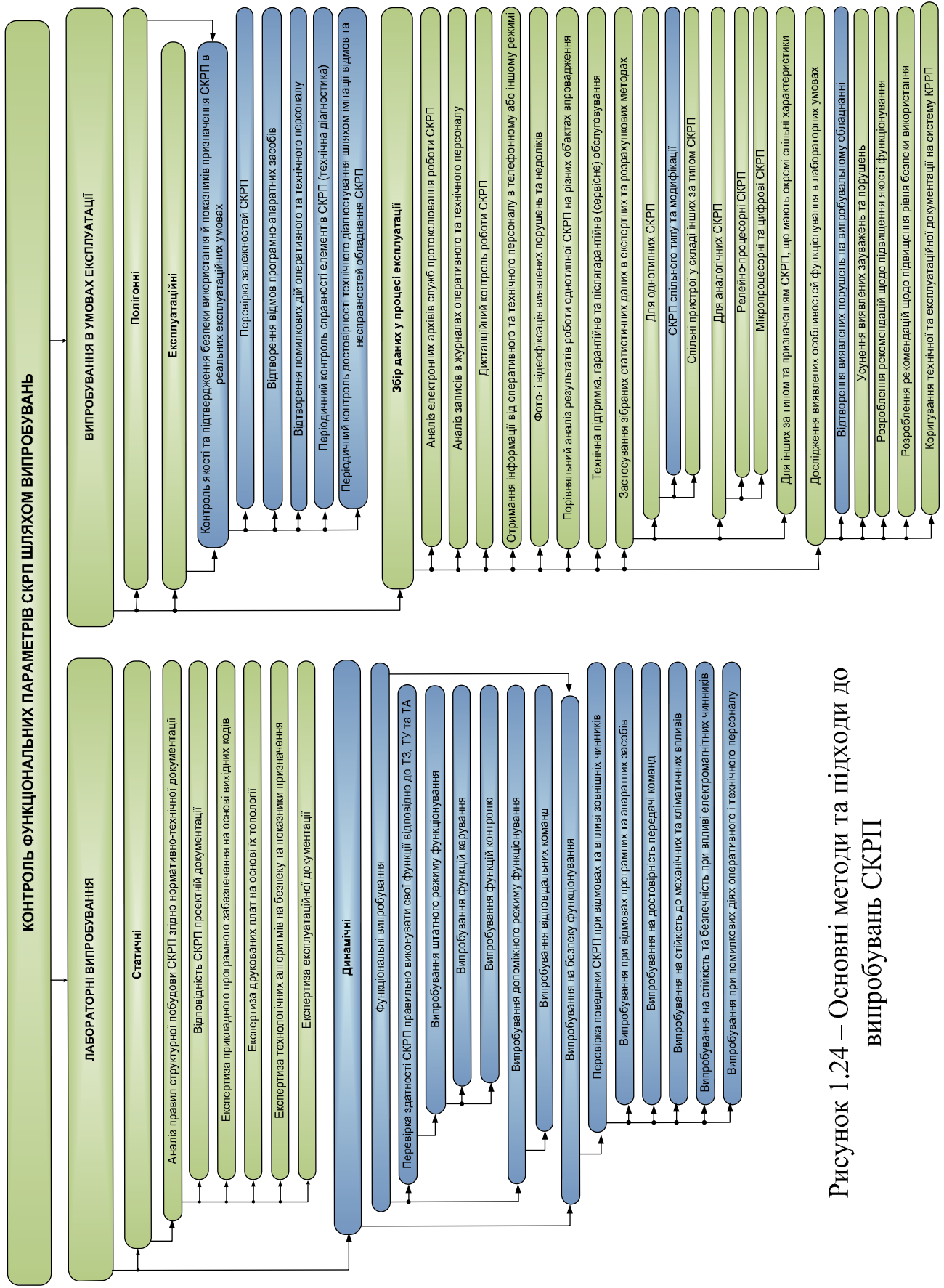


Рисунок 1.24 – Основні методи та підходи до випробувань СКРП

мінімальними ресурсами та мінімальним впливом на поточний технологічний процес роботи комплексного об'єкту керування та контролю СКРП [56, 69, 104, 120, 121, 136 – 137].

Відповідно до праць і документів [56, 68, 69, 122, 128 – 134, 157 – 159] ключовою задачею, яка потребує вирішення при реалізації випробувань СКРП для кожного об'єкту впровадження або експлуатації, є формування та використання належних моделей для випробувань, які задовольняють вимогам, зазначеним на рисунку 1.25.



Рисунок 1.25 – Основні моделі для випробувань СКРП та базові вимоги до них

Ключовою вимогою до зазначених моделей є їх адекватність, що полягає у відповідності вхідних і вихідних даних, що опрацьовуються моделлю, зазначеним даним, що є змінними (сигналами) СКРП. Адекватність моделей досліджується та доводиться вже після їх формування із використанням різних методів та засобів. Одним з основних таких методів є метод тестування, який базується на представленні моделі в якості дискретного автомату певного роду. Тестування відбувається на базі спеціальних технічних засобів, реалізованих програмно [69].

Для реалізації зазначених вимог одним з найважливіших рішень є вибір раціонального математичного апарату для формування моделей для випробувань. У останніх дослідженнях за зазначеною тематикою, зокрема – у роботах [56, 69 – 120], обґрунтовано графоаналітичний підхід до реалізації зазначених задач, який забезпечує можливість комплексного відтворення технологічного об'єкта із моделюванням складових об'єктів, їх взаємних зв'язків, функцій та властивостей.

В додатку А проведено аналіз основних методів та засобів графоаналітичного моделювання розподілених технологічних об'єктів (наукові праці [159 – 173]), які можуть бути застосовані при контролі функціональних параметрів СКРП. На його підставі формуються базові графоаналітичні моделі, що використовуються при вдосконаленні відповідних методів контролю з метою підвищення експлуатаційної готовності систем керування.

1.4 Висновки за розділом

При виконанні першого розділу дисертаційного дослідження були отримані такі науково-технічні результати:

1. Виконано аналіз експлуатаційної надійності діючих в Україні СКРП. На підставі опрацювання статистичних даних, зокрема – методами регресійного аналізу, спрогнозовано подальше домінування відмов техніки серед причин затримки руху поїздів у разі невжиття заходів із модернізації та переоснащення таких систем, чим обґрунтовано наявну необхідність їх реалізацій.

2. Проаналізовано стан фактичного впровадження та заходів із модернізації пристроїв СКРП в Україні. Визначенні пріоритетні напрямки такої модернізації в контексті вимог Четвертої світової промислової революції (Industry-4.0) до залізничного транспорту.

3. Проаналізовано та обґрунтовано вплив реалізації контролю функціональних параметрів на експлуатаційну готовність СКРП в умовах стохастичності її показників. Визначено пріоритетність розвитку методології контролю функціональних параметрів СКРП у напрямку підвищення їх експлуатаційної готовності.

4. Обґрунтовано необхідність перегляду та вдосконалення сучасних підходів до контролю функціональних параметрів СКРП із урахуванням потреб цифровізації та клієнтоорієнтованості інформаційно-керуючих систем залізничного транспорту нового покоління.

5. Виконано аналіз відомих методів та моделей контролю функціональних параметрів програмно-технічних засобів СКРП. Доопрацьовано підхід до його здійснення, що враховує опосередкований вплив на систему параметрів безвідмовності в контексті безпеки використання та показників призначення через інтерактивну взаємодію з персоналом різного типу. Обґрунтовано необхідність використання методів контролю функціональних параметрів систем керування та регулювання руху поїздів на базі експериментальних способів верифікації.

6. Проаналізовано методи випробувань, які використовуються для контролю функціональних параметрів СКРП. Обґрунтовано, що ключовою задачею при застосуванні зазначених методів є формування та використання моделей для випробувань. Запропоновано використання графоаналітичного апарату для вдосконалення методів та моделей випробувань шляхом синтезу та доопрацювання новітніх наукових результатів у предметній галузі.

7. Опрацьовано основні методи та підходи графоаналітичного моделювання технологічних об'єктів, які можуть бути застосовані при контролі функціональних параметрів СКРП з метою підвищення їх експлуатаційної готовності. Визначені основні графоаналітичні моделі, які беруться за основу вдосконалення методичних підходів до відтворення СКРП у процесі контролю їх функціональних параметрів в умовах виробництва та експлуатації.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛІ ОЦІНКИ ГЛИБИНИ КОНТРОЛЮ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ

Якість контролю функціональних параметрів систем керування рухом поїздів як способу забезпечення їх експлуатаційної готовності залежить від глибини контролю, оцінка якої базується на формалізованому обсязі технологічних об'єктів систем. Для цього необхідно формалізувати та актуалізувати теоретико-множинні відношення між об'єктами керування та контролю для подальшого структурного представлення всього технологічного об'єкту, на підставі чого визначити глибину контролю. Розділ присвячено вирішенню задач базової інтерпретації технологічних об'єктів залізничної автоматики для їх подальшого використання при підвищенні експлуатаційної готовності систем керування рухом поїздів.

2.1 Складові раціоналізації контролю функціональних параметрів

Функціональні випробування СКРП являють собою комплекс розмежованих у просторі та в часі технологічних процесів, що є складовими загального процесу виробництва та експлуатації відповідних їм пристроїв з метою забезпечення їх експлуатаційної готовності [56, 69, 138, 141, 156].

Ефективність випробувань, як інтегрована характеристика їх реалізації, визначається рядом критеріїв та їх складових, що забезпечують ті чи інші раціональні параметри процесу й інструментальних засобів верифікації СКРП. Визначальні параметри ефективності випробувань та їх значення наведені в таблиці 2.1 [69, 174].

Критерій оптимізації для кожного критерію ефективності визначає раціональність максимуму або мінімуму для відповідного чисельного вимірювання параметру ефективності при постановці відповідної задачі оптимізації, кінцева ціль якої зводиться до підвищення експлуатаційної готовності СКРП [175].

Кожен з параметрів ефективності, наведених у таблиці 2.1, деталізується на складові, залежно від типу об'єкту верифікації, його конфігурації, області

впровадження й застосування, характеристик методів випробувань та випробувальних засобів тощо [8, 9, 13 – 19, 24].

Таблиця 2.1 – Основні критерії ефективності випробувань СКРП

№ з/п	Критерій ефективності	Умовне позначення	Зміст (наповнення) основи критерію	Критерій оптимізації
1.	Ресурси на підготовку до випробувань	Множина S_{nb}	Матеріальні, кваліфікаційні, часові ресурси на синтез моделей та інших інструментальних засобів випробувань	$[S_{nb}] \rightarrow \min$
2.	Ресурси на проведення випробувань	Множина S_{npe}	Матеріальні, кваліфікаційні, часові ресурси на виконання випробувань на базі діючих методів, моделей та засобів	$[S_{npe}] \rightarrow \min$
3.	Ресурси на оброблення результатів випробувань	Множина S_{ope}	Матеріальні, кваліфікаційні, часові ресурси на оброблення результатів випробувань та формування висновків на їх основі	$[S_{ope}] \rightarrow \min$
4.	Глибина (тестове покриття) випробувань	Множина M_{mn}	Множина об'єктивних характеристик СКРП, що досліджується під час випробувань (функції, технологічні ситуації, обладнання системи)	$[M_{mn}] \rightarrow \max$
5.	Достовірність випробувань	Ймовірність P_e	Ймовірнісна характеристика, що визначає відповідність результатів випробувань об'єктивним параметрам СКРП у зоні обмежень випробувань	$P_e \rightarrow \max$

Ресурси на підготовку до проведення (S_{nb}) та на проведення (S_{npe}) випробувань є взаємопов'язаними параметрами, що залежать від якості формування моделей для випробувань [56, 67 – 69, 104, 141].

Найважливішим параметром раціоналізації функціональних випробувань СКРП, що безпосередньо впливає на їх експлуатаційну готовність відповідно до

формули (1.5), є глибина контролю, яка для мікропроцесорних програмованих СКРП визначається тестовим покриттям випробувань. Тестове покриття (M_{mn}) у свою чергу визначається можливостями й обмеженнями моделі для випробувань та способом її інтеграції з об'єктом випробувань [56, 69].

Достовірність випробувань (P_e) залежить як від якості формування моделі для випробувань, так і від повноти та коректності програми та методики випробувань (ПМВ), яка враховує, в свою чергу, параметри тестового покриття [157, 174].

З урахуванням можливої деталізації параметрів, наведених у таблиці 2.1, узагальнений цільовий функціонал Φ_B вдосконалення методів та моделей функціональних випробувань формується як

$$\Phi_B(S_{не}, S_{прв}, S_{орв}, M_{mn}, P_e) = \begin{cases} S_{не} = \begin{cases} K_{nm} \rightarrow \min, \\ N_{ном} \rightarrow \min, \\ T_{см} \rightarrow \min, \end{cases} \\ S_{прв} = \begin{cases} K_{прв} \rightarrow \min, \\ T_{прв} \rightarrow \min, \end{cases} \\ [M_{mn}] = [M_{\phi} \cup M_{окк} \cup M_{мс} \cup M_{наз}] \rightarrow \max, \\ P_e = \begin{cases} P_m \rightarrow \max, \\ P_{орв} \rightarrow \max, \end{cases} \end{cases} \quad (2.1)$$

де K_{nm} – кваліфікаційні ресурси на підготовку моделей для випробувань;

$N_{ном}$ – прогнозована кількість помилок проектувальників моделей для випробувань при здійсненні їхнього синтезу;

$T_{см}$ – часові ресурси (тривалість) підготовки моделей для випробувань;

$K_{прв}$ – кваліфікаційні ресурси на реалізацію процесу випробувань;

$T_{прв}$ – часові ресурси (тривалість) проведення випробувань;

M_{ϕ} – множина функцій СКРП, що відтворюється в процесі випробувань;

$M_{окк}$ – множина ОКК СКРП, стан та функціонування яких відтворюються в процесі випробувань;

$M_{мс}$ – множина технологічних ситуацій, що відтворюються в рамках технологічного об'єкту СКРП у процесі випробувань;

$M_{паз}$ – множина програмно-апаратних засобів (ПАЗ) СКРП, що входить до об'єкту випробувань;

P_m – ймовірнісна характеристика, що визначає достовірність випробувань у контексті адекватності моделі для випробувань;

$P_{орв}$ – ймовірнісна характеристика, що визначає достовірність оброблення результатів випробувань (методами теорії планування експерименту).

Серед наведених у таблиці 2.1 та формулі (2.1) критеріїв оптимізації з позиції повноти функціональних випробувань основне значення має тестове покриття характеристик СКРП, що визначає глибину контролю [56, 68, 69].

Належне забезпечення тестового покриття безпосередньо пов'язано із іншими критеріями оптимізації випробувань, причому орієнтований взаємозв'язок між ними за умови збереження первинних вихідних даних (складу обладнання, обсягу та мети випробувань тощо) визначається як

$$[M_{mn}] \nearrow \Rightarrow \begin{cases} S_{не} \nearrow, \\ S_{прв} \nearrow, \\ P_{\epsilon} \nearrow, \end{cases} \quad [M_{mn}] \swarrow \Rightarrow \begin{cases} S_{не} \swarrow, \\ S_{прв} \swarrow, \\ P_{\epsilon} \swarrow. \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\begin{cases} S_{не} \nearrow \\ S_{прв} \nearrow \\ P_{\epsilon} \nearrow \end{cases} \Rightarrow [M_{mn}] \nearrow, \quad \begin{cases} S_{не} \swarrow \\ S_{прв} \swarrow \\ P_{\epsilon} \swarrow \end{cases} \Rightarrow [M_{mn}] \swarrow.$$

Зв'язок між параметрами оптимізації випробувань є гомоморфним (сюр'єктивним), оскільки збільшення або зменшення значень ресурсних і ймовірнісних критеріїв пов'язано з рядом факторів, між якими відсутній взаємно-однозначний зв'язок із тестовим покриттям. До таких факторів належать, зокрема, вартість випробувального обладнання, тривалість випробувань, вартість підготовки фахівців для виконання випробувань, спосіб оброблення результатів випробувань тощо [56, 69].

При цьому збільшення чисельних значень інших параметрів оптимізації зі збільшенням обсягу тестового покриття і навпаки пояснюється факторами, наведеними в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Пояснення взаємозв'язку між параметрами оптимізації

№ п/п	Параметри (взаємозв'язок)	Складова параметру	Пояснення взаємозв'язку
1.	$M_{mn} \uparrow \Rightarrow S_{не} \uparrow$ $M_{mn} \downarrow \Rightarrow S_{не} \downarrow$	$K_{nm} \uparrow \downarrow$	Опрацювання та прогнозування більшої частини складових тестового покриття вимагає більшої кваліфікації персоналу в техніці побудови та технології функціонування СКРП (і навпаки).
		$N_{ном} \uparrow \downarrow$	Виходячи з інтенсивності помилок людини ($10^{-4} - 10^{-2}$ 1/операція) збільшення обсягу операцій по опрацюванню елементів тестового покриття збільшує кількість помилок проектувальника моделі для випробувань (і навпаки).
		$T_{см} \uparrow \downarrow$	Збільшення кількості складових, що охоплюються моделлю для випробувань, призводить до збільшення тривалості підготовки моделі (і навпаки).
2.	$M_{mn} \uparrow \Rightarrow S_{прв} \uparrow$ $M_{mn} \downarrow \Rightarrow S_{прв} \downarrow$	$K_{прв} \uparrow \downarrow$	Збільшення кількості складових, що опрацьовуються при проведенні випробувань, вимагає більшої кваліфікації від персоналу, що проводить випробування з точки зору опрацювання всіх зв'язків, залежностей, умов тощо (і навпаки).
		$T_{прв} \uparrow \downarrow$	Збільшення кількості складових, що опрацьовується при проведенні випробувань, призводить до збільшення тривалості випробувань.
3.	$M_{mn} \uparrow \Rightarrow P_{\epsilon} \uparrow$ $M_{mn} \downarrow \Rightarrow P_{\epsilon} \downarrow$	$P_{\mathcal{M}} \uparrow \downarrow$	Збільшення тестового покриття підвищує адекватність моделі для випробувань з позиції її відповідності кількісним характеристикам об'єкта випробувань;
		$P_{орв} \uparrow \downarrow$	Охоплення більшої частини функціональних і технічних складових СКРП при випробуваннях збільшує статистичний обсяг даних для оброблення результатів випробувань, що відповідно до законів математичної статистики підвищує достовірність оброблення результатів випробувань.

Як впливає з наведених вище виразів (2.2), формули (2.1), таблиць 2.1 і 2.2 має місце бути протиріччя між параметрами оптимізації, враховуючи

доцільність мінімізації значень $[S_{ne}]$, $[S_{npe}]$ та максималізації параметрів $[M_{mn}]$ і P_e . Дане протиріччя вимагає вибору раціонального співвідношення між параметрами оптимізації.

При цьому слід зазначити, що ресурсні параметри $[S_{ne}]$, $[S_{npe}]$ є суто економічними і визначають лише собівартість, але ніяк не вартість випробувань (їх підготовки та реалізації). У той же час тестове покриття $[M_{mn}]$ та достовірність випробувань P_e безпосередньо визначають ступінь верифікованості СКРП, у тому числі – об'єктивність підтвердження показників призначення системи, зокрема – значень її ФБ, безвідмовності тощо. Залежно від якості верифікації цих параметрів безпосередньо визначається надійність та безпека використання СКРП у процесі експлуатації [52, 56, 68, 69, 152].

Таким чином, з точки зору забезпечення виконання показників призначення СКРП протиріччя між $[M_{mn}] \rightarrow \max$ та $[S_{ne}] \rightarrow \min$, $[S_{npe}] \rightarrow \min$ не є критичним, у той час як пряма гомоморфна залежність між $[M_{mn}]$ та P_e дає підставу стверджувати, що тестове покриття є ключовим параметром оптимізації при розробленні методів та моделей випробувань таких систем. У той же час додержання ресурсних показників є важливим з точки зору економічної доцільності в межах встановлених лімітів на розроблення, виробництво та супроводження СКРП (невід'ємною складовою цих процесів є верифікація та моніторинг складових систем) та з умовою не погіршення показників глибини контролю та достовірності випробувань, які характеризують якість їх виконання.

Отже, з позиції ранжування пріоритетів умовне співвідношення між всіма критеріями оптимізації випробувань СКРП відповідно до цільового функціоналу функції (2.1) зображується рисунком 2.1.

В якості оптимальних значень для функціональних параметрів обрана верхня межа можливої варіації, а для ресурсних – нижня. Область припустимих значень функціональних параметрів випробувань обмежується нижньою межею функціональних параметрів, а для ресурсних параметрів – аналогічною, але верхньою межею. Між верхньою межею ресурсних параметрів та нижньою межею функціональних параметрів розташована область неприпустимих значень для всіх критеріїв оптимізації [8].

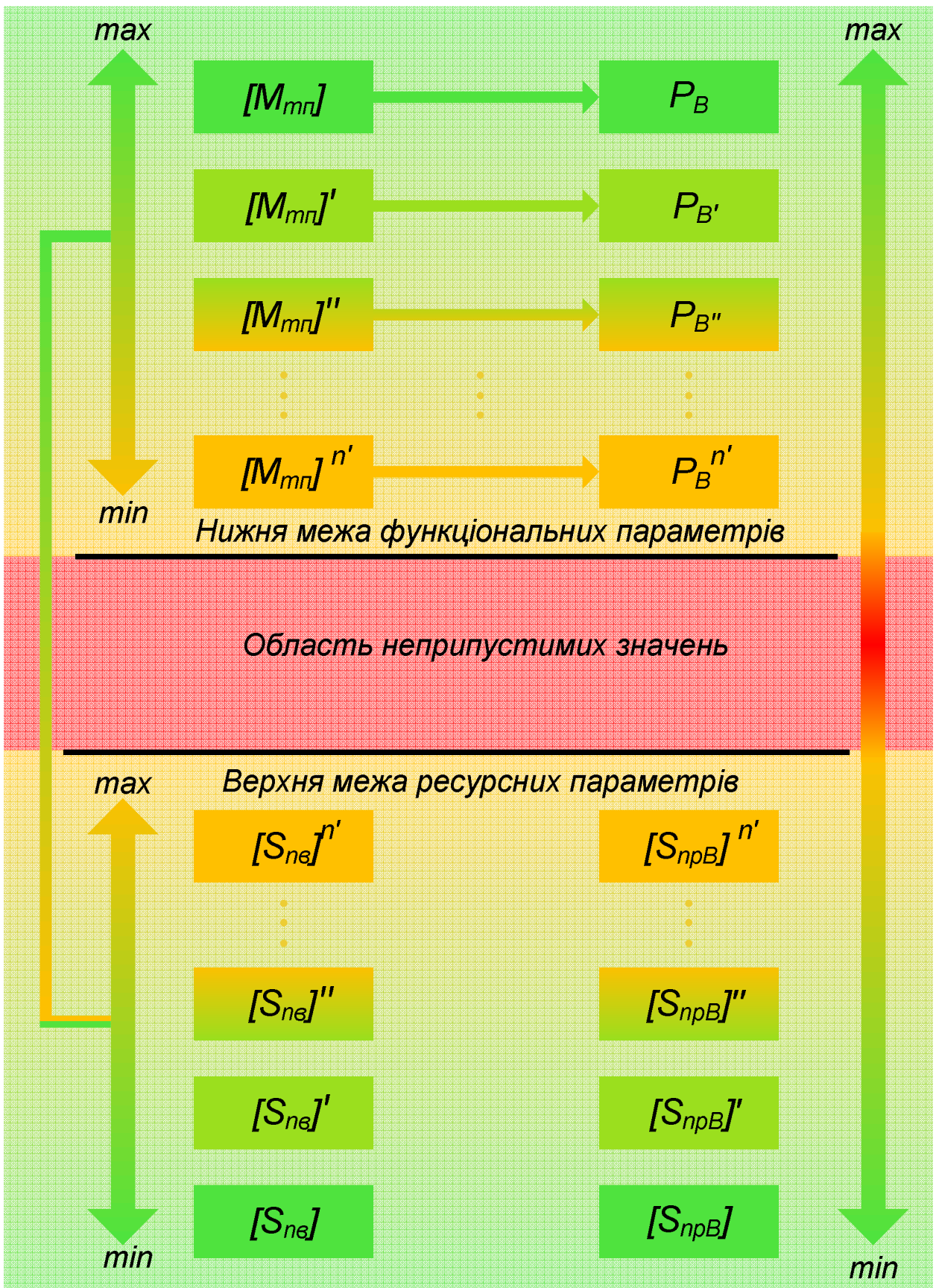


Рисунок 2.1 – Розподіл пріоритетності функціональних і ресурсних параметрів випробувань СКРП

В свою чергу зазначена область неприпустимих значень визначається такими обмеженнями для двох категорій параметрів:

– верхня межа ресурсних параметрів – фактичним кошторисом на виконання робіт по розробленню, виробництву, ТО та/або ремонту СКРП із урахуванням остаточних статей витрат, передбачених на випробування (їх підготовку та реалізацію);

– нижня межа ресурсних параметрів – нормативно-технічними вимогами до СКРП, включаючи вимоги національних та міжнародних стандартів (з позиції ФБ, надійності та показників призначення), технічного завдання (ТЗ), технічних умов (ТУ), технічних вимог (ТВ) тощо.

З урахуванням пріоритетності параметрів $[M_{mn}] \rightarrow \max$ та $P_\epsilon \rightarrow \max$ порівняно з $[S_{ne}] \rightarrow \min$ та $[S_{npe}] \rightarrow \min$ відповідно до рисунку 2.1 вибір значення $[M_{mn}]$ із відповідним йому значенням P_ϵ повинен відбуватися на такій найбільшій відстані від верхньої межі функціональних параметрів, щоб значення ресурсних параметрів $[S_{ne}]$ та $[S_{npe}]$ знаходилися на найближчій відстані знизу до їх верхньої межі, але не перетинали її (не входили в область неприпустимих значень)

$$\left. \begin{array}{l} [M_{mn}] = [M_{mn}]_{\max}^{y'} \leq [M_{mn}]_{\max} \\ \downarrow \\ P_\epsilon = P_{\epsilon \max}^{y'} \leq P_{\epsilon \max} \end{array} \right| \begin{array}{l} [S_{ne}]_{\max}^{y'} \leq [S_{ne}]_{\max} \\ [S_{npe}]_{\max}^{y'} \leq [S_{npe}]_{\max} \end{array}, \quad (2.3)$$

де y – ступінь дискретної віддаленості параметру від оптимального значення (максимального для функціональних і мінімального для ресурсних параметрів).

Умови, визначені формулами (2.3), визначають припустимість розроблення, виробництво та експлуатацію СКРП за наявних ресурсних і технічних обмеженнях (визначених тендерною документацією, поточним фінансуванням, субвенціями, вимогами нормативних документів тощо). Фактично вони

визначають додержання критеріїв оптимізації при відсутності жодного параметру оптимізації випробувань у зоні неприпустимих значень

$$\forall k \in K_i \subset K \mid k_{\min} \leq k \leq k_{\max}, i = \overline{1, n}, \quad (2.4)$$

де K – множина підмножин параметрів оптимізації випробувань у межах їх варіації;
 K_i – варіативна підмножина параметрів оптимізації за певним критерієм;
 k – критерій оптимізації в межах варіативних значень.

Значення K при цьому охоплює всю повноту параметрів оптимізації, зображених на рисунку 2.1. Значення K_i визначає конкретний параметр оптимізації, а значення k – його чисельне вимірювання.

При розділенні параметрів оптимізації на функціональні та ресурсні з урахуванням синтезу виразів (2.3) і (2.4) відповідні умови додержання припустимих значень формалізуються як

$$\begin{cases} \forall k_\phi \in K_{\phi i} \subset K_\phi \subset K \mid k_\phi \geq k_{\phi \min}, k_\phi \rightarrow \max, \\ \forall k_p \in K_{pi} \subset K_p \subset K \mid k_p \leq k_{p \max}, k_p \rightarrow \min, \end{cases} i = \overline{1, n}, \quad (2.5)$$

де K_ϕ, K_p – відповідно функціональна та ресурсна підмножина критеріїв оптимізації випробувань;

$K_{\phi i}, K_{pi}$ – критерії оптимізації відповідно в рамках функціональної та ресурсної підмножини;

k_ϕ, k_p – чисельні значення критеріїв оптимізації випробувань відповідно функціональної та ресурсної підмножин.

У разі неможливості дотримання зазначених умов (2.5) без зміни вихідних даних СКРП визнається такою, що не відповідає вимогам ТЗ (ТУ, ТВ, інших нормативних документів) та не підлягає випробуванням

$$\left. \begin{array}{l} \exists k \in K_i \subset K \mid k < k_{\min} \vee k > k_{\max} : \\ \left[\begin{array}{l} \exists k_\phi \in K_{\phi i} \subset K_\phi \subset K \mid k_\phi < k_{\phi \min}, \\ \exists k_p \in K_{pi} \subset K_p \subset K \mid k_p > k_{p \max}, \end{array} \right. \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} \text{Невідповідність СКРП} \\ \text{вимогам ТЗ (ТУ, ТВ)} \end{array} \quad (2.6)$$

Таким чином, при розробленні, виробництві, ТО та/або експлуатації СКРП необхідним є додержання наведених умов припустимості випробувань із урахуванням критеріїв оптимізації. Ключовим критерієм слід вважати тестове покриття та пов'язану з ним достовірність випробувань, раціоналізація яких відбувається з урахуванням ресурсних параметрів відповідно до умов (2.5), (2.6).

Отже, результуюча цільова функція раціоналізації випробувань становить поєднання системи (2.1) із виразами (2.5) і (2.6).

2.2 Умовна формалізація глибини контролю функціональних параметрів

Складові множини глибини контролю (тестового покриття) M_{ϕ} , $M_{окк}$, $M_{тс}$, $M_{паз} \subset M_{mn}$ є взаємопов'язаними параметрами, що визначають інтегроване тестове покриття $F_{iim}(M_{mn})$, яке є функцією складових множини M_{mn} і визначається як переріз їх модифікованих перетворень [8, 11]

$$F_{iim}(M_{mn}) = [M_{mn}^M] = \left[\bigcap_{i=1}^4 M_{mn_i}^M \right] = \left[M_{\phi}^M \cap M_{окк}^M \cap M_{тс}^M \cap M_{паз}^M \right], \quad (2.7)$$

де M_{mn}^M – модифікована множина тестового покриття;

$M_{mn_i}^M$ – модифіковані множини складових тестового покриття (1 – функцій, 2 – ОКК, 3 – технологічних ситуацій, 4 – ПАЗ системи).

Графічна інтерпретація формули (2.7) на базі діаграм Ейлера-Вена наведена на рисунку 2.2.

Зазначена в формулі (2.7) модифікація визначає сумарну кількість логічних зв'язків бієктивного характеру між елементами підмножин множини M_{mn} в контексті забезпечення їх відтворення засобами моделі для випробувань

$$M_{mn}^M = M_{\phi} \times M_{окк} \times M_{тс} \times M_{паз}, \quad (2.8)$$

$$\begin{cases} M_{\phi}^M = M_{\phi} \times (M_{окк} \cup M_{тс} \cup M_{паз}), \\ M_{окк}^M = M_{окк} \times (M_{\phi} \cup M_{тс} \cup M_{паз}), \\ M_{тс}^M = M_{тс} \times (M_{\phi} \cup M_{окк} \cup M_{паз}), \\ M_{паз}^M = M_{паз} \times (M_{\phi} \cup M_{окк} \cup M_{тс}), \end{cases} \quad (2.9)$$

де $M_{ij} = M_i \cup M_j$ – об'єднання множин, по відношенням бієктивних зв'язків між якими відбувається сумування ($i, j = \overline{1,4}$);

$i, j = 1$ – функції (Ф), 2 – ОКК, 3 – технологічні ситуації (ТС), 4 – ПАЗ.

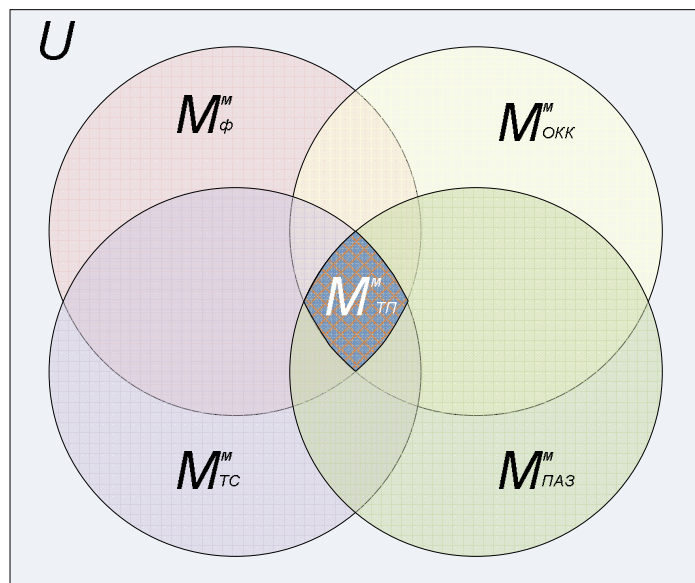


Рисунок 2.2 – Діаграма Ейлера-Вена формування модифікованої множини тестового покриття СКРП

Виходячи з формул (2.7) – (2.9) відношення $\prod_{ij} M_{ij}$ у контексті кількості логічних зв'язків між елементами множин M_{mn} визначається чисельною характеристикою, яка прямо або опосередковано визначає кількість зазначених зв'язків. Із гіпотетичним лінійним співвідношенням між потужностями модифікованих множин $M_{mn_i}^M$ та кількістю відповідних бієктивних зв'язків між ними зазначене співвідношення визначається характеристичними параметрами x_j , значення яких встановлюються системою лінійних рівнянь [175 – 177]

$$\left\{ \begin{aligned} [M_{\phi}^M] &= x_2 \sum_{M_{\phi_окк}} z_{12} + x_3 \sum_{M_{\phi_мс}} z_{13} + x_4 \sum_{M_{\phi_паз}} z_{14} = x_j \sum_{M_1} \sum_{M_j} z_{1j}, j = \overline{2,3,4}, \\ [M_{окк}^M] &= x_1 \sum_{M_{окк_ф}} z_{21} + x_3 \sum_{M_{окк_мс}} z_{23} + x_4 \sum_{M_{окк_паз}} z_{24} = x_j \sum_{M_2} \sum_{M_j} z_{2j}, j = \overline{1,3,4}, \\ [M_{мс}^M] &= x_1 \sum_{M_{мс_ф}} z_{31} + x_2 \sum_{M_{ос_окк}} z_{32} + x_4 \sum_{M_{мс_паз}} z_{34} = x_j \sum_{M_3} \sum_{M_j} z_{3j}, j = \overline{1,2,4}, \\ [M_{паз}^M] &= x_1 \sum_{M_{паз_ф}} z_{41} + x_2 \sum_{M_{паз_окк}} z_{42} + x_3 \sum_{M_{паз_мс}} z_{43} = x_j \sum_{M_4} \sum_{M_j} z_{4j}, j = \overline{1,2,3}, \end{aligned} \right. \quad (2.10)$$

де z_{ij} – бієктивні зв'язки між елементами множин M_i та M_j .

Система рівнянь (2.10) у матричному вигляді (із урахуванням нульових значень окремих бієктивних зв'язків представляється як [177]

$$\|Z_{\phiз}\| \times \|X_x\| = \|M_{mn}^M\|, \quad (2.11)$$

де $\|Z_{\phiз}\| = \left\| \sum_{M_j} z_{ij} \right\| = \left\| \begin{array}{cccc} 0 & \sum_{M_{12}} z_{12} & \sum_{M_{13}} z_{13} & \sum_{M_{14}} z_{14} \\ \sum_{M_{21}} z_{21} & 0 & \sum_{M_{23}} z_{23} & \sum_{M_{24}} z_{24} \\ \sum_{M_{31}} z_{31} & \sum_{M_{32}} z_{32} & 0 & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & \sum_{M_{42}} z_{42} & \sum_{M_{43}} z_{43} & 0 \end{array} \right\|$ – матриця бієктивних зв'язків;

$$\|X_x\| = \|x_j\| = \left\| \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{array} \right\|$$
 – матриця характеристичних параметрів;

$$\|M_{mn}^M\| = \left\| \sum_i M_{mn-i}^M \right\| = \left\| \begin{array}{c} [M_{\phi}^M] \\ [M_{окк}^M] \\ [M_{мс}^M] \\ [M_{паз}^M] \end{array} \right\|$$
 – матриця тестового покриття.

З точки зору лінійної алгебри [177] матриці $\|Z_{бз}\|$, $\|X_x\|$ та $\|M_{mn}^m\|$ являють собою відповідно матрицю системи, матрицю (стовпець) невідомих та матрицю (стовпець) вільних коефіцієнтів.

Шляхом синтезу виразів (2.10) і (2.11) формується повна форма запису системи лінійних рівнянь, що визначає взаємозв'язок між параметрами тестового покриття СКРП (потужностями модифікованих множин, кількістю зв'язків між їх елементами та характеристичними параметрами), у матричному вигляді

$$\left\| \begin{array}{cccc} 0 & \sum_{M_{12}} z_{12} & \sum_{M_{13}} z_{13} & \sum_{M_{14}} z_{14} \\ \sum_{M_{21}} z_{21} & 0 & \sum_{M_{23}} z_{23} & \sum_{M_{24}} z_{24} \\ \sum_{M_{31}} z_{31} & \sum_{M_{32}} z_{32} & 0 & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & \sum_{M_{42}} z_{42} & \sum_{M_{43}} z_{43} & 0 \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{c} [M_{\phi}^m] \\ [M_{окк}^m] \\ [M_{mc}^m] \\ [M_{наз}^m] \end{array} \right\|. \quad (2.12)$$

Система (2.12) при цьому дозволяє визначити співвідношення між складовими відповідних матриць (тестовим покриттям, кількістю бієктивних зв'язків та характеристичними параметрами), проте встановлення кожної характеристики окремо вимагає наявності відомих окремих даних.

Виходячи з того, що значення кількості бієктивних зв'язків між елементами множин M_{ij} та потужності модифікованих множин тестового покриття $M_{mn_i}^m$ завжди є додатними значеннями, фактична величина тестового покриття прямопропорційно зростає зі збільшенням кожного з характеристичних коефіцієнтів. При цьому в умовах сталого значення кількості бієктивних зв'язків між складовими множини M_{ij} має місце бути взаємно-однозначна відповідність (ізоморфізм) між зміненням значень відповідних параметрів

$$\begin{cases} \exists (x_j \in X_x) \nearrow \Leftrightarrow [M_{mn}] \nearrow, \\ \exists (x_j \in X_x) \swarrow \Leftrightarrow [M_{mn}] \swarrow, \end{cases} [M_{mn}] \geq 0, \forall z_{ij} \geq 0, \forall z_{ij} = const. \quad (2.13)$$

Отже, з урахуванням умов (2.13) другий знизу критерій у функціоналі (2.1) формулюється таким чином

$$\left[X_x \right] = \sum_{j=1}^4 x_j \rightarrow \max. \quad (2.14)$$

Виконання критерію (2.14) має відбуватися з урахуванням обмежень, визначених формулами (2.5), (2.6).

Для деталізації параметрів x_j у контексті їх співвідношення з кількістю бієктивних зв'язків z_{ij} та елементами тестового покриття $M_{mn_i}^m$ необхідно формалізоване розв'язання системи рівнянь (2.12).

За методом Крамера [177] кожне значення x_j визначається як $\Delta_{x_j} / \Delta_{Z_{\bar{0}3}}$, де Δ_{x_j} – допоміжні визначники для кожного значення x_j , $\Delta_{Z_{\bar{0}3}}$ – головний визначник матриці бієктивних зв'язків (матриці системи). Розв'язання системи за правилом Крамера наведено в додатку Б.

Поєднуючи за методом Крамера розв'язок системи (2.12) шляхом синтезу виразів (Б.3) – (Б.7) додатку Б, приймаючи $\sum_{M_{ij}} z_{ij} = Z_{ij} = Z_{ji} = \sum_{M_{ji}} z_{ji}$, $[M_j^m] = m_j$ формується деталізуючий вираз для критерію (2.14).

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = \frac{\Delta_{x_1}}{\Delta_{Z_{\bar{0}3}}} = \frac{2m_{\phi}Z_{23} + m_{окк}Z_{34}(Z_{12}Z_{34} - Z_{13}Z_{24} - Z_{14}Z_{23}) + m_{нас}Z_{23}(Z_{14}Z_{23} - Z_{12}Z_{34} - Z_{13}Z_{24}) + m_{mc}Z_{24}(Z_{13}Z_{24} - Z_{12}Z_{34} - Z_{14}Z_{23})}{(Z_{12}Z_{34})^2 + (Z_{13}Z_{24})^2 + (Z_{14}Z_{23})^2 - 2(Z_{12}Z_{14}Z_{23}Z_{34} + Z_{12}Z_{13}Z_{24}Z_{34} + Z_{13}Z_{14}Z_{23}Z_{24})} \rightarrow \max, \\ x_2 = \frac{\Delta_{x_2}}{\Delta_{Z_{\bar{0}3}}} = \frac{m_{окк}Z_{13}Z_{14}Z_{34} + m_{\phi}Z_{34}(Z_{12}Z_{34} + Z_{13}Z_{24} + Z_{14}Z_{23}) + m_{нас}Z_{13}(Z_{13}Z_{24} - Z_{12}Z_{34} - Z_{14}Z_{23}) + m_{mc}Z_{14}(Z_{14}Z_{23} - Z_{12}Z_{34} - Z_{13}Z_{24})}{(Z_{12}Z_{34})^2 + (Z_{13}Z_{24})^2 + (Z_{14}Z_{23})^2 - 2(Z_{12}Z_{14}Z_{23}Z_{34} + Z_{12}Z_{13}Z_{24}Z_{34} + Z_{13}Z_{14}Z_{23}Z_{24})} \rightarrow \max, \\ x_3 = \frac{\Delta_{x_3}}{\Delta_{Z_{\bar{0}3}}} = \frac{2m_{mc}Z_{12}Z_{14}Z_{24} + m_{нас}Z_{12}(Z_{12}Z_{34} - Z_{13}Z_{24} - Z_{14}Z_{23}) + m_{окк}Z_{14}(Z_{14}Z_{23} - Z_{12}Z_{34} - Z_{13}Z_{24}) + m_{\phi}Z_{24}(Z_{13}Z_{24} - Z_{12}Z_{34} - Z_{14}Z_{23})}{(Z_{12}Z_{34})^2 + (Z_{13}Z_{24})^2 + (Z_{14}Z_{23})^2 - 2(Z_{12}Z_{14}Z_{23}Z_{34} + Z_{12}Z_{13}Z_{24}Z_{34} + Z_{13}Z_{14}Z_{23}Z_{24})} \rightarrow \max, \\ x_4 = \frac{\Delta_{x_4}}{\Delta_{Z_{\bar{0}3}}} = \frac{2m_{нас}Z_{12}Z_{13}Z_{23} + m_{mc}Z_{12}(Z_{12}Z_{34} - Z_{14}Z_{23} - Z_{13}Z_{24}) + m_{окк}Z_{13}(Z_{13}Z_{24} - Z_{14}Z_{23} - Z_{12}Z_{34}) + m_{\phi}Z_{23}(Z_{14}Z_{23} - Z_{12}Z_{34} - Z_{13}Z_{24})}{(Z_{12}Z_{34})^2 + (Z_{13}Z_{24})^2 + (Z_{14}Z_{23})^2 - 2(Z_{12}Z_{14}Z_{23}Z_{34} + Z_{12}Z_{13}Z_{24}Z_{34} + Z_{13}Z_{14}Z_{23}Z_{24})} \rightarrow \max. \end{array} \right. \quad (2.15)$$

Вбачаючи у виразах (2.15) закономірності поєднань Z_{ij} , формуються наступні укрупнені характеристичні змінні, що дозволяють орієнтовано оцінити виконання зазначених умов

$$Z_{12}Z_{34} = Y_1, Z_{13}Z_{24} = Y_2, Z_{14}Z_{23} = Y_3. \quad (2.16)$$

Зазначені змінні в повному обсязі визначають усі комбінації взаємних бієктивних зв'язків між класами еквівалентності ε_j на множинах функцій, ОКК, ТС та ПАЗ СКРП (рисунок 2.3).

В таких умовах, відповідно до [56, 69, 177], поєднання множинних представлень Y_k визначає поєднання всіх множин бієктивних зв'язків Z_{ij} на множинах M_j

$$\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 Z_{ij(ji)} = \sum_{i=1}^4 Z_{ij} = \sum_{j=1}^4 Z_{ji} = \bigcup_{k=1}^3 Y_k. \quad (2.17)$$

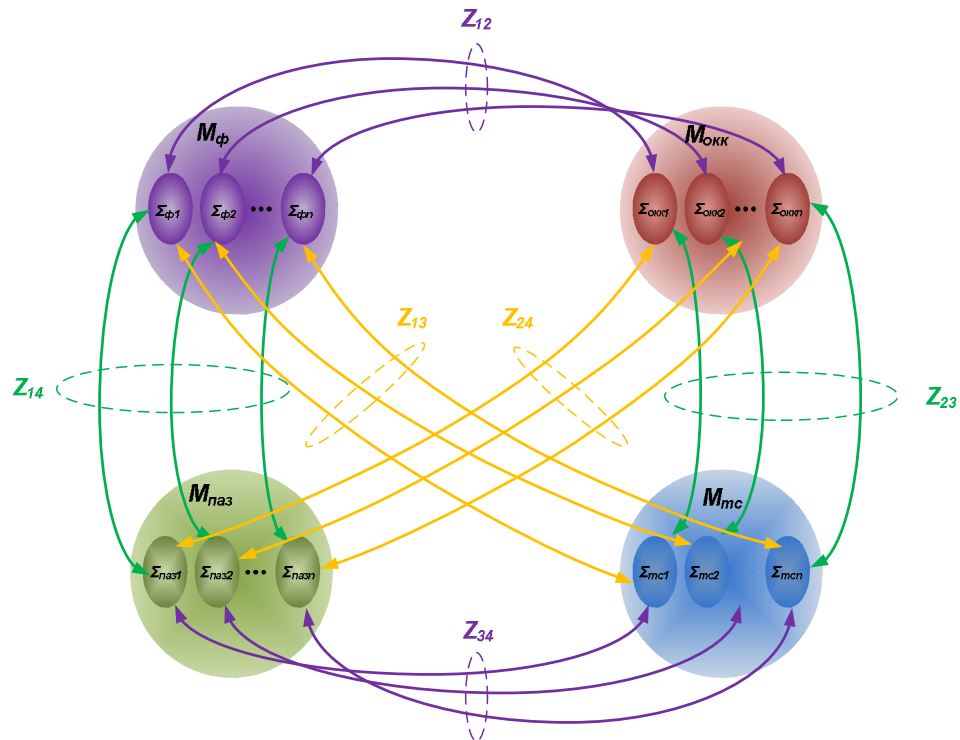


Рисунок 2.3 – Діаграма бієктивних зв'язків між класами еквівалентності множин, що визначають глибину контролю СКРП

Переходячи від множин зв'язків до їх потужностей складові виразу (2.15) із урахуванням (2.16), (2.17) модифікуються таким чином

$$\left\{ \begin{aligned} x_1 &= \frac{\Delta_{x_1}}{\Delta_{Z_{\phi_3}}} = \frac{2m_{\phi}Z_{23} + m_{окк}Z_{34}(Y_1 - Y_2 - Y_3) + m_{наз}Z_{23}(Y_3 - Y_1 - Y_2) + m_{мс}Z_{24}(Y_2 - Y_1 - Y_3)}{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3)} \rightarrow \max, \\ x_2 &= \frac{\Delta_{x_2}}{\Delta_{Z_{\phi_3}}} = \frac{m_{окк}Z_{13}Z_{14}Z_{34} + m_{\phi}Z_{34}(Y_1 + Y_2 + Y_3) + m_{наз}Z_{13}(Y_2 - Y_1 - Y_3) + m_{мс}Z_{14}(Y_3 - Y_1 - Y_2)}{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3)} \rightarrow \max, \\ x_3 &= \frac{\Delta_{x_3}}{\Delta_{Z_{\phi_3}}} = \frac{2m_{мс}Z_{12}Z_{14}Z_{24} + m_{наз}Z_{12}(Y_1 - Y_2 - Y_3) + m_{окк}Z_{14}(Y_3 - Y_1 - Y_2) + m_{\phi}Z_{24}(Y_2 - Y_1 - Y_3)}{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3)} \rightarrow \max, \\ x_4 &= \frac{\Delta_{x_4}}{\Delta_{Z_{\phi_3}}} = \frac{2m_{наз}Z_{12}Z_{13}Z_{23} + m_{мс}Z_{12}(Y_1 - Y_3 - Y_2) + m_{окк}Z_{13}(Y_2 - Y_3 - Y_1) + m_{\phi}Z_{23}(Y_3 - Y_1 - Y_2)}{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3)} \rightarrow \max. \end{aligned} \right. \quad (2.18)$$

Вирази (2.18) у цілому визначають багатofакторність впливу на тестове покриття різних складових при реалізації функціональних випробувань ЗАТ, що визначається як

$$M_{mn}^M = M_{mn}^M(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3) = M_{mn}^M(m_{\phi}, m_{окк}, m_{мс}, m_{наз}, \bar{Z}), \quad (2.19)$$

де $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$ – гіпертрофовані значення параметрів x_1, x_2 і x_3 без урахування зв'язків між складовими тестового покриття;

\bar{Z} – поєднання зв'язків $Z_{12,14}, Z_{23,24}, Z_{13,34}$, з урахуванням діаграми на рисунку 2.3 та виразів (2.18).

Врахування усіх відповідних факторів, що визначаються виразами (2.18) і (2.26), є складною багатовимірною задачею, що формується багатопросторовим функціоналом. Вирішення цієї задачі із врахуванням та дослідженням усіх взаємопов'язаних факторів є принципово складним та недоцільним, враховуючи фактичні обмеження моделей для випробувань, які є застосовними на практиці [139].

З метою формування прикладної моделі оцінки тестового покриття, що становить основу цільового функціоналу даного дослідження, для її функціонування вводяться такі вихідні обмеження:

– зв'язки $Z_{12,14}$, $Z_{23,24}$, $Z_{13,34}$ є взаємно незалежними, що обґрунтовується відокремленістю забезпечення залежностей параметрів $m_\phi, m_{окк}, m_{мс}, m_{наз}$ за допомогою даних зв'язків (рисунок 2.3);

– будь-яка різниця зведених параметрів Y_1, Y_2, Y_3 за абсолютною величиною не буде перевищувати детермінант системи (2.10), що, відповідно до виразу (2.16), становить знаменник у виразах системи (2.18), незалежно від розташування доданків зі знаком « \leftarrow » у виразі

$$\forall i, j, k \in \overline{1, 2, 3} \Rightarrow \left| Y_i - \sum_{j, k} Y_{j, k} \right| \leq \left| Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1 Y_2 + Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3) \right|, \quad (2.20)$$

що аргументується взаємною бієктивністю усіх попарних зв'язків $Z_{12,14}$, $Z_{23,24}$, $Z_{13,34}$, звідки випливає гіпотеза про рівнозначність потужностей усіх множин $Y_{i, j, k}$;

– у доповнення до попереднього обмеження – сума ліворуч від знаку « \leftarrow » у детермінанті системи (2.16), (2.18) не буде меншою за відповідну суму праворуч від цього знаку, що додатково аргументується першим обмеженням у рамках встановлених умов

$$\sum_{i, j, k} Y_{j, k}^2 \geq \sum_{i, j, k} \prod_{\substack{i, j \\ j, k \\ i, k}} Y_{j, k}. \quad (2.21)$$

Зазначені вище обмеження формалізуються розв'язанням системи квазілінійних нерівностей, що формується в результаті синтезу виразів (2.20) і (2.21) при всіх комбінаціях значень індексів i, j, k для параметрів $Y_{i, j, k}$

$$\begin{cases} |Y_1 - Y_2 - Y_3| \leq |Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1 Y_2 + Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3)|, \\ |Y_2 - Y_1 - Y_3| \leq |Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1 Y_2 + Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3)|, \\ |Y_3 - Y_1 - Y_2| \leq |Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1 Y_2 + Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3)|, \\ Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 \geq 2(Y_1 Y_2 + Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3). \end{cases} \quad (2.22)$$

Система (2.22) дещо спрощується, якщо констатувати, що значення $Y_{i,j,k}$ завжди додатні ($Y_{i,j,k} > 0$), що дає підстави реверсувати знаки « \leftarrow » і « \leftarrow » у лівій частині трьох верхніх виразів у зазначеній системі, усунувши при цьому операцію взяття абсолютної величини. Це обґрунтовується однозначно додатнім значенням потужності відповідних множин, які інтерпретуються множинами $Y_{i,j,k}$ ($[Y_{i,j,k}] > 0$). Усунення операції взяття абсолютної величини буде виправданим в умовах додаткового обмеження, що полягає в первищенні суми будь-яки значень $Y_{j,k}$ над будь-яким значенням Y_i ($Y_j + Y_k > Y_i$), що обґрунтовується чисельністю та біективністю зв'язків на діаграмі рисунку 2.3

$$\forall Y_{i,j,k} > 0 \quad Y_i < \sum_{j,k} Y_{j,k} \Rightarrow \left| Y_i - \sum_{j,k} Y_{j,k} \right| \Rightarrow \sum_{j,k} Y_{j,k} - Y_i = \sum_{-i,+j,+k} Y_{i,j,k}. \quad (2.23)$$

Додатково слід врахувати, що потужності множин $Y_{i,j,k} \in \mathbb{Z}$ є цілими додатними числами ($[Y_{i,j,k}] \in \mathbb{Z}$), що пояснюється цілочисельністю значень кількості зв'язків на множині складових тестового покриття функціональних випробувань. Таким чином, завжди квадрат відповідного значення буде перевищувати саме значення ($[Y_{i,j,k}]^2 > [Y_{i,j,k}]$). Тоді, з урахуванням нижнього виразу у системі (2.29) та умови (2.21), втрачає значення взяття абсолютної величини у правих частинах трьох верхніх виразів у системі (2.22)

$$\begin{aligned} [Y_{i,j,k}]^2 > [Y_{i,j,k}] \\ [Y_{i,j,k}] \in \mathbb{Z} \end{aligned} \Rightarrow \left| \sum_{i,j,k} \prod_{\substack{i,j \\ j,k \\ i,k}} Y_{j,k} \right| = \sum_{i,j,k} \prod_{\substack{i,j \\ j,k \\ i,k}} Y_{j,k}. \quad (2.24)$$

З урахуванням умов і обмежень (2.23) і (2.24) верхні три вирази у системі (2.29) об'єднуються й трансформуються до єдиного вигляду

$$\sum_{j,k} Y_{j,k} - Y_i \leq \sum_{i,j,k} Y_{j,k}^2 - \sum_{i,j,k} \prod_{\substack{i,j \\ j,k \\ i,k}} Y_{j,k}, \quad (2.25)$$

відповідно до чого модифікована система квазілінійних нерівностей (2.22) прийматиме такий вигляд

$$\begin{cases} Y_3 + Y_2 - Y_1 \leq Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3), \\ Y_1 + Y_3 - Y_2 \leq Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3), \\ Y_1 + Y_2 - Y_3 \leq Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3), \\ Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 \geq 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3). \end{cases} \quad (2.26)$$

Здійснюючи сумування верхніх трьох виразів у системі (2.26) отримаємо таку зведену нерівність

$$Y_1 + Y_2 + Y_3 \leq 3(Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2) - 6(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3),$$

у результаті чого, з урахуванням (2.25), система (2.26) приймає такий вигляд

$$\begin{cases} Y_1 + Y_2 + Y_3 \leq 3(Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2) - 6(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3), \\ Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 \geq 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3). \end{cases} \quad (2.27)$$

Розв'язання системи (2.27) становить обмеження моделі оцінки тестового покриття функціональних випробувань мікропроцесорних систем ЗАТ, що задається виразами (2.18). Аналітичне розв'язання даної системи не є простим та вимагає використання чисельних методів, тому доцільним є здійснення його графічним методом. Для цього система (2.26) представляється у зведеному вигляді – таким чином, щоб відтворити перевищення або зменшення відповідних виразів над нульовим значенням

$$\begin{cases} Y_1 + Y_2 + Y_3 - 3(Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2) + 6(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) \leq 0, \\ Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) \geq 0, \\ 3(Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2) - 6(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) - Y_1 - Y_2 - Y_3 \geq 0, \\ Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) \geq 0. \end{cases} \quad (2.28)$$

При вирішенні системи нерівностей (2.28) графічним способом в інтегрованому середовищі MathLAB_6.0 здійснюється побудова двох 3D-поверхонь, які задаються аналітичними виразами, які утворюються шляхом заміни знаків \geq на знак рівності

$$3(Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2) - 6(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) - Y_1 - Y_2 - Y_3 = 0,$$

$$Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) = 0.$$

Побудовані відповідним чином 3D-поверхні визначають область обмежень моделі тестового покриття (рисунок 2.4).

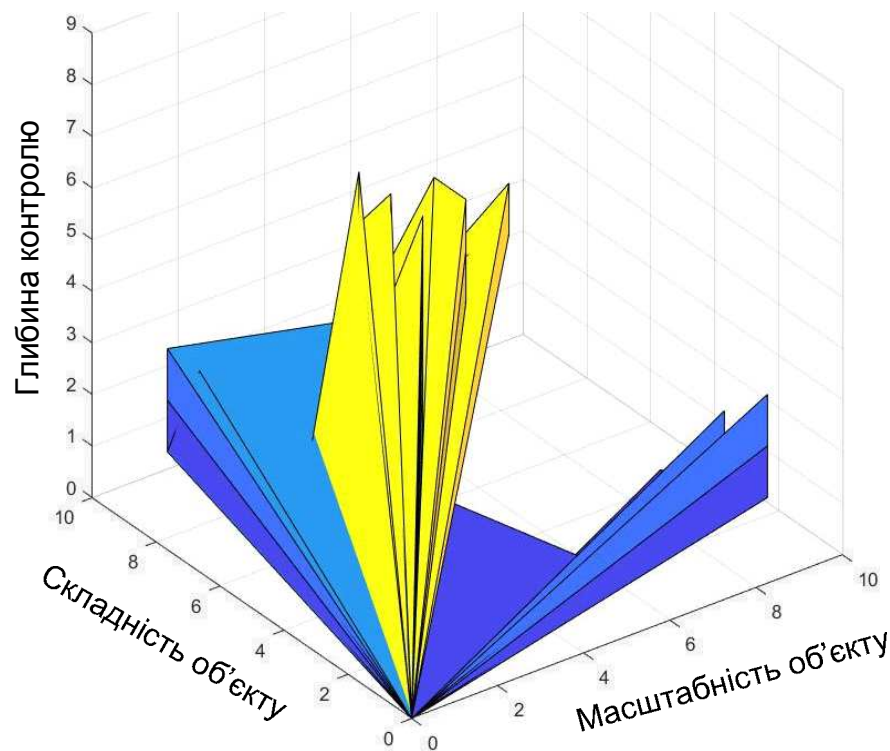


Рисунок 2.4 – Графічні області обмежень моделі тестового покриття функціональних випробувань систем керування рухом поїздів

Встановлені обмеження щодо моделі тестового покриття, враховуючи нерівності (2.34) та поверхні на рисунку 2.4, формують область визначення для цільової функції вдосконалення функціональних випробувань, що викладена у

вигляді виразу (2.25). З урахуванням таких обмежень кожен додатковий мінор при будь-яких значеннях аргументів функцій буде меншим за детермінант: $\Delta x_i < \Delta Z_{\text{обз}}$.

За таких умов спрощена модель тестового покриття у вигляді цільової функції, з урахуванням обмежень (2.28), інтегруючи вирази у формулі (2.18), визначатиметься таким чином

$$\frac{1}{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3)} \rightarrow \max, \quad (2.29)$$

$$Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) \rightarrow \min.$$

Виходячи з того, що параметри Y_i у виразах (2.18) – (2.29) є уніфікованими характеристиками між складовими підмножин тестового покриття (рисунки 2.2, 2.3), враховуючи нижній вираз у співвідношенні (2.27), слід констатувати, що сильні зв'язки (параметри Y_i^2) є домінуючими над слабкими зв'язками (параметри Y_{ij}) у контексті деоптимізації функціональних випробувань за критерієм максималізації охоплюваного тестового покриття [113].

З точки зору експлуатаційних основ залізничної автоматики та телекерування [121, 143, 177] сильні зв'язки визначають у даному випадку «жорсткі» логічні взаємозалежності між технологічними об'єктами СКРП, у той час як слабкі зв'язки відтворюють «м'які» взаємопов'язані співвідношення між функціями окремих засобів СКРП. Зокрема, до перших відносяться взаємозалежності стрілок, сигналів і маршрутів у системах ЕЦ, у той час як до других – контроль стану фідерів живлення в електричних колах, перегорання запобіжників, індикацію діагностичних параметрів тощо.

Таким чином, в умовах встановлених обмежень модель тестового покриття функціональних випробувань базується на більшій технологічній ефективності випробувань для СКРП із меншою кількістю взаємних логічних залежностей між ОКК, що, крім того, логічно погоджується із інтуїтивними міркуваннями з цього приводу, але імплементує їх у формалізовані умови, які використовуються під час синтезу моделей для випробувань.

2.3 Відхилення та адекватність моделі оцінки глибини контролю

Належне використання моделі тестового покриття (2.29) при його оціненні можливе лише за умов її належної адекватності в рамках встановлених обмежень, що визначаються виразами (2.20) – (2.26).

Первинне формування зазначених обмежень встановлюється системою нерівностей (2.22), а кінцеве – після ряду перетворень і припущень – системами (2.28). Достовірність даних припущень визначатиме адекватність моделі, а численна різниця між значеннями, які становлять розв'язання систем нерівностей, (2.22) і (2.28) становлять відхилення (похибку) моделі тестового покриття [62, 113].

Таким чином, для оцінки похибки моделі тестового покриття необхідно розв'язати систему (2.22) і порівняти результати із рішеннями системи (2.28). Аналогічно попередньому підходу, для вирішення цієї задачі здійснюється перетворення системи (2.22) до канонічного вигляду – шляхом перенесення правої/лівої частин нерівностей та уніфікації знаків порівняння

$$\begin{cases} \left| Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) \right| - |Y_1 - Y_2 - Y_3| \geq 0, \\ \left| Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) \right| - |Y_2 - Y_1 - Y_3| \geq 0, \\ \left| Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) \right| - |Y_3 - Y_1 - Y_2| \geq 0, \\ Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) \geq 0. \end{cases} \quad (2.30)$$

Виходячи з обсягу та складності системи нерівностей (2.30) її розв'язання доцільне графічним способом, для чого необхідна побудова поверхонь відповідно до рівнянь, що утворюються ротацією знаків нерівності на знаки рівності у виразах зазначеної системи

$$\begin{aligned} & \left| Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) \right| - |Y_1 - Y_2 - Y_3| = 0, \\ & \left| Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) \right| - |Y_2 - Y_1 - Y_3| = 0, \\ & \left| Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) \right| - |Y_3 - Y_1 - Y_2| = 0, \\ & Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) = 0. \end{aligned}$$

Побудова поверхонь за наведеними виразами, що становлять розв'язок системи (2.30), наведена на рисунку 2.5.

Аналогічно до рисунка 2.4, розв'язок системи нерівностей (2.30) визначається множиною точок, що знаходяться не вище наведеної поверхні.

Визначення відхилень моделі оцінки тестового покриття здійснюється шляхом зіставлення поверхонь, зображених на рисунках 2.4 і 2.5, у єдиних осях, у результаті чого формується порівняльна модель (додаток В, рисунок 2.5).

Для точкової оцінки відхилень (похибки) моделі тестового покриття формуються табульовані значення параметрів Y_i для нерівностей (2.28) і (2.30), які разом із розрахованими значеннями відхилень у програмі MathLAB_6.0 представлені у вигляді таблиці 2.3.

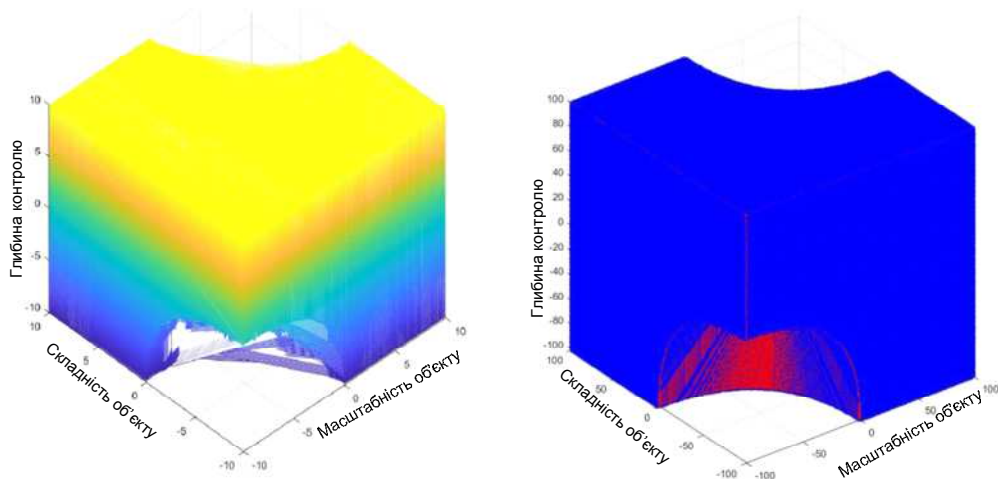


Рисунок 2.5 – Поверхні, які інтерпретують еталонні вирази для оцінки адекватності моделі оцінки тестового покриття

Таблиця 2.3 – Розраховані табульовані значення відхилень моделі оцінки тестового покриття функціональних випробувань

Input parameters			Y3 expression1		Y3 expression2		Margin		Accuracy, %	
Sequence	Y1	Y2	min	max	min	max	of min	of max	of min	of max
1	-100	-100	0	100	1	100	-1	0	100	0
2	-100	-99	0	100	1	100	-1	0	100	0

Продовження таблиці 2.3

3	-100	-98	0	100	1	100	-1	0	100	0
4	-100	-97	0	100	1	100	-1	0	100	0
5	-100	-96	0	100	1	100	-1	0	100	0
6	-100	-95	0	100	1	100	-1	0	100	0
7	-100	-94	0	100	1	100	-1	0	100	0
8	-100	-93	0	100	1	100	-1	0	100	0
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
40401	100	100	-100	-1	-100	-1	0	0	0	0

На підставі встановлених значень похибок моделі оцінки тестового покриття визначаються можливі діапазони використання моделей для випробувань СКРП з урахуванням потужності зв'язків між відповідними складовими. Конкретизація даних значень здійснюється щодо кожного технологічного об'єкту та СКРП на підставі їх топології.

2.4 Висновки до розділу

У процесі виконання другого розділу дисертаційного дослідження досягнуто таких результатів:

1. Визначено та обґрунтовано основні параметри, які визначають ефективність функціональних випробувань СКРП як інструменту забезпечення та підвищення їх експлуатаційної готовності. Встановлено основні зв'язки між даними параметрами, на підставі чого визначено цільовий функціонал дослідження, який зводиться до підвищення тестового покриття функціональних випробувань та зменшення ресурсів на їх проведення.

2. Встановлені та обґрунтовані основні складові глибини контролю СКРП, що визначається тестовим покриттям функціональних випробувань СКРП. Визначені й формалізовані основні зв'язки між зазначеними складовими.

3. Обґрунтовано взаємозв'язок між складовими тестового покриття та іншими параметрами, що характеризують ефективність функціональних випробувань СКРП різного призначення з точки зору підвищення їх експлуатаційної готовності.

4. На підставі встановлених та формалізованих зв'язків між складовими глибини контролю функціональних параметрів СКРП розроблено модель оцінки тестового покриття їх функціональних випробувань, яка базується на лінійних відношеннях між його складовими. Встановлено необхідні обмеження та умови використання зазначеної моделі, на підставі чого із використанням правила Крамера сформовано її приведену варіацію, придатну для застосування при орієнтовній оцінці глибини контролю СКРП з різною потужністю зв'язків між ОКК, програмно-апаратним забезпеченням, функціями та технологічними ситуаціями.

5. Визначено адекватність та діапазони похибок використання моделі оцінки тестового покриття функціональних випробувань СКРП. Встановлені основні рекомендації по застосуванню моделі у процесі реалізації випробувань та підготовки до них.

РОЗДІЛ 3

ГРАФО-ФУНКЦІОНАЛЬНІ МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ОЦІНКИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ГОТОВНОСТІ

Одним з найважливіших етапів контролю функціональних параметрів систем керування руху поїздів є синтез моделей для функціональних випробувань їх технічних підсистем і пристроїв. Зокрема, від коректності складання моделей для випробувань залежить якісне досягнення належної глибини контролю, модель оцінки якої було запропоновано в попередньому розділі, що в свою чергу безпосередньо впливає на експлуатаційну готовність систем. Вагомим інструментом синтезу моделей для випробувань є апарат графоаналітичного моделювання, вдосконаленню якого в прикладному аспекті підвищення експлуатаційної готовності систем керування рухом поїздів присвячено цей розділ дисертації.

3.1 Базова геометрична модель розподіленої системи керування рухом поїздів

В основу вдосконалення процедур і підходів щодо синтезу моделей для функціональних випробувань є розроблення методу графоаналітичного моделювання територіально-розподілених складних систем та технологічних об'єктів, базованого на використанні функціональних графів. Він має забезпечити як відтворення динамічних властивостей модельованої системи, так і ущільнювати та спрощувати відображення статичних вагових параметрів [5, 18, 20 – 22, 103].

Для формування такого методу вирішуються такі проміжні задачі:

- визначається базова геометрична модель та метод її аналітичної інтерпретації з точки зору топології та врахування властивостей, на підставі якої буде розроблюватися графо-функціональна модель СКРП;
- визначається спосіб функціонального відтворення статичних та динамічних характеристик, які моделюються елементами графу СКРП;
- розробляється метод аналітичного відтворення графо-функціональної моделі та розглядаються варіації його реалізації;
- формуються рекомендації та наводяться приклади практичного застосування розробленого методу функціонального графоаналітичного моделювання.

Для формування базової геометричної моделі розподіленої системи за основу беруться методи та принципи, викладені в роботах [56, 69, 166, 172, 173].

На їх підставі технологічний об'єкт або система представляється впорядкованими множинами складових компонентів $A = \{a_i\}$, зв'язків між ними $Z = \{z_{i,i+1}\}$ та їх функціональних властивостей $U = \{u_i\}$, об'єднання яких утворює комплексну впорядковану множину Y . У свою чергу вона відтворюється за допомогою зваженого (p, q) графу $G_Y = (V, E)$ з множиною вершин $V = \{v_1, v_2, \dots, v_p\}$ та множиною ребер $E = \{e_1, e_2, \dots, e_q\}$ [5, 56, 69, 166].

В якості методу аналітичної інтерпретації геометричної моделі, що береться за основу, слід взяти метод прямих сум, запропонований у роботах [56, 69, 166]. Серед його варіацій доцільним є використання блоків параметрично-топологічних матриць (ПТМ), що поєднують як топологічні, так і параметричні (вагові) властивості геометричних моделей.

Геометрична модель, її варіації та способи аналітичної інтерпретації, що представлені у згаданих вище працях [56, 69, 166, 169 – 173], орієнтовані тільки на станційні системи автоматики (інтерпретують топологію колійного розвитку в якості підсистеми обробки логічних залежностей системи МПЦ). Крім того, така модель відтворює лише обмежену множину технологічних властивостей ОКК різного призначення, зокрема – в контексті варіативності Інструкції по сигналізації, різновиду використання технічних засобів керування та контролю тощо.

Для вдосконалення існуючої графоаналітичної моделі колійного розвитку [56, 69, 166] та формування на її основі базової моделі, що буде закладатися як першооснова розроблення нового методу синтезу моделей для випробувань СКРП, здійснюються такі основні рухи:

- зберігаються типи вершин і ребер та їх прив'язка до функціональних технологічних ОКК колійного розвитку транспортного призначення;
- передбачається можливість нарощування типів вершин, які можуть відтворювати специфічні технологічні об'єкти транспортного призначення (вагоноперекидачі, розпушувачі, вагові термінали, технологічні ворота тощо);
- розширюються множини вагових параметрів вершин і ребер графу G_Y , що дає можливість розширити перелік ОКК і використати їх не тільки на

станціях, але й перегонах залізничного транспорту, які узагальнено шифруються у вигляді таблиці 3.1, що наведена нижче.

Таблиця 3.1 – Вагові коефіцієнти базової графоаналітичної моделі

Тип вершини	Назва вершин	Зашифроване значення
Тип вершини	b_1	$b_1 \equiv 1$
Номер світлофора	b_2	Унікальний ідентифікаційний номер світлофора
Напрямок світлофора	b_3	1 – непарний; 2 – парний; 0 – невизначений
Тип світлофора	b_4	1 – попереджувальний; 2 – вхідний; 3 – вихідний; 4 – маневровий; 0 – псевдосвітлофор
Номер світлофора у створі	b_5	Унікальний ідентифікаційний номер світлофора, що розташований у створі з даним
Тип вершини	c_1	$c_1 \equiv 2$
Номер і напрямок стрілки	c_2	Номер стрілки зі знаком «+» для нормальної стрілки і зі знаком «-» для інверсної
Номер спареної стрілки	c_3	Номер стрілки, що є спареною з даною
Напрямок, що охороняється	c_4	Положення і номер стрілки, які задають напрямок, для якого дана стрілка є охоронною
Охоронне положення стрілки	c_5	1 – положення «+»; 2 – положення «-»; 0 – відсутність охоронних функцій
Марка хрестовини	c_6	1 – 1/6; 2 – 1/9; 3 – 1/1; 4 – 1/18; 5 – 1/22
Тип двигуна	c_7	1 – постійного струму; 2 – змінного струму.
Наявність авто повернення і його параметри	c_8	0 – без авто повернення; 1 – автоповернення в «+»; 2 – автоповернення в «-»
Тип вершини	d_1	$d_1 \equiv 3$
Категорія переїзду	d_2	1 – I категорія; 2 – II категорія; 3 – III категорія
Ордината парного сповіщення	d_3	Зазначається ордината
Ордината непарного сповіщення	d_4	Зазначається ордината
Номер переїзду	d_5	Зазначається ID, що відповідає номеру переїзду
Номер переїзних світл.	d_6	Зазначається масив ID переїзних світлофорів
Номер загороджувальних світлофорів	d_7	Зазначається масив ID загороджувальних світлофорів
Номер світлофорів прикриття	d_8	Зазначається масив ID світлофорів прикриття
Номер виконавчих приводів, двигунів АШ	d_9	Зазначається масив ID виконавчих пристроїв АШ

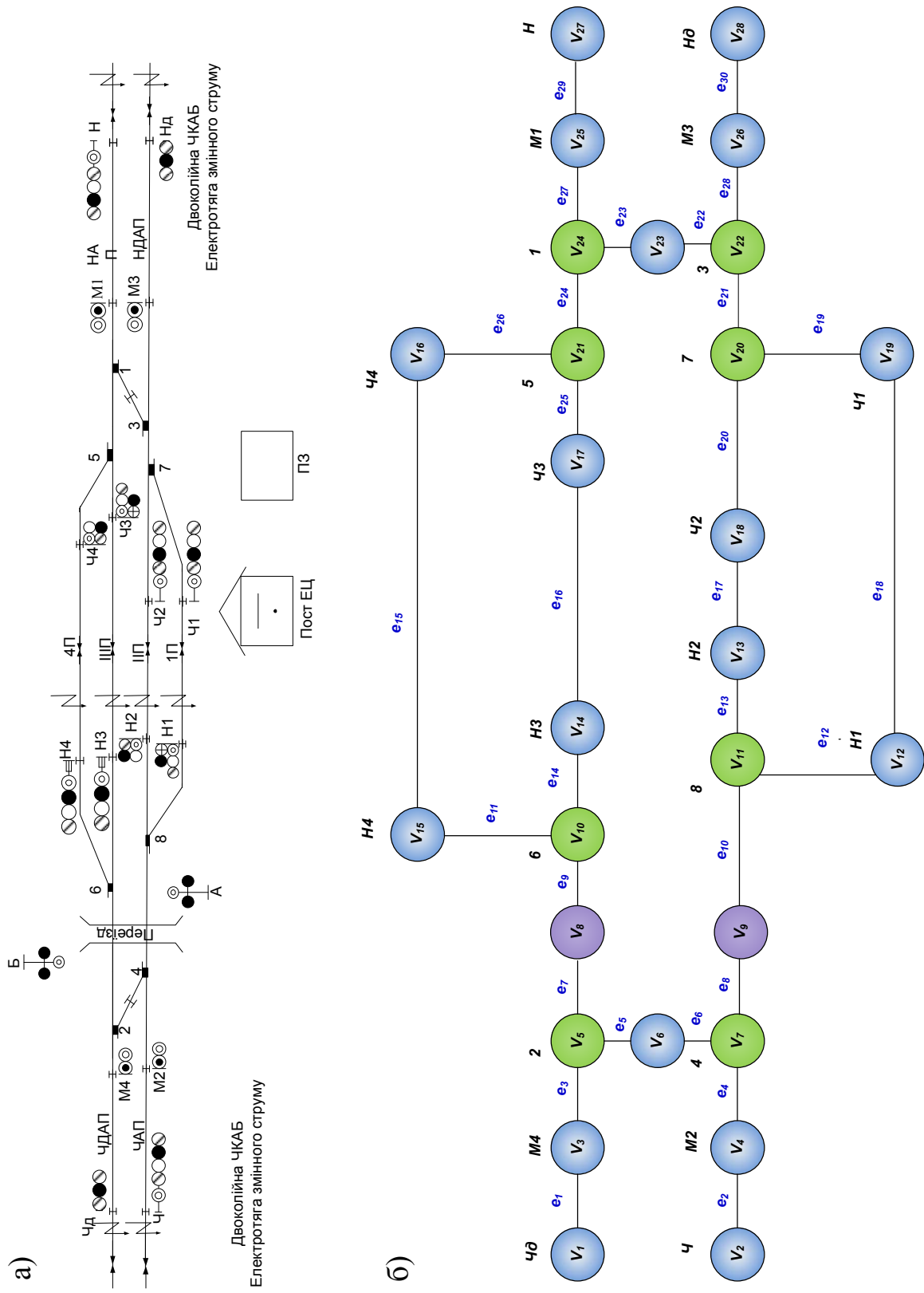
Продовження таблиці 3.1

Тип вершини	Назва вершин	Номер
Тип ізолюваної ділянки	I_1	1 – стрілочна; 2 – без стрілочна; 3 – приймально-відправна колія; 4 – блок-ділянка АБ; 5 – ділянка наближення НАБ; 0 – псеводілянка
Номер ізолюваної ділянки	I_2	Зазначається ID ізолюваної ділянки
Спосіб контролю вільності	I_3	1 – засобами РК; 2 – засобами СЛЮ (ТКД) 3 – для неконтрольованої або псеводілянки
Положення і номер стрілки негабаритного переміщення	I_4	Зазначається ID відповідної стрілки
Положення і номер стрілки, яка знімає негабаритність	I_5	Зазначається ID відповідної стрілки із зазначенням положення
Довжина ділянки	I_6	Зазначається довжина ділянки в умовних (прийнятих) одиницях
Кодування	I_7	1 – наявність кодування АЛСН 0 – відсутність кодування АЛСН

Побудована таким чином базова графічна модель на прикладі технологічного об'єкту – станції «Карапиші» регіональної філії «Південно-західна залізниця» (АТ «Укрзалізниця») наведена на рисунку 3.1.

Шифрування елементів відповідної граф-схеми здійснюється на підставі таблиці 3.1 із урахуванням типізації ОКК, які відтворюються вершинами і ребрами графу G_{γ} .

Зазначена на рисунку 3.1 графічна модель розширює можливості для формування засобів випробувань СКРП щодо збільшення обсягів тестового покриття усіх складових $M_{mn_i}^m$, що відповідає встановленим цільовим умовам, визначеним виразами (2.15), (2.18) і (2.29). Зазначений факт пояснюється тим, що при збільшенні шифрування кількості властивостей ОКК збільшується обсяг відтворених ними функцій і технологічних ситуацій. Збільшення ж самої множини ОКК у складі моделі збільшує відповідно тестове покриття самих ОКК та ПАЗ, якими вони забезпечуються



а – схематичний план; б – граф-схема

Рисунок 3.1 – Базова графічна модель технологічного об'єкту СКРП

$$\begin{aligned}
& \left\{ \begin{array}{l} [B = \{b_i\}] \nearrow \\ [C = \{c_j\}] \nearrow \\ [D = \{d_k\}] \nearrow \\ [L] = \{l_l\} \nearrow \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} [M_{\phi}^M] \nearrow \\ [M_{окк}^M] \nearrow \\ [M_{mc}^M] \nearrow \\ [M_{наз}^M] \nearrow \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (Y_1 Y_2 + Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3) \nearrow \\ (Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2) \swarrow \end{array} \right\} \Rightarrow \\
& \Rightarrow \left(\frac{1}{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1 Y_2 + Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3)} \right) \nearrow \Leftrightarrow \quad (3.1) \\
& \Leftrightarrow \frac{1}{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1 Y_2 + Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3)} \rightarrow \max,
\end{aligned}$$

де B , C , D і L – відповідно впорядковані множини (вектори) вагових параметрів ОКК, що інтерпретуються графічною моделлю СКРП.

Зазначений вираз (3.1) безпосередньо впливає з наведених вище суджень з урахуванням обмежень щодо моделі оцінки тестового покриття, встановлених у другому розділі.

Таким чином, запропонована базова графоаналітична модель у цілому задовольняє встановленим критеріям цільового функціоналу, з урахуванням прийнятих обмежень, і тому може бути взята за основу вдосконалення методу синтезу моделей для випробувань сучасних СКРП, побудованих згідно концепцій цифровізації в рамках парадигми Industry-4.0.

3.2 Графо-функціональна модель розподіленої системи керування рухом поїздів

Як було зазначено вище, всі графоаналітичні моделі розподілених систем, викладені, зокрема, в роботах [56, 69, 166, 170 – 173], відтворюють статичні властивості модельованих об'єктів. Їх динамічні властивості характеризуються окремими моделями, що інтегруються із статичною складовою на рівні взаємодії прикладного програмного забезпечення та файлів конфігурації. В таких моделях розподілені та взаємопов'язані елементи системи або технологічного об'єкта відтворюються як вершинами, так і ребрами графа (залежно від функціонального

призначення). При цьому кожному елементу (вершині та ребру) графа присвоюється впорядкована множина (вектор) вагових коефіцієнтів, що визначають статичні властивості модельованого елемента. Інтеграція топологічних та параметричних властивостей складових геометричної моделі у межах ПТМ виконується за принципом позиціонування – шляхом розподілу вагових коефіцієнтів відповідних векторів по коміркам блоків відповідних матриць [166].

Основні недоліки такого підходу: мінімальне обмеження розмірності блоків ПТМ (та відповідних їм компонент графу) потужностями впорядкованих множин вагових параметрів елементів графу; можливість відтворення топологічних та параметричних властивостей геометричної моделі тільки на базі ПТМ, що використовують властивість інцидентності (виключно на основі матриць інцидентності, без можливості використання топологічних матриць іншого типу); технічна громіздкість та складність формування вихідних блоків ПТМ; відсутність відтворення динамічних властивостей модельованого об'єкта або системи [5, 9, 13, 18 – 24].

Для усунення зазначених недоліків пропонується використання функціонального графа $G_{YF}[V(F), E]$. У ньому передбачається, що складові розподіленої системи або технологічного об'єкта відтворюються функціональними вершинами, вага яких визначається функціоналом $F(\underline{U})$, що відтворює як статичні, так і динамічні властивості складових модельованої системи або об'єкта. З урахуванням результатів досліджень [5, 56, 69, 166] та виразу (3.1) формалізація геометричної інтерпретації модельованої системи (об'єкту) матиме вигляд

$$Y = A \cap U \cap Z \leftrightarrow G_{YF}\{[V(F(\underline{U})), E], \quad (3.2)$$

де $F(\underline{U}) = \bigcup_{i=1}^n f_i(\bar{u}_i)$ – функціонал розподілених складових системи (об'єкту), що кожна з яких наділена технологічною функцією $f_i(\bar{u}_i)$, що визначає динамічні функціональні властивості відповідної складової залежно від її вектору вагових коефіцієнтів (параметрів) \bar{u}_i .

Ребра $E=\{e_j\}$ у складі графу G_{YF} є незваженими. Вони лише визначають взаємозв'язок між вершинами $V(F)=\{v_i[f_i(\bar{u}_i)]\}$. Проте в загальному випадку граф G_{YF} може бути як направленим, так і ненаправленим або змішаним (рисунок 3.2).

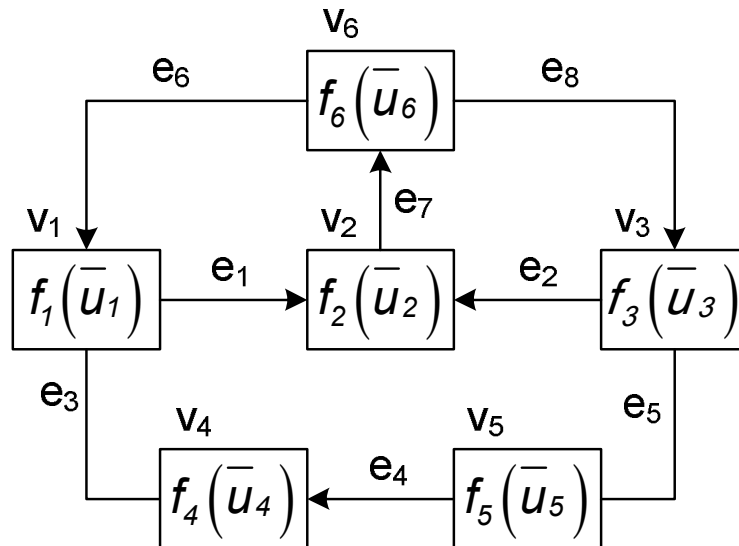


Рисунок 3.2 – Приклад графо-функціональної моделі G_{YF} розподіленої системи з потужностями $[V] = 6$ та $[E] = 8$

Отже, спосіб, закладений в основу графо-функціональної моделі G_{YF} , повністю відтворює в геометричному сенсі всю множину $Y = A \cap U \cap Z$. Він, на відміну від графу G_Y , спрощує структуру графу G_{YF} за рахунок відсутності зваженості ребер та функціонального завдання вагових параметрів. Крім того, граф G_{YF} , на відміну від графа G_Y , відтворює динамічні властивості модельованої системи або технологічного об'єкту [5, 18].

З точки зору параметричних та функціонально-динамічних властивостей кожної складової системи (об'єкту) відповідна функція $f_i(\bar{u}_i)$ має враховувати технологічне призначення складової та логіку його реалізації відповідно до вагових параметрів \bar{u}_i . З позиції анатомії графу ця функція має враховувати ступінь (валентність) відповідної вершини v_i з урахуванням знаку.

Подальше оброблення геометричної моделі G_{YF} з використанням ЕОМ має відбуватися при її аналітичній інтерпретації.

На відміну від графу G_Y геометрична модель G_{YF} не передбачає прямого присвоєння вагових коефіцієнтів вершинам та взагалі не містить таких коефіцієнтів для ребер (через відсутність їхньої зваженості).

Такий порядок речей дозволяє відмовитися від обов'язкового застосування базової матриці інцидентності при аналітичному відтворенні моделі. Це пов'язано, по-перше, з відсутністю необхідності позиційного розподілу вагових коефіцієнтів (за рахунок використання функцій $f_i(\bar{u}_i)$) та, по-друге, з відсутністю моделювання окремих складових системи (об'єкту) за допомогою ребер.

Отже, за основу для матричного відтворення графічної моделі G_{YF} у загальному випадку може бути взята будь-яка матриця: інцидентності, суміжності, контурів, маршрутів тощо.

Найбільш наочною та простою з точки зору складання серед топологічних матриць є матриця суміжності. Проте суттєвим її недоліком є неможливість прямого відтворення декількох ребер між двома суміжними вершинами, особливо, коли вони мають різний напрямок. Однак у разі шифрування в функції $f_i(\bar{u}_i)$ ступеня (валентності) відповідної вершини з урахуванням її знаку даний недолік повністю нівелюється.

Враховуючи динамічне функціональне зважування вершин графу, відповідній матриці, що інтерпретує графічну модель G_{YF} у аналітичному вигляді, присвоюється назва функціонально-топологічної матриці (ФТМ). На відміну від параметрично-топологічних матриць (ПТМ), що базувалася на статичному зважуванні як вершин, так і ребер графу G_Y , ФТМ базується на діагональному принципі розташування динамічних функцій $f_i(\bar{u}_i)$ по головній діагоналі матриці суміжності. Суттєвою її перевагою, порівняно з ПТМ, є відсутність складного і громіздкого позиційного розподілу елементів векторів $B = \{b_i\}$, $C = \{c_j\}$, $D = \{d_k\}$, $L = \{l_l\}$ по відповідним коміркам матриці (згідно індексації-нумерації стовпців і рядків). Узагальнений вигляд ФТМ для довільної графічної моделі G_{YF} має вигляд (рисунок 3.3).

Аналогічно принципам заповнення ПТМ, параметри θ_{ij} визначають топологічну властивість між відповідною парою вершин №№ i та j , але, на відміну під ПТМ – не інцидентність, а суміжність.

Зазначений параметр у контексті визначення кількості ребер та їх напрямків у складі функціонального графу може бути опосередковано додатково заданий у складі динамічних функцій $f_i(\bar{u}_i)$.

	V_1	V_2	V_3	---	V_n
V_1	$f_1(u_1)$	Θ_{12}	Θ_{13}	---	Θ_{1n}
V_2	Θ_{21}	$f_2(u_2)$	Θ_{23}	---	Θ_{2n}
V_3	Θ_{31}	Θ_{32}	$f_3(u_3)$	---	Θ_{3n}
\vdots	---	---	---	$f_i(u_i)$	Θ_{in}
V_n	Θ_{n1}	Θ_{n2}	Θ_{n3}	---	$f_n(u_n)$

Рисунок 3.3 – Узагальнена форма функціонально-топологічної матриці

У такому випадку в складі вектора \bar{u}_i передбачається впорядкована підмножина $\bar{d}_i \subset \bar{u}_i$, $\bar{d}_i = \{p_i^+, p_i^-, p_i^0\}$, де p_i^+ , p_i^- та p_i^0 – кількість ребер, інцидентних вершині v_i відповідно із додатною, від’ємною та нейтральною валентністю. Отже, при зазначеному підході функція $f_i(\bar{u}_i)$ буде опосередковано визначати властивості інцидентності між вершинами і ребрами в будь-якій топологічній матриці, зокрема – матриці суміжності.

Враховуючи, що матриця суміжності є симетричною квадратною матрицею, в ній, на відміну від матриці інцидентності, доцільно застосувати не позиційний, а діагональний принцип відтворення функціональних властивостей складових вершин графу G_{YF} .

У такому випадку ФТМ, базована на використанні матриці суміжності (СФТМ), що відтворює за вказаним правилом параметричні та топологічні властивості графічної моделі G_{YF} (а отже – модельованою нею системи або технологічного об’єкта), матиме такий вигляд

$$|M_{C\Phi TM_GYF}| = \begin{vmatrix} f_1(\bar{u}_1) & \theta_{12} & \theta_{13} & \dots & \theta_{1n} \\ \theta_{21} & f_2(\bar{u}_2) & \theta_{23} & \dots & \theta_{2n} \\ \theta_{31} & \theta_{32} & f_3(\bar{u}_3) & \dots & \theta_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \theta_{n1} & \theta_{n2} & \theta_{n3} & \dots & f_n(\bar{u}_n) \end{vmatrix}, \quad (3.3)$$

де $|M_{C\Phi TM_GYF}|$ – СФТМ графічної моделі G_{YF} ;

$$\theta_{ij} = \theta_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } v_i \updownarrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j, \end{cases} \quad \text{– топологічна властивість наявності (\updownarrow) або}$$

відсутності (\parallel) суміжності між i -ю та j -ю вершинами.

Зокрема для графа, зображеного на рисунку 3.2, формула (3.3) матиме такий вигляд

$$|M_{G_{YF}}| = |M_{C\Phi TM_GYF}| = \begin{vmatrix} f_1(\bar{u}_1) & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & f_2(\bar{u}_2) & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & f_3(\bar{u}_3) & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & f_4(\bar{u}_4) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & f_5(\bar{u}_5) & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & f_6(\bar{u}_6) \end{vmatrix}.$$

Як впливає із вищезазначеного, функції $f_i(\bar{u}_i)$ для цього графу відтворюють не тільки параметричні властивості графу, але й частину його анатомічних властивостей за рахунок векторів $\bar{d}_i = \{p_i^+, p_i^-, p_i^0\}$. Враховуючи одиничність маршрутів між будь-якою парою суміжних вершин в даному графі, ці вектори матимуть для нього такі значення: $\bar{d}_1 = \{1, 1, 1\}$, $\bar{d}_2 = \{2, 1, 0\}$, $\bar{d}_3 = \{1, 1, 1\}$, $\bar{d}_4 = \{1, 0, 1\}$, $\bar{d}_5 = \{0, 1, 1\}$, $\bar{d}_6 = \{1, 2, 0\}$.

Для направленою графу альтернативним способом завдання кількості ребер між суміжними вершинами, із урахуванням їх напрямку, без використання

векторів \bar{d}_i , є шифрування даних відомостей у параметрах θ_{ij} та/або θ_{ji} . Тоді, у загальному випадку, $\theta_{ij} \neq \theta_{ji}$. Значення θ_{ij} та θ_{ji} мають відображати не тільки наявність або відсутність суміжності, але й кількість ребер, що поєднують вершини v_i та v_j з урахуванням їхнього напрямку.

У таких умовах при визначенні субординації між топологічними параметрами θ_{ij} та θ_{ji} у виразі (3.3) має бути взятий за основу принцип базової додатної або від'ємної валентності.

У першому випадку параметр θ_{ij} визначає кількість ребер, інцидентних вершинам v_i та v_j , із додатною валентністю для вершини v_i та від'ємною валентністю для вершини v_j . Навпаки, параметр θ_{ji} визначає кількість ребер, інцидентних тим же вершинам, але із протилежною валентністю. Отже, ці параметри визначатимуться у формулі (3.3) таким чином

$$\theta_{ij} = \begin{cases} \left[E_{ij}^{v_i^+, v_j^-} \right], & \text{якщо } v_i \uparrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j \text{ або } v_i \downarrow v_j, \end{cases} \quad \theta_{ji} = \begin{cases} \left[E_{ij}^{v_i^-, v_j^+} \right], & \text{якщо } v_i \downarrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j \text{ або } v_i \uparrow v_j, \end{cases} \quad (3.4)$$

де $E_{ij}^{v_i^+, v_j^-}$ та $E_{ij}^{v_i^-, v_j^+}$ – множини ребер, інцидентних вершинам v_i та v_j , відповідно із додатною валентністю для вершин v_i та від'ємною для v_j і навпаки;

\uparrow, \downarrow – умовні некомутативні символи суміжності із відповідно додатною та від'ємною інцидентністю ребер по відношенню до вершини v_i з боку v_j .

При використанні принципу базової від'ємної валентності у комірці ij СФТМ вказується кількість ребер, інцидентних вершинам v_i та v_j , із від'ємною валентністю для вершини v_i та додатною валентністю для вершини v_j . Навпаки, для комірок ji відповідна валентність має бути реверсивною. Отже, для такого випадку формула (3.4) перетворюється таким чином

$$\theta_{ij} = \begin{cases} \left[E_{ij}^{v_i^-, v_j^+} \right], & \text{якщо } v_i \downarrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j \text{ або } v_i \uparrow v_j, \end{cases} \quad \theta_{ji} = \begin{cases} \left[E_{ij}^{v_i^+, v_j^-} \right], & \text{якщо } v_i \uparrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j \text{ або } v_i \downarrow v_j. \end{cases} \quad (3.5)$$

У випадку ненаправленого графа відсутня необхідність як використання вектору $\bar{d}_i \subset \bar{u}_i$, так і встановлення субординації між параметрами θ_{ij} та θ_{ji} за формулами (3.4) або (3.5). В цьому разі достатньо зазначити кількість ненаправлених ребер $\left[E_{ij}^{v_i, v_j} \right]$, одночасно інцидентних суміжним вершинам v_i та v_j

$$\theta_{ji} = \begin{cases} \left[E_{ij}^{v_i^+, v_j} \right], & \text{якщо } v_i \uparrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j \text{ або } v_i \downarrow v_j. \end{cases} \quad (3.6)$$

Альтернативою використання векторів $\bar{d}_i \subset \bar{u}_i$ для випадку змішаного графу (рисунок 3.2) є структурний синтез виразів (3.3), (3.4), (3.6) або (3.3), (3.5), (3.6) – залежно від прийнятої базової валентності вершин (додатної в першому та від’ємної в другому випадку).

У таких випадках замість скалярних елементів $\theta_{ij} \neq \theta_{ji}$ використовуються векторні елементи $\bar{\theta}_{ij} \neq \bar{\theta}_{ji}$, що за наявності суміжності між вершинами i та j являють собою двохелементні впорядковані множини. Перший елемент визначається виразом (3.4) або (3.5), залежно від обраної базової валентності. Другий елемент визначається за формулою (3.6).

Для випадку базової додатної валентності вирази для визначення зазначених параметрів матимуть такий вигляд

$$\bar{\theta}_{ij}^+ = \begin{cases} \left[\left[E_{ij}^{v_i^+, v_j} \right], \left[E_{ij}^{v_i, v_j} \right] \right], & \text{якщо } v_i \uparrow v_j \text{ та/ або } v_i \Downarrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j \text{ або } v_i \downarrow v_j, \end{cases}$$

$$\bar{\theta}_{ji}^+ = \begin{cases} \left[\left[E_{ij}^{v_i, v_j^+} \right], \left[E_{ij}^{v_i, v_j} \right] \right], & \text{якщо } v_i \downarrow v_j \text{ та / або } v_i \Downarrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j \text{ або } v_i \uparrow v_j, \end{cases} \quad (3.7)$$

а для випадку базової від'ємної валентності

$$\overline{\theta}_{ij} = \begin{cases} \left[E_{ij}^{v_i, v_j^+} \right], \left[E_{ij}^{v_i, v_j} \right], \text{ якщо } v_i \downarrow v_j \text{ та / або } v_i \updownarrow v_j, \\ 0, \text{ якщо } v_i \parallel v_j \text{ або } v_i \uparrow v_j, \end{cases}$$

$$\overline{\theta}_{ji} = \begin{cases} \left[E_{ij}^{v_i^+, v_j} \right], \left[E_{ij}^{v_i, v_j} \right], \text{ якщо } v_i \uparrow v_j \text{ та / або } v_i \updownarrow v_j, \\ 0, \text{ якщо } v_i \parallel v_j \text{ або } v_i \downarrow v_j. \end{cases} \quad (3.8)$$

Отже, аналітична інтерпретація графу G_{YF} , зображеного на рисунку 3.2, за формулами (3.3), (3.7) із використанням СФТМ має вигляд

$$\left| M_{G_{YF}}^+ \right| = \left| M_{СФТМ_G_{YF}}^+ \right| = \begin{vmatrix} f_1(\overline{u}_1) & \overline{1,0} & 0 & \overline{0,1} & 0 & 0 \\ 0 & f_2(\overline{u}_2) & 0 & 0 & 0 & \overline{1,0} \\ 0 & \overline{1,0} & f_3(\overline{u}_3) & 0 & \overline{0,1} & 0 \\ \overline{0,1} & 0 & 0 & f_4(\overline{u}_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \overline{0,1} & \overline{1,0} & f_5(\overline{u}_5) & 0 \\ \overline{1,0} & 0 & \overline{1,0} & 0 & 0 & f_6(\overline{u}_6) \end{vmatrix},$$

а за формулами (3.3) і (3.8) такий вигляд

$$\left| M_{G_{YF}}^- \right| = \left| M_{СФТМ_G_{YF}}^- \right| = \begin{vmatrix} f_1(\overline{u}_1) & 0 & 0 & \overline{0,1} & 0 & \overline{1,0} \\ \overline{1,0} & f_2(\overline{u}_2) & \overline{1,0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_3(\overline{u}_3) & 0 & \overline{0,1} & \overline{1,0} \\ \overline{0,1} & 0 & 0 & f_4(\overline{u}_4) & \overline{1,0} & 0 \\ 0 & 0 & \overline{0,1} & 0 & f_5(\overline{u}_5) & 0 \\ 0 & \overline{1,0} & 0 & 0 & 0 & f_6(\overline{u}_6) \end{vmatrix}.$$

Як видно з отриманих виразів, для графа, будь-яку пару суміжних вершин якого з'єднує тільки одне ребро, відповідні вектори $\bar{\theta}_{ij} \neq \bar{\theta}_{ji}$ містять тільки одиничні або нульові елементи в кожній позиції. Для більш загального випадку змішаного графа (рисунок 3.4) значність відповідних позицій може бути довільною і визначається потужностями відповідних множин.

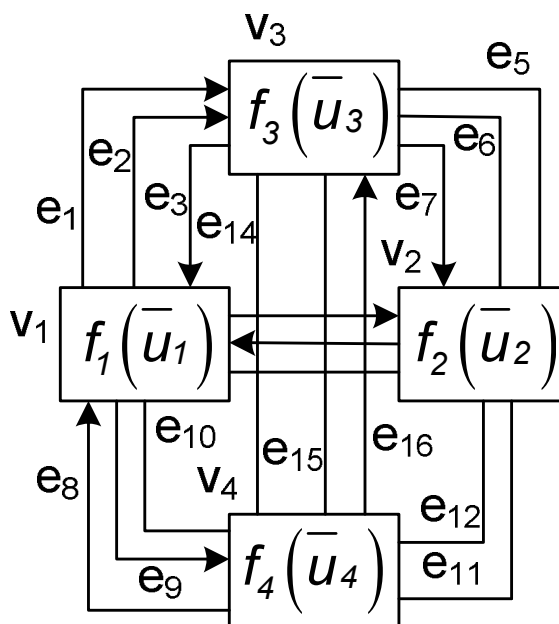


Рисунок 3.4 – Узагальнений приклад графо-функціональної моделі G_{YF} розподіленої системи з потужностями $[V] = 4$ та $[E] = 16$

Для наведеного прикладу вирази СФТМ відповідно за формулами (3.3), (3.14) і (3.3), (3.8) мають вигляд

$$\left| \dot{I}^+_{G_{YF}} \right| = \begin{vmatrix} f_1(\bar{u}_1) & \bar{1},1 & \bar{2},0 & \bar{1},1 \\ \bar{1},1 & f_2(\bar{u}_2) & \bar{0},2 & \bar{0},2 \\ \bar{1},0 & \bar{1},2 & f_3(\bar{u}_3) & \bar{0},2 \\ \bar{1},1 & \bar{0},2 & \bar{1},2 & f_4(\bar{u}_4) \end{vmatrix},$$

$$\left| \dot{I}_{G_{YF}} \right| = \begin{vmatrix} f_1(\bar{u}_1) & \bar{1,1} & \bar{1,0} & \bar{1,1} \\ \bar{1,1} & f_2(\bar{u}_2) & \bar{1,2} & \bar{0,2} \\ \bar{2,0} & \bar{0,2} & f_3(\bar{u}_3) & \bar{1,2} \\ \bar{1,1} & \bar{0,2} & \bar{0,2} & f_4(\bar{u}_4) \end{vmatrix}.$$

Слід зазначити, що матриці, сформовані за принципом базової валентності (додатної або від'ємної) за формулами (3.3) – (3.8), є несиметричними. Це безпосередньо впливає із властивостей суміжності елементів графу за умови направленості ребер між відповідними вершинами.

Шляхом надання відповідним матрицям змістовної надлишковості, комбінуючи різним чином між собою формули (3.3) і (3.5), можна привести їх до симетричного вигляду. При цьому фактично будуть дублюватися анатомічні властивості у двох частинах матриці.

З урахуванням розробленого методу формується графо функціональна модель для системи МПЦ станції «Карпиші» – згідно схематичного плану, зображеного на рисунку 3.1-а (рисунок 3.5).

Як вбачається з наведеної граф-схеми, для кожного елементу колійного розвитку $a_i \in A$ станції ставиться у взаємно-однозначну відповідність (бієктивний відображення) функціональна вершина v_i , якій, у свою чергу, відповідає шляхом бієктивного відображення функціонал $f_i(\bar{u}_i)$

$$(a_i \in A \leftrightarrow v_i \in V \leftrightarrow f_i(\bar{u}_i) \in F(U)) \rightarrow G_{YF},$$

$$[A] = [V] = [F(U)],$$

де A , V та $F(U)$ – відповідно множини елементів колійного розвитку, вершин графу G_{YF} та їх функціоналів.

Із використанням розроблених принципів аналітичної інтерпретації, виходячи із анатомії та топології графу, зображеного на рисунку 3.5, відповідна до нього СФТМ матиме вигляд, зображений на рисунку 3.6.

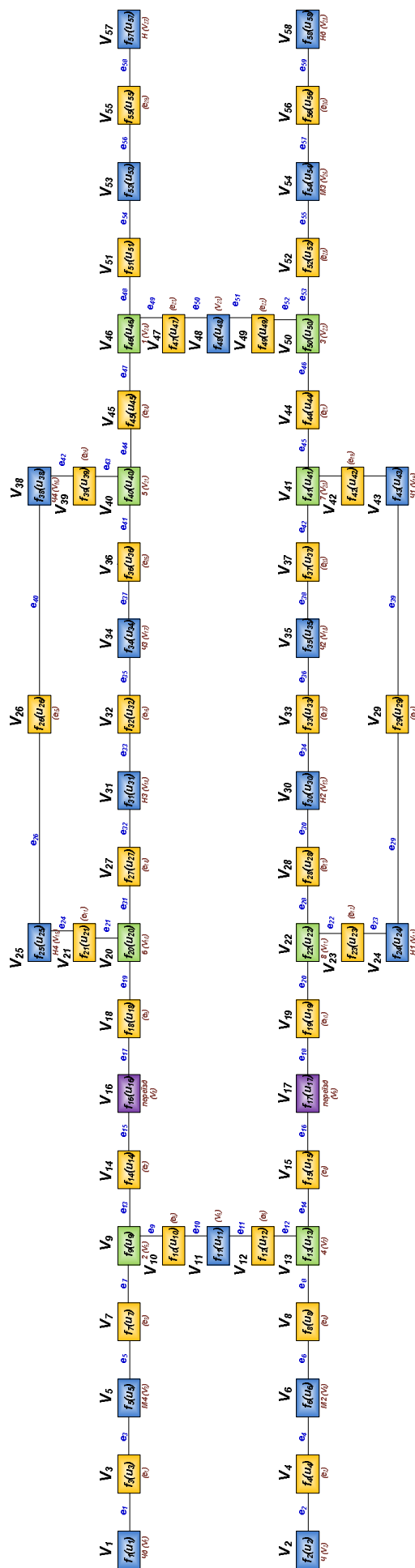


Рисунок 3.5 – Графо-функціональна модель системи МПЦ станції „Карпати”

Рисунок 3.6 – Функціонально-топологічна матриця графо-функціональної моделі системи МПЦ станції «Карпиші»

Аналогічно ПТМ, для об'єктів великої розмірності СФТМ також має значну розмірність, навіть для станції з восьми стрілок відповідна матриця має розмірність 58×58 . Використання методу прямих сум, запропонованого, зокрема, в працях [56, 69, 166] не є прийнятним для СФТМ через різний тип матриць, а також використання функціональної діагоналі замість позиційного розподілу вагових коефіцієнтів вершин і ребер.

Для відтворення за допомогою розробленого методу розподілених систем або об'єктів великої розмірності слід застосувати метод прямих сум, що був використаний для ПТМ, базованих на матрицях інцидентності, в роботах [56, 69, 166]. Проте з'ясування особливостей його застосування щодо СФТМ потребує окремого ґрунтовного дослідження.

3.3 Метод опосередкованого відтворення графо-функціональних моделей

Досвід попередніх досліджень у предметній області [56, 69, 166, 170 – 173] довів ефективність використання вихідного блочного розділення топологічних або параметрично-топологічних матриць на основі вихідного ділення графічної моделі на компоненти, для яких складаються вихідні блоки, з метою представлення матриць великої розмірності. Для ПТМ, що базуються на використанні матриць інцидентності, формування відповідних компонент $G_k \subset G_Y$ здійснюється на базі виділення опорних вершин $v_i' \in V' \subset V_l \subset G_Y$ (V_l – множина верши першого типу, що відтворює світлофори та межі ділянок на залізничному інфраструктурному об'єкті). По відношенню до даних вершин здійснюється виділення двох груп компонент (парних і непарних), щодо яких складаються вихідні блоки ПТМ, які в обчислювальному пристрої синтезуються за принципом суперпозиції прямих сум відповідних матриць.

Беручи такий підхід за основу, слід враховувати, що через відсутність ребер, з яких формуються розрізи за принципом інцидентності щодо опорних вершин, використання останніх не є можливим у тому ж вигляді, що при застосуванні вихідних блоків ПТМ. З метою вдосконалення відповідного методу та формування на його основі нового методу синтезу моделі для випробувань СКРП пропонується взяти за основу ділення графічної моделі на компоненти замість опорних вершин v_i' опорні елементарні дерева (ОЕД) $G_{ОЕД}$ графу G_{YF} ($G_{ОЕД} \subset G_{YF}$), які складаються з двох суміжних вершин v_i та v_j , з'єднаних ребром e_{ij} . При цьому має зберігатися послідовний принцип нумерації вершин в графі G_{YF} та його компонентах $G_{kf} \subset G_{YF}$, відповідно до якого індекси вершин послідовно зберігаються в межах компоненти

$$\forall i \in N \begin{cases} v_i, v_{i+1} \subset G_{kf}(l), i \neq j \\ v_i, v_{i+1} \subset G_{kf}(l+1), i = j \end{cases} \quad (3.9)$$

$$[N] = [V], \sum_l l = [K] = [\{G_{kf}(n)\}],$$

де N і K – відповідно множини номерів (індексів) вершин та вихідних компонент графу G_{YF} ;

l – нумерація компонент $G_{kf} \subset G_{YF}$.

На відміну від методу прямих сум, запропонований метод не вимагає послідовної нумерації ребер графу G_{YF} за принципом, аналогічним (3.9). Це пов'язано із відсутністю їх прямого завдання в СФТМ, що базується на матрицях суміжності, які в класичному варіанті не задають ребра графу.

Виходячи із зазначеного, утворення компонент $G_{kf} \subset G_{YF}$ відбувається шляхом вилучення з графу G_{YF} двох множин розрізів E^- і E^+ , складові яких (ребра графу) є інцидентними по відношенню до вершин відповідно v_i та v_j та одночасно суміжними до ребер e_{ij} у складі ОЕД $G_{OED} = G_\delta(v_i, v_j, e_{ij})$

$$(\forall v_i \subset G_\delta(v_i, v_j, e_{ij})) \leftrightarrow (\exists! e_u \in E^-) \wedge (\exists! e_v \in E^+),$$

$$\begin{cases} E^- = f(E^+) = \phi_1[G_\delta(v_i, v_j, e_{ij})], \\ E^+ = f^{-1}(E^-) = \phi_2[G_\delta(v_i, v_j, e_{ij})], \\ G_\delta(v_i, v_j, e_{ij}) = \phi_1^{-1}(E^+) = \phi_2^{-1}(E^-), \end{cases} \quad (3.10)$$

де e_u і e_v – ребра, інцидентні відповідно вершинам v_i та v_j ;

f, f^{-1} – відповідно пряме та зворотнє відображення між розрізами E^- та E^+ ;

ϕ_1, ϕ_1^{-1} – відповідно пряме та зворотнє відображення між деревом $G_\delta(v_i, v_j, e_{ij})$ та E^- ;

ϕ_2, ϕ_2^{-1} – відповідно пряме та зворотнє відображення між множинами $G_\delta(v_i, v_j, e_{ij})$ та E^+ .

Матрично-графічна інтерпретація виразу (3.10) на базі СФТМ у загальному випадку визначається як сукупність пересічних блоків СФТМ, спільними в яких є інтерпретації дерев $G_\delta(v_i, v_j, e_{ij})$ у вигляді результатів відповідних перетинів із врахуванням вершин v_i, v_j та ребер e_{ij} у складі квадратних матриць $|M_\delta|$, які є результатом відповідних перетинів та відтворенням графів G_{OED} (рисунок 3.7).

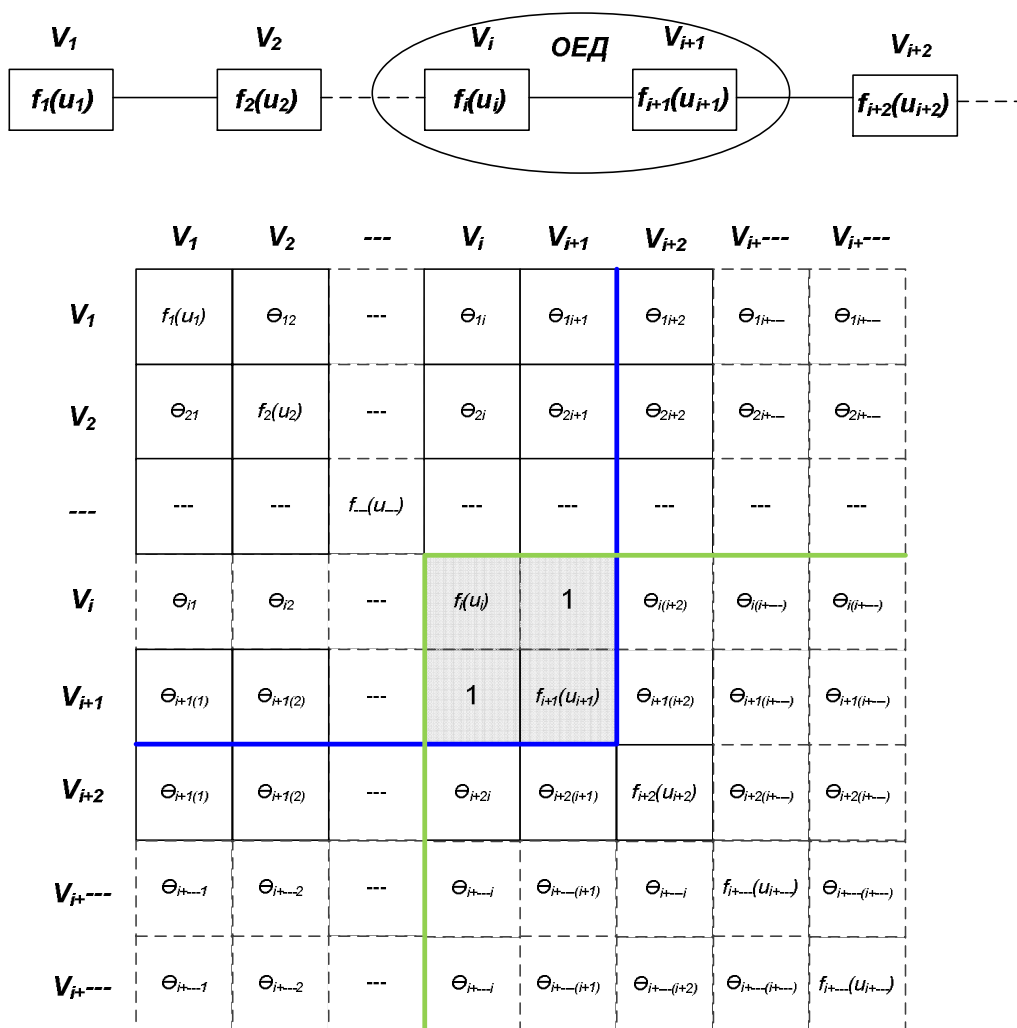


Рисунок 3.7 – Принцип блочного формування СФТМ на базі пересічних компонент графо-функціональної моделі СКРП

З рисунка 3.7 вбачається, що ключовим елементом, який визначає проблематику блочного-формування СФТМ на базі вихідних компонент, є дворовмірна квадратна матриця $i, i+1$, що є відтворенням дерев $G_{ОЕД}$ і є спільною для суміжних компонент №№ l та $l+1$

$$G_{\partial}^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij}) \leftrightarrow |M_{\partial}^{l/l+1}| = \begin{vmatrix} f_i(\bar{u}_i) & 1 \\ 1 & f_{i+1}(\bar{u}_{i+1}) \end{vmatrix}, \quad (3.11)$$

де верхній індекс l у позначеннях $G_{\partial}(v_i, v_j, e_{ij})$ та $|M_{\partial}|$ визначає відповідний номер компоненти $G_{kf} \subset G_{YF}$.

Одиничність значень у комірках $(i, i+1)$ та $(i+1, i)$

$$\forall i \in N \mid \theta_{i,i+1} = \theta_{i+1,i} = \text{const} = 1, \quad (3.12)$$

визначається безпосередньо умовами (3.9) та (3.10), які визначають базові принципи вибору опорних дерев $G_\delta(v_i, v_j, e_{ij}) \subset G_{YF}$.

Крім того, виходячи з принципів послідовної наскрізної нумерації вершин у складі компонент $G_{kf} \subset G_{YF}$, заданої виразом (3.9), впливає відсутність суміжності між вершинами серед сусідніх компонент, крім тих, що входять до складу дерев G_{OED} , звідки впливає нульове значення параметрів θ у матриці $|M_{cфтм}| = |M_{GYF}|$, які не є складовими ФТМ компонент $G_{kf} \subset G_{YF}$ як блоків СФТМ

$$\forall g, h \in N \mid \theta_{g \geq i+1, h < i+1} = \theta_{g \leq i, h > i} = \text{const} = 0, \quad (3.13)$$

де g та h – довільні індекси вершин СФТМ.

Сформовані розрізами E^- та E^+ компоненти $G_{kf} \subset G_{YF}$ обираються за принципом парності своїх номерів (індексів) l таким чином, що при синтезі СФТМ на базі окремих боків ФТМ відповідні блоки складаються щодо непарних компонент, утворених розрізом E^- , та парних компонент, утворених розрізом E^+ , що базується на властивостях вершин графу G_{YF} , які формалізуються таким чином

$$\begin{aligned} V_l^{E^-} \cap V_l^{E^+} &= (v_i + v_j) \subset G_\delta^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij}), \\ \bigcup_{l=1}^n V_l^{E^-} \cap \bigcup_{l=1}^n V_l^{E^+} &= \bigcup_{i=1}^{n-1} v_i \cup \bigcup_{j=1}^{n-1} v_j = \bigcup_{i,j=1}^{2(n-1)} v_{i,j} = \\ &= \sum_{i,j=1}^{2(n-1)} v_{i,j} = V_\delta \subset \{G_\delta^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij})\}, \\ \bigcup_{l=1}^n V_l^{E^-} + \bigcup_{l=1}^n V_l^{E^+} &= V, \end{aligned} \quad (3.14)$$

де $V_l^{E^-}$ та $V_l^{E^+}$ – відповідно множини вершин компонент $G_{kf}^-(l)$ та $G_{kf}^+(l)$, утворених розрізами E^- та E^+ ;

V_δ – множина вершин у складі дерев G_{OED} у сукупності.

Справедливість верхнього виразу у формулі (3.14) впливає із того, що для двох суміжних компонент $G_{kf}^-(l)$ і $G_{kf}^+(l+1)$ спільними є тільки елементарні дерева $G_\delta^{ll+1}(v_i, v_j, e_{ij})$, елементи яких (вершини) визначає відповідний вираз, що, у свою чергу, безпосередньо визначається правилами вибору даних компонент, формалізованими виразами (3.9) і (3.10).

Достовірність середнього виразу (3.14) також пояснюється спільністю для зазначених компонент тільки елементів дерев $G_\delta^{ll+1}(v_i, v_j, e_{ij})$, а також відсутністю повторюваності вершин графу G_{YF} та їх номерів – у частині рівнозначності операцій об'єднання та суми відповідних множин у виразі.

Третій (нижній) вираз (3.14) визначається тим, що при виключенні повторюваних для суміжних компонент $G_{kf}^-(l)$ і $G_{kf}^+(l+1)$ елементів елементарних дерев $G_\delta^{ll+1}(v_i, v_j, e_{ij})$ безпосередньо формується множина вершин всього графу G_{YF} , що і формалізується даним виразом.

Не дивлячись на те, що стосовно ребер E графу G_{YF} у розроблюваному методі відсутні жорсткі правила нумерації, тим паче щодо них також мають бути справедливими певні відношення і властивості, формалізовані так

$$\begin{aligned}
 E_l^{E^-} \cap E_l^{E^+} &= E_l^{E^-} / E^+ = E_l^{E^+} / E^- = e_{ij} \subset G_\delta^{ll+1}(v_i, v_j, e_{ij}), \\
 \bigcup_{l=1}^n E_l^{E^-} \cap \bigcup_{l=1}^n E_l^{E^+} &= \bigcup_{j-i=1}^{n-1} e_{ij} = \sum_{j-i=1}^{n-1} e_{ij} = E_\delta \subset \{G_\delta^{ll+1}(v_i, v_j, e_{ij})\}, \\
 \bigcup_{l=1}^n E_l^{E^-} + \bigcup_{l=1}^n E_l^{E^+} &= E,
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

де $E_l^{E^-}$ та $E_l^{E^+}$ – відповідно множини ребер компонент $G_{kf}^-(l)$ та $G_{kf}^+(l)$, утворених розрізами E^- та E^+ ;

E_δ – множина ребер у складі дерев G_{OED} у сукупності.

Достовірність властивостей ребер графу G_{YF} (3.15) доводиться аналогічно достовірності властивостей вершин (3.14) на підставі єдиної спільності у

суміжних компонентах $G_{kf}^{-/+}(l, l+1)$ лише тих ребер, які входять до ОЕД $G_{\delta}^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij})$, а також відсутності повторюваності ребер між собою.

З урахуванням правил і властивостей, визначених рисунком 3.7 та виразами (3.10) – (3.15), загальна СФТМ розміром $q \times q$ з урахуванням її блочного розділення на окремі ФТМ, базовані на компонентах $G_{kf}^{-/+}(l, l+1)$, матиме такий вигляд (3.16).

Із структури СФТМ (3.16) безпосередньо випливає, що розмірність матриці становить суму $q = p + r + s + w$.

З урахуванням отриманого виразу та властивостей (3.09), (3.13) структура суміжних блоків СФТМ, зображена на рисунку 3.7, трансформується наступним чином (рисунок 3.8).

	V_1	V_2	---	V_i	V_{i+1}	V_{i+2}	V_{i+---}	V_{i+---}
V_1	$f_1(u_1)$	Θ_{12}	---	Θ_{1i}	0	0	0	0
V_2	Θ_{21}	$f_2(u_2)$	---	Θ_{2i}	0	0	0	0
---	---	---	$f_{-}(u_{-})$	---	---	---	---	---
V_i	Θ_{i1}	Θ_{i2}	---	$f_i(u_i)$	1	0	0	0
V_{i+1}	0	0	0	1	$f_{i+1}(u_{i+1})$	$\Theta_{i+1(i+2)}$	$\Theta_{i+1(i+---)}$	$\Theta_{i+1(i+---)}$
V_{i+2}	0	0	0	0	$\Theta_{i+2(i+1)}$	$f_{i+2}(u_{i+2})$	$\Theta_{i+2(i+---)}$	$\Theta_{i+2(i+---)}$
V_{i+---}	0	0	0	0	$\Theta_{i+---(i+1)}$	Θ_{i+---i}	$f_{i+---}(u_{i+---})$	$\Theta_{i+---(i+---)}$
V_{i+---}	0	0	0	0	$\Theta_{i+---(i+1)}$	$\Theta_{i+---(i+2)}$	$\Theta_{i+---(i+---)}$	$f_{i+---}(u_{i+---})$

Рисунок 3.8 – Модифікована структура суміжних блоків ФТМ у складі СФТМ

$$\begin{aligned}
& \left| M_{C\Phi TM_G_{YF}} \right| = \\
& \begin{vmatrix}
f_1(\overline{u_1}) & \theta_{12} & \dots & \dots & \theta_{1p} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\theta_{21} & f_2(\overline{u_2}) & \dots & \dots & \theta_{2p} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\theta_{(p-1)1} & \theta_{(p-1)2} & \dots & f_{p-1}(\overline{u_{p-1}}) & \theta_{(p-1)p} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\theta_{p1} & \theta_{p2} & \dots & \theta_{p(p-1)} & f_p(\overline{u_p}) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & f_{p+1}(\overline{u_{p+1}}) & \theta_{(p+1)(p+2)} & \dots & \dots & \theta_{(p+1)(p+r)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{(p+2)(p+1)} & f_{p+2}(\overline{u_{p+2}}) & \dots & \dots & \theta_{(p+1)(p+r)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{(p+r-1)(p+1)} & \theta_{(p+r-1)(p+2)} & \dots & f_{p+r-1}(\overline{u_{p+r-1}}) & \theta_{(p+r-1)(p+r)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{(p+r)(p+1)} & \theta_{(p+r)(p+2)} & \dots & \theta_{(p+r)(p+r-1)} & f_{p+r}(\overline{u_{p+r}}) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & f_{p+r+s}(\overline{u_{p+r+s}}) & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & f_{p+r+s+1}(\overline{u_{p+r+s+1}}) & \theta_{(p+r+s+1)(p+r+s+2)} & \dots & \dots & \theta_{(p+r+s+1)(p+r+s+w)} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{(p+r+s+2)(p+r+s+1)} & f_{p+r+s+2}(\overline{u_{p+r+s+2}}) & \dots & \dots & \theta_{(p+r+s+2)(p+r+s+w)} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{(p+r+s+w-1)(p+r+s+1)} & \theta_{(p+r+s+w-1)(p+r+s+2)} & \dots & f_{p+r+s+w-1}(\overline{u_{p+r+s+w-1}}) & \theta_{(p+r+s+w-1)(p+r+s+w)} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{(p+r+s+w)(p+r+s+1)} & \theta_{(p+r+s+w)(p+r+s+2)} & \dots & \theta_{(p+r+s+w)(p+r+s+w-1)} & f_{p+r+s+w}(\overline{u_{p+r+s+w}})
\end{vmatrix}
\end{vmatrix} \quad (3.16)
\end{aligned}$$

Зазначені на рисунку 3.8 складові СФТМ інтегруються в суцільну матрицю, задану виразом (3.16). Отже, виходячи з об'єднуючої матриці $|M_{\delta}^{l/l+1}|$, визначеної виразом (3.11), що є результатом блочного перитину двох суміжних компонент графо-функціональної моделі $G_{kf}^{-/+}(l, l+1)$, який визначається рамкою червоного кольору на рисунку 3.8, вираз СФТМ (3.16) у спрощеному вигляді інтерпретується таким чином

$$|M_{СФТМ_G_{YF}}| = \begin{vmatrix} |M_{\phi_{mm_1}}| & |M_{\text{нлк_}21}| & |0_{31}| & \dots & |0_{(n-1)1}| & |0_{n1}| \\ |M_{\text{впк_}12}| & |M_{\phi_{mm_2}}| & |M_{\text{нлк_}32}| & \dots & |0_{(n-1)2}| & |0_{n2}| \\ |0_{13}| & |M_{\text{впк_}23}| & |M_{\phi_{mm_3}}| & \dots & |0_{(n-1)3}| & |0_{n3}| \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ |0_{1(n-1)}| & |0_{2(n-1)}| & |0_{3(n-1)}| & \dots & |M_{\phi_{mm_n-1}}| & |M_{\text{нлк_}n(n-1)}| \\ |0_{1n}| & |0_{2n}| & |0_{3n}| & \dots & |M_{\text{впк_}(n-1)n}| & |M_{\phi_{mm_n}}| \end{vmatrix}, \quad (3.17)$$

$$|M_{\phi_{mm_l}}| \leftrightarrow \left(\begin{array}{l} G_{kf}^{-}(l) / G_{kf}^{+}(l) = G_{kf}^{+}(l) / G_{kf}^{-}(l) = G_{kf}^{-}(l) / \\ /G_{\delta}^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij}) = G_{kf}^{-}(l) / G_{\delta}^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij}) \end{array} \right),$$

де $|M_{\phi_{mm_l}}|$ – блоки СФТМ, відповідні компонентам $G_{kf} \subset G_{YF}$ за виключеними спільними ОЕД $G_{\delta}^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij})$;

$|M_{\text{впк_}l(l+1)}|$ – розріджені прямокутні матриці розмірністю.

$$\sqrt{R(|M_{\phi_{mm_l+1}}|)} \times \sqrt{R(|M_{\phi_{mm_l}}|)},$$

де R – добуток кількості строк і стовпців відповідної квадратної матриці, рівний квадрату кількості строк (стовпців), у яких єдиний одиничний елемент

$\theta_{1, \sqrt{R(|M_{\phi_{mm_l}}|)}}^{l/l+1}$ розташований у верхньому правому куту (ВПК) матриці, у той час як інші

елементи даної матриці є нульовими;

$|M_{\text{НЛК}_{(l+1)l}}|$ – розріджені прямокутні матриці розмірністю

$$\sqrt{R(|M_{\text{фтм}_{-l}}|)} \times \sqrt{R(|M_{\text{фтм}_{-l+1}}|)},$$

у яких єдиний одиничний елемент $\theta^{\frac{l+1/l}{\sqrt{R(|M_{\text{фтм}_{-l+1}}|)}}}$ розташований у нижньому лівому

куту (НЛК) матриці, у той час як інші елементи даної матриці є нульовими;

$|0_{(l\pm i)(l\mp j)}|$ – нуль-матриці розмірностями

$$\sqrt{R(|M_{\text{фтм}_{-l\mp j}}|)} \times \sqrt{R(|M_{\text{фтм}_{-l\pm i}}|)},$$

що складаються з елементів, визначених виразом (3.18), які остаточно доповнюють діагонально поєднані блоки ФТМ до повної СФТМ.

З урахуванням властивостей сумування матриць [166, 176], вираз (3.17) розкладається на складові (доданки) таким чином

$$\begin{aligned}
 |M_{\text{СФТМ}_{G_{\text{УГ}}}}| = & \begin{vmatrix} |M_{\text{фтм}_{-l}}| & |0_{2l}| & |0_{3l}| & \dots & |0_{(n-l)l}| & |0_{nl}| \\ |0_{l2}| & |M_{\text{фтм}_{-2}}| & |0_{32}| & \dots & |0_{(n-l)2}| & |0_{n2}| \\ |0_{l3}| & |0_{23}| & |M_{\text{фтм}_{-3}}| & \dots & |0_{(n-l)3}| & |0_{n3}| \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ |0_{l(n-l)}| & |0_{2(n-l)}| & |0_{3(n-l)}| & \dots & |M_{\text{фтм}_{-n-l}}| & |0_{n(n-l)}| \\ |0_{ln}| & |0_{2n}| & |0_{3n}| & \dots & |0_{(n-l)n}| & |M_{\text{фтм}_{-n}}| \end{vmatrix} + \\
 + & \begin{vmatrix} |0_{l1}| & |M_{\text{нлк}_{-2l}}| & |0_{3l}| & \dots & |0_{(n-l)l}| & |0_{nl}| \\ |M_{\text{нлк}_{-12}}| & |0_{22}| & |M_{\text{нлк}_{-32}}| & \dots & |0_{(n-l)2}| & |0_{n2}| \\ |0_{l3}| & |M_{\text{нлк}_{-23}}| & |0_{33}| & \dots & |0_{(n-l)3}| & |0_{n3}| \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ |0_{l(n-l)}| & |0_{2(n-l)}| & |0_{3(n-l)}| & \dots & |0_{(n-l)(n-l)}| & |M_{\text{нлк}_{-n(n-l)}}| \\ |0_{ln}| & |0_{2n}| & |0_{3n}| & \dots & |M_{\text{нлк}_{-(n-l)n}}| & |0_{nn}| \end{vmatrix}. \quad (3.18)
 \end{aligned}$$

У свою чергу другий доданок у виразі (3.18) представляється як сума окремих матриць, що складаються з діагонально-поєднаних блоків $|M_{\text{впк}_l(l+1)}|$, $|M_{\text{нлк}_{(l+1)l}}|$ та пов'язаних із ними нуль-матриць

$$\begin{aligned}
 |M_{\text{СФТМ}_{G_{YF}}}^{\text{ВПК/НЛК}}| &= |M_{\text{СФТМ}_{G_{YF}}}^{\text{ВПК}}| + |M_{\text{СФТМ}_{G_{YF}}}^{\text{НЛК}}| = \\
 & \left| \begin{array}{cccccc}
 |0_{11}| & |0_{21}| & |0_{31}| & \dots & |0_{(n-1)1}| & |0_{n1}| \\
 |M_{\text{впк}_{12}}| & |0_{22}| & |0_{32}| & \dots & |0_{(n-1)2}| & |0_{n2}| \\
 |0_{13}| & |M_{\text{впк}_{23}}| & |0_{33}| & \dots & |0_{(n-1)3}| & |0_{n3}| \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 |0_{1(n-1)}| & |0_{2(n-1)}| & |0_{3(n-1)}| & \dots & |0_{(n-1)(n-1)}| & |0_{n(n-1)}| \\
 |0_{1n}| & |0_{2n}| & |0_{3n}| & \dots & |M_{\text{впк}_{(n-1)n}}| & |0_{nn}|
 \end{array} \right| + \\
 & + \left| \begin{array}{cccccc}
 |0_{11}| & |M_{\text{нлк}_{21}}| & |0_{31}| & \dots & |0_{(n-1)1}| & |0_{n1}| \\
 |0_{12}| & |0_{22}| & |M_{\text{нлк}_{32}}| & \dots & |0_{(n-1)2}| & |0_{n2}| \\
 |0_{13}| & |0_{23}| & |0_{33}| & \dots & |0_{(n-1)3}| & |0_{n3}| \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 |0_{1(n-1)}| & |0_{2(n-1)}| & |0_{3(n-1)}| & \dots & |0_{(n-1)(n-1)}| & |M_{\text{нлк}_{n(n-1)}}| \\
 |0_{1n}| & |0_{2n}| & |0_{3n}| & \dots & |0_{(n-1)n}| & |0_{nn}|
 \end{array} \right|. \quad (3.19)
 \end{aligned}$$

Використовуючи властивості прямої суми матриць [166, 176] та поєднуючи вирази (3.17) – (3.19) граф G_{YF} інтерпретується наступним формальним додаванням прямих сум відповідних блоків СФТМ

$$|M_{\text{СФТМ}_{G_{YF}}}| = \bigoplus_{i=1}^n |M_{\text{фтм}_i}| + \left(\bigoplus_{\substack{i=1, \\ j=2}}^{n-1, n} |M_{\text{впк}_{ij}}| \right) + \left(\bigoplus_{\substack{j=2, \\ k=3}}^{n, n-1} |M_{\text{нлк}_{jk}}| \right) = \sum_l \left(\bigoplus_{i,j,k} |M_{\text{впк}_{ij}}| \right) \left(\bigoplus_{i,j,k} |M_{\text{нлк}_{jk}}| \right). \quad (3.20)$$

Індекси i, j, k у виразі (3.20) є незалежними від усіх попередніх виразів (зокрема – не пов'язані з ОЕД та іншими складовими графо-функціональної моделі) та визначають нумерацію блоків ФТМ, матриць ВПК, НЛК і нуль-матриць у діапазоні від 1 до n .

Запропонований метод синтезу моделей для випробувань СКРП, що базується на графо-функціональному моделюванні розподілених технологічних об'єктів відповідно до формули (3.20), базується на використанні прямих сум блоків матриць суміжності. На відміну від методу прямих сум (МПС), запропонованого в роботах [56, 69, 166], розроблюваний метод є дещо модифікованим у частині використання іншого типу матриць, застосування інших підходів що формування вихідних блоків ФТМ, їх сумування та прямого сумування. Виходячи із зазначеного, запропонованому методу присвоюється назва методу модифікованих прямих сум (ММПС). Водночас, виходячи із сформованих виразів та виведеної формули для реалізації ММПС, щодо застосування може базуватися на спрощені процедури виділення вихідних компонент $G_{kf}^{-/+}(l, l+1)$.

3.4 Процедура застосування модифікованого методу синтезу моделей для випробувань

Застосування методу, що відображується виразом (3.20) у результаті синтезу виразів (3.17) – (3.19), передбачає окреме опрацювання компонент (ФТМ) суцільної матриці $|M_{C\text{ФТМ}_{G_{YF}}}|$, кожна з яких не містить у своєму складі спільних елементів, зокрема ОЕД. Отже, пряме використання формули (3.18) вимагає певної модифікації опрацювання дерев $G_d^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij})$, що, у свою чергу, вимагає коригування виразів (3.7) – (3.13), які завдають властивості дроблення функціонального графу на компоненти.

У таких умовах логічним є застосування замість двох окремих множин розрізів E^- та E^+ однієї множини E^* , що складається з ребер e_{ij} дерев G_{OED}

$$\left\{ \begin{array}{l} E^- = \{e_a\} \left| \begin{array}{l} \downarrow \{v_i\} \subset \{G_\delta^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij})\} \\ \parallel \{e_{ij}\} \subset \{G_\delta^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij})\} \end{array} \right. \\ E^+ = \{e_b\} \left| \begin{array}{l} \uparrow \{v_j\} \subset \{G_\delta^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij})\} \\ \parallel \{e_{ij}\} \subset \{G_\delta^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij})\} \end{array} \right. \end{array} \right. \Rightarrow E^* = \{e_{ij}\} \left| \begin{array}{l} \uparrow \{v_i\} \subset \{G_\delta^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij})\} \\ \downarrow \{v_j\} \subset \{G_\delta^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij})\} \end{array} \right., \quad (3.21)$$

де \downarrow, \uparrow – відповідно символи інцидентності по напрямку і проти напрямку аналізу графа G_{YF} ;

\parallel – символ суміжності.

При наведеній заміні скасовується необхідність диференціації компонент $G_{kf} \subset G_{YF}$ на такі, що утворені різними розрізами ($G_{kf}^-(l)$ і $G_{kf}^+(l+1)$), натомість внаслідок використання одного розрізу E^* формується єдина група компонент $G_{kf}^*(l)$, щодо яких складаються взаємно-однозначні з ними блоки ФТМ $|M_{фтм_l}|$, визначені у виразах (3.15) – (3.18)

$$E^{-/+} \Rightarrow E^* \Rightarrow G_{kf}^{-/+}(l, l+1) \Rightarrow G_{kf}^*(l) \leftrightarrow |M_{фтм_l}|. \quad (3.22)$$

Враховуючи принцип одиничності елементів v_i, v_j та e_{ij} у складі ОЕД, що закладений наведеними в попередньому підрозділі правилами та основами,

$$\forall (v_i, v_j) \subset G_\delta^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij}) \rightarrow \exists e_{ij} \subset G_\delta^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij}) \left| v_i \downarrow e_{ij} \uparrow v_j, \right.$$

а також використання матриць (блоків) $|M_{внк/нлк}|$ у виразах (3.15) – (3.18), вилучення елементів $e_{ij} \subset E^*$ не призведе до втрати властивостей графо-функціональної моделі $G_{YF}\{V[F(\underline{U})], E\}$ у контексті її аналітичного відтворення за допомогою СФТМ $|M_{СФТМ_G_{YF}}|$ та/або її діагональних блоків $|M_{фтм_l}|$, оскільки властивості суміжності між вершинами v_i, v_j забезпечуються при цьому блоками $|M_{внк/нлк}|$.

Таким чином, узагальнена процедура застосування ММПС при синтезі моделі для випробувань СКРП із урахуванням виразу (3.18) та перетворень (3.19), (3.20) формалізується таким чином

$$\begin{aligned}
 A_{СКРП} = \bigcup_{h=1}^m A_h = G_{YF} \{V[F(\underline{U}), E]\} \xleftarrow{\{G_{OED}\}} & \left\{ \begin{array}{l} \forall G_{kf}^* (1) \leftrightarrow !\exists |M_{\phi m m _1}| \\ \forall G_{kf}^* (2) \leftrightarrow !\exists |M_{\phi m m _2}| \\ \dots \\ \forall G_{kf}^* (n) \leftrightarrow !\exists |M_{\phi m m _n}| \end{array} \right\} \xleftarrow{\sum_I \left(\oplus \sum_{i,j,k} \begin{array}{l} |M_{\phi m m _i}| \\ |M_{\phi n k _ij}| \\ |M_{n l k _jk}| \end{array} \right)} \\
 \xleftarrow{\sum_I \left(\oplus \sum_{i,j,k} \begin{array}{l} |M_{\phi m m _i}| \\ |M_{\phi n k _ij}| \\ |M_{n l k _jk}| \end{array} \right)} & \left| M_{C\phi TM _G_{YF}} \right| \left| M_{C\phi TM _G_{YF}} \right| = \oplus \sum_{i=1}^n |M_{\phi m m _i}| + \left(\oplus \sum_{\substack{i=1, \\ j=2}}^{n-1} |M_{\phi n k _ij}| \right) + \left(\oplus \sum_{\substack{j=2, \\ k=3}}^n |M_{n l k _jk}| \right),
 \end{aligned}
 \tag{3.23}$$

де $A_{СКРП}$ – впорядкована множина функціональних груп ОКК розподіленого технологічного об'єкту СКРП;

$A_h = \{a_{hv}\}$ – впорядковані функціональні групи (множини) ОКК СКРП різного призначення (стрілки, світлофори, ділянки колії тощо), визначені таблицею 3.1.

Послідовність дій при використанні ММПС згідно формалізацій (3.18), (3.21), що призводить до опосередкованого формування функціонально-топологічної моделі, яка закладається в основу моделі для випробувань СКРП, визначається у вигляді таблиці 3.2 [9].

Таблиця 3.2 – Послідовність дій при синтезі моделі для випробувань СКРП

№ п/п	Алгоритмічна дія	Математичний вираз дії
1.	Складання графо-функціональної моделі технологічного об'єкту СКРП	(3.8)
2.	Вибір напрямку аналізу (нумерації елементів) графо-функціональної моделі СКРП	–
3.	Суцільна послідовна нумерація вершин графо-функціональної моделі СКРП від початку до кінця напрямку аналізу	–

4.	Вибір опорних дерев G_{OED} для розмежування вихідних компонент графо-функціональної моделі СКРП	(3.14), (3.15)
5.	Видалення розрізів $E^* = \{e_{ij}\}$ для розмежування графо-функціональної моделі G_{GF} на компоненти G_{kf}^*	(3.21), (3.22)
6.	Корегування (за необхідності) нумерації (індексації) вершин графо-функціональної моделі для виконання умови суцільно-нумерованої завершеності	(3.14), (3.19), (3.20)
7.	Формування блоків ФТМ $ M_{фтм\ l} $ для кожної компоненти G_{kf}^* графо-функціональної моделі СКРП	(3.8) – (3.15), (3.17)
8.	Синтез СФТМ як основи моделі для випробувань СКРП на базі блоків ФТМ $ M_{фтм\ l} $	(3.23)

Подальший синтез моделі для випробувань має прикладний технічний характер та базується на використанні програмних засобів, які реалізують зазначені вище вирази та відношення.

Ефективність розробленого ММПС, розрахована в додатку Г за ресурсними і функціональними параметрами, вказує такі переваги методу порівняно з найближчим аналогом, як:

- зменшення обсягу програмної інформації, прогнозованої кількості помилок проектувальника моделі для випробувань та тривалості процесу її формування до 4-х разів;

- збільшення глибини контролю функціональних параметрів СКРП при використанні розробленого методу до 2-х разів.

Зазначені результати досягаються за умови асиметрії розмірностей суміжних блоків ФТМ не більше 10%.

Підрахована при цьому максимальна похибка обчислень не перевищує 5%, що вказує на ефективність розробленого методу та можливість його застосування для підвищення експлуатаційної готовності СКРП.

Отримані результати мають перспективи подальшого розвитку в технологіях контролю функціональних параметрів засобів не тільки залізничного, але й інших видів транспорту. Зокрема вони можуть бути взяті за основу вдосконалення методів і моделей забезпечення експлуатаційної готовності систем керування процесами перевезень на автомобільному, авіаційному, морському та річковому транспорті [25 – 27].

3.5 Висновки за розділом

У процесі розроблення і вдосконалення методів синтезу моделей для випробувань мікропроцесорних СКРП досягнуті такі результати:

1. На основі властивостей графоаналітичних моделей, розроблених у працях попередників, сформовано базову графічну модель технологічного об'єкту СКРП, яка взята за основу розроблення методу синтезу моделей для випробувань.

2. Шляхом трансформації базової графічної моделі розроблено принципи формування графо-функціональної моделі технологічного об'єкта СКРП, яка, на відміну від базової, інтерпретує ОКК тільки вершинами графу, зважування яких дозволяє відтворити не тільки їх статичні, але й динамічні властивості.

3. Розроблено принципи аналітичної інтерпретації графо-функціональної моделі технологічного об'єкта СКРП на базі функціонально-топологічної матриці суміжності, яка дозволяє задати всі можливі зв'язки між ОКК системи та за діагональним принципом відтворити їх динамічні функції.

4. Розроблено метод синтезу динамічної моделі для випробувань СКРП, який базується на опосередкованому діагональному представленні функціонально-топологічної матриці на основі її непересічних блоків та їх доповнень, які поєднуються у суцільну матрицю шляхом визначення їх модифікованої прямо суми, відповідно до чого методу присвоєна назва «метод модифікованих прямих сум». На відміну від найближчого аналога («метод прямих сум») розроблений метод дозволяє завдавати для об'єкту випробувань динамічні властивості, а також скорочує часові й кваліфікаційні ресурси підготовки до випробувань.

5. Оцінена ефективність використання методу модифікованих прямих сум порівняно з найближчим аналогом за критеріями мінімізації обсягу введеної інформації, кількості помилок, тривалості формування моделі для випробувань, а також максималізації глибини контролю, якого дозволяє досягти модель для випробувань. Встановлено переваги розробленого методу за зазначеними критеріями порівняно з найближчим аналогом.

РОЗДІЛ 4

НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ
ГОТОВНОСТІ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РУХОМ ПОЇЗДІВ

Одним з ключових критеріїв живучості та цінності наукових положень є їх практична валідність та виробнича затребуваність. Прикладний характер дослідження вимагає практичного застосування розроблених методів і моделей у процесі виробництва і експлуатації СКРП. Використанню розроблених методів і моделей присвячено даний розділ.

4.1 Визначення закономірностей впливу глибини контролю на експлуатаційну готовність систем керування рухом поїздів

Відповідно до матеріалів аналізу, проведеного в п. 1.3, серед усіх показників ефективності функціональних впробувань, визначених у п. 3.4, найважливішим з точки зору впливу на експлуатаційну готовність СКРП (коефіцієнт K_c) є параметр $\beta_{\text{фгп}}$, що визначає збільшення глибини контролю (тестового покриття) при використанні результатів цього дисертаційного дослідження [8].

Відповідно до результатів наукових праць, присвячених технічному контролю та експлуатаційній готовності засобів автоматизації, зокрема [126, 132], середня тривалість відновлення технічних засобів СКРП T_B буде пропорційною обсягу глибини контролю (безрозмірній величині, що визначає обсяг тестового покриття) із коефіцієнтом пропорційності, що визначає середню тривалість верифікації та відновлення $T_{\text{вв}}$ одного функціонального модуля СКРП. Зазначений функціональний модуль являє собою умовний програмно-апаратний компонент, який сумарно приведений до одного ОКК, забезпеченого одним ПАЗ, при виконанні ним однієї функції та формуванні однієї технологічної ситуації. Отже, результуюча середня тривалість відновлення T_B СКРП з урахуванням формул (2.14) – (2.18), (3.13), (3.14) визначатиметься як добуток сумарної тривалості верифікації та відновлення $T_{\text{вв}}$, кількості ОКК $m_{\text{окк}}$ та коефіцієнту

глибини контролю $K_{зк}$, що визначається як відношення обсягу тестового покриття до загальної масштабності технологічного об'єкту [8]

$$T_B = (m_{окк} + m_{наз} + m_{ф} + m_{мс}) T_{вс} K_{зк} = \frac{N_{фmn}}{N_{СКРП}} \sum_{i=1}^{m_{окк}+m_{наз}+m_{ф}+m_{мс}} t_{вс_i}, \quad (4.1)$$

де $N_{СКРП}$ – масштабність технологічного об'єкту СКРП;

$t_{вс_i}$ – тривалість верифікації та відновлення одного функціонального модуля СКРП з умовним номером i .

Масштабність СКРП визначається обсягом внутрішніх логічних зв'язків між ОКК та зовнішніх логічних зв'язків між ОКК та програмно-апаратними компонентами СКРП, що породжують відповідні функції та технологічні ситуації.

З приведених виразів (Г.8), (Г.9) у додатку Г й інших матеріалів та інших результатів досліджень ефективності ММПС за критерієм збільшення тестового покриття випробувань, викладених у п. 3.4, впливає, що приведені значення Y_2 та Y_3 визначають відповідно обсяги внутрішніх і зовнішніх зв'язків ОКК (складність і масштабність технологічного об'єкту СКРП), звідки загальна масштабність СКРП дорівнюватиме їх добутку: $N_{СКРП} = Y_2 \times Y_3$.

З рахуванням ізоморфізму між компонентами тестового покриття, встановленого в п. 2.1, та прийнятих у п.п. 2.2, 2.3, 3.4 обмежень щодо моделі оцінки тестового покриття, впливає рівнозначність масштабності СКРП та загальної кількості її ОКК, ПАЗ, функцій і технологічних ситуацій $m_{окк} + m_{наз} + m_{ф} + m_{мс} = N_{СКРП}$, звідки відбувається скорочення виразів у формулі (4.1).

$$T_B = Y_2 Y_3 T_{вс} \frac{N_{фmn}}{Y_2 Y_3} = T_{вс} N_{фmn}. \quad (4.2)$$

Відповідно до формул (Г.8), (Г.9) середня тривалість відновлення СКРП при використанні моделей для функціональних випробувань, сформованих за

двома найближчими аналогами ММПС та МПС, з урахуванням встановлених обмежень визначатиметься як

$$\begin{aligned} T_B^{ММПС} &= T_{\text{вв}} \left((Y_2 - Y_3)^2 + Y_2 (Y_2 - 2Y_3) \right), \\ T_B^{МПС} &= T_{\text{вв}} (Y_2 - Y_3)^2. \end{aligned} \quad (4.3)$$

а інтенсивності відновлення СКРП μ , як величини, обернені до середнього часу відновлення при експоненціальному законі розподілу відмов (характерному для СКРП), визначаються як

$$\begin{aligned} \mu_B^{ММПС} &= \frac{1}{T_{\text{вв}} \left((Y_2 - Y_3)^2 + Y_2 (Y_2 - 2Y_3) \right)}, \\ \mu_B^{МПС} &= \frac{1}{T_{\text{вв}} (Y_2 - Y_3)^2}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

З урахуванням формули (1.5) та (4.4) визначаються вирази для коефіцієнту готовності СКРП при використанні різних моделей для випробувань

$$\begin{aligned} K_2^{ММПС} &= \frac{T_{cp}}{T_{cp} + T_{\text{вв}} \left((Y_2 - Y_3)^2 + Y_2 (Y_2 - 2Y_3) \right)}, \\ K_2^{МПС} &= \frac{T_{cp}}{T_{cp} + T_{\text{вв}} (Y_2 - Y_3)^2}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Вирази (4.2) – (4.4) формують закономірності, які визначають залежність параметрів експлуатаційної готовності (коефіцієнту готовності, середнього часу та інтенсивності відновлення) від глибини контролю та масштабності СКРП при різних підходах до контролю функціональних параметрів, що становлять найближчі аналоги.

З точки зору підвищення експлуатаційної готовності СКРП, на досягнення якого спрямоване дане дослідження, наукову та практичну цінність визначають виграш у значеннях інтенсивності відновлення μ та коефіцієнту готовності при використанні ММПС порівняно з МПС.

Шляхом відношення верхнього та нижнього виразів у формулі (4.5) формується відповідний вираз для значення $\delta\mu_{СКРП}$, що визначає підвищення експлуатаційної готовності СКРП з позиції збільшення інтенсивності їх відновлення

$$\delta\mu_{СКРП} = \frac{\mu_{СКРП}^{ММПС}}{\mu_{СКРП}^{МПС}} = \frac{T_{вг} (Y_2 - Y_3)^2}{T_{вг} ((Y_2 - Y_3)^2 + Y_2 (Y_2 - 2Y_3))} = \frac{(Y_2 - Y_3)^2}{(Y_2 - Y_3)^2 + Y_2 (Y_2 - 2Y_3)}, \quad (4.6)$$

звідки випливає незалежність параметрів відновлення СКРП від показників їх безвідмовності.

Побудована згідно виразу (4.6) 3D-залежність показника $\delta\mu_{СКРП}$ від складності та масштабності технологічного об'єкта СКРП наведена на рисунку (4.1).

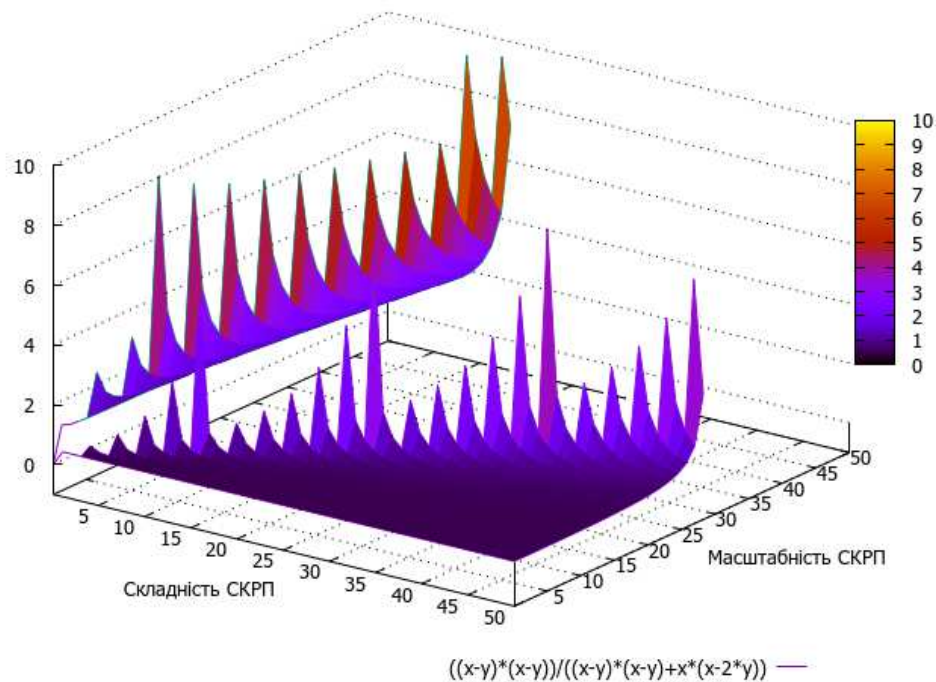


Рисунок 4.1 – 3D-залежності збільшення інтенсивності відновлення СКРП від складності та масштабності технологічних об'єктів

З наведених поверхонь випливає, що за виключенням точок нескінченного розриву найбільше збільшення інтенсивності відновлення відбувається при максимальній відповідності складності та масштабності СКРП, при цьому спостерігається позитивна монотонність для цього параметру для всіх значень кількості внутрішніх і зовнішніх зв'язків.

Точки нескінченного розриву визначають значення, при яких втрачає сенс використання розроблених методів і моделей випробувань, пояснення характеру їх закономірностей вимагає окремого дослідження. В цілому така тенденція гіпотетично пояснюється неприпустимістю суттєвого зростання внутрішньої розмірності і складності окремих ОКК порівняно із СКРП у цілому.

Відповідно до формули (1.5) і (4.5) підвищення експлуатаційної готовності СКРП з точки зору збільшення коефіцієнту δK_2 готовності визначається як

$$\delta K_2 = \frac{T_{cp} (T_{cp} + T_{\text{вс}} (Y_2 - Y_3)^2)}{T_{cp} (T_{cp} + T_{\text{вс}} ((Y_2 - Y_3)^2 + Y_2 (Y_2 - 2Y_3)))} = \frac{T_{cp} + T_{\text{вс}} (Y_2 - Y_3)^2}{T_{cp} + T_{\text{вс}} ((Y_2 - Y_3)^2 + Y_2 (Y_2 - 2Y_3))}. \quad (4.7)$$

Як випливає з отриманого виразу, інтенсивність збільшення коефіцієнту готовності СКРП залежить від середнього наробітку до відмови та середньої тривалості відновлення і верифікації одного функціонального модуля. При вихідних значеннях цих параметрів на рівні трьох років та 24 хвилин закономірність, визначена формулою (4.7), інтерпретована у відсотки, демонструється 3D-поверхнею, зображеною на рисунку 4.2.

З отриманої поверхні випливає певний діапазон співвідношень між обсягом внутрішніх і зовнішніх зв'язків ОКК СКРП, при яких розроблені методи та моделі функціональних випробувань мають ефективність щодо підвищення коефіцієнту готовності. Шляхом встановлення обмежень, при яких спостерігається додатне збільшення, а не зменшення коефіцієнту готовності, зазначена область (діапазон) визначається поверхневим графіком на рисунку 4.3.

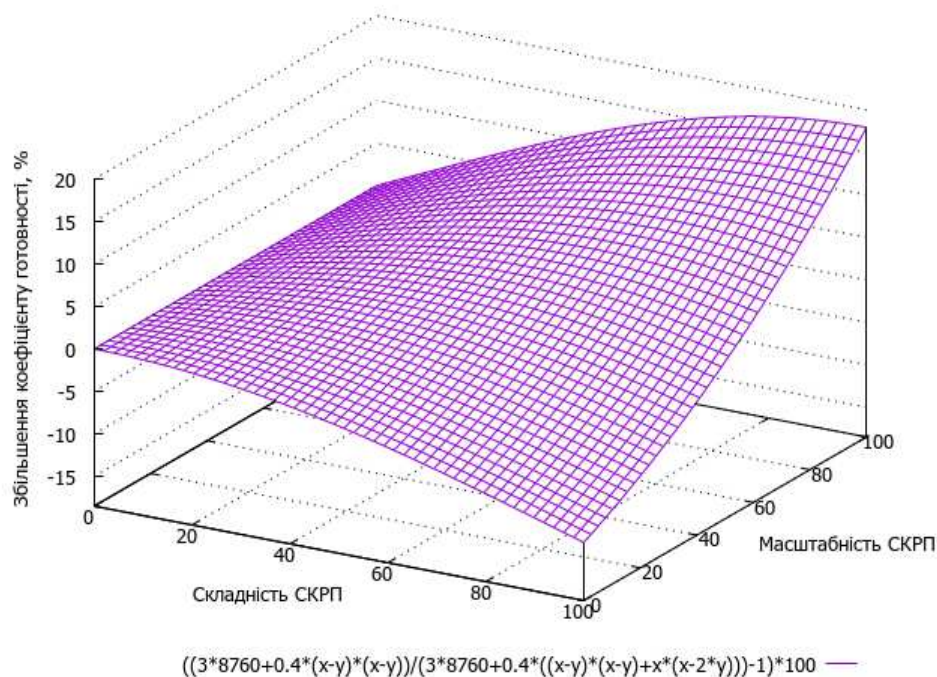


Рисунок 4.2 – 3D-залежність збільшення коефіцієнту експлуатаційної готовності СКРП від складності й масштабності технологічного об'єкту

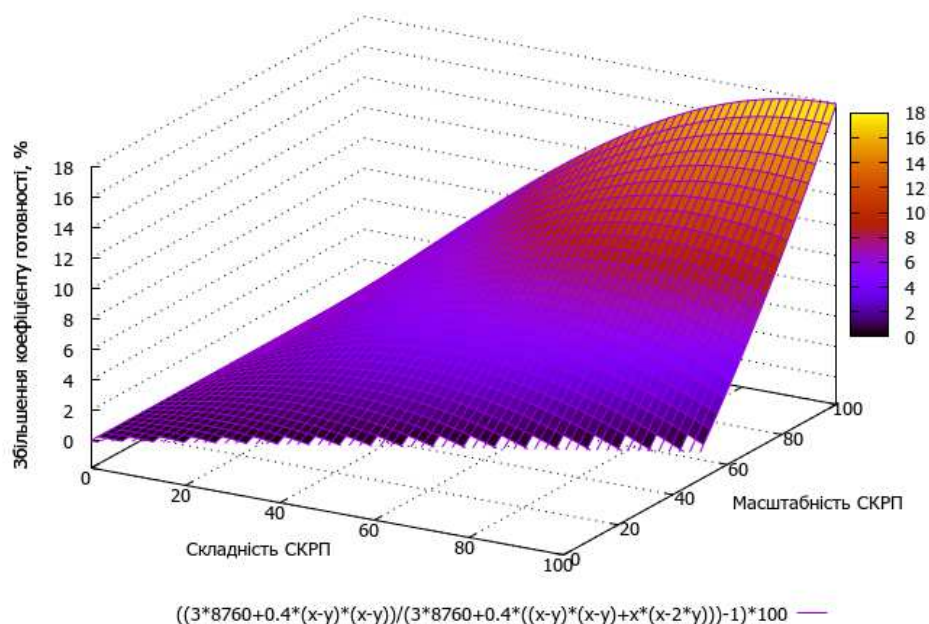


Рисунок 4.3 – Область додатнього збільшення коефіцієнту готовності при використанні результатів дослідження

Враховуючи встановлене збільшення коефіцієнту готовності СКРП до 18% при максимальній масштабності і складності технологічного об'єкта, зважаючи на визначений у першому розділі (таблиця 1.2) коефіцієнт кореляції між кількістю відмов пристроїв СКРП та сумарною затримкою в русі поїздів на рівні 0,91, отримана перевага розробленого методу дозволяє зменшити прогнозовану кількість затримок поїздів (непродуктивний простій) до 16%. Такий прогноз буде справедливим у разі порівняння однотипних мікропроцесорних СКРП, щодо яких здійснюється контроль функціональних параметрів за методами та підходами, щодо яких здійснюється порівняння.

4.2 Синтез моделі для випробувань системи мікропроцесорної централізації

Прикладне застосування ММПС, заданого формулою (3.23), вимагає створення спеціалізованого програмного забезпечення, що закладається в систему автоматизованого проектування (САПР) моделі для випробувань [9, 18–24].

При використанні МПС [56, 69, 166] для цього слугувала спеціальна комп'ютерна програма, що здійснювала синтез моделі на базі блоків ПТМ. Зазначена програма береться за основу для розроблення відповідного САПР, а її коригування при цьому враховує відмінності між МПС і ММПС.

Також слід зазначити, що відповідно до результатів попереднього підрозділу, функції ОКК $f_i(u_i)$ можуть бути задані вкладеними графами $G(K,A)$. З урахуванням досвіду використання релейно-контактної логіки та мов програмування, що на ній базуються [5, 166], за основу формування вкладених графів $G(K,A)$ можуть бути взяті релейно-контактні схеми відповідних об'єктів (стрілок, світлофорів, ділянок колії тощо). У такому випадку функціями вершин вкладеного графу мають бути дискретні функції, що відтворюють логіку роботи відповідних релейно-контактних елементів, закладених у роботу відповідних схем керування. Функціональні вершини K при цьому відтворюватимуть дані релейно-контактні елементи, а ребра A – з'єднання між ними.

Виходячи із зазначеного, функції $f_i(u_i)$ вкладених графів є взаємопов'язаними функціями алгебри логіки (ФАЛ), поточні значення яких

взаємопов'язані із значеннями інших функцій, а початкові значення безпосередньо залежать від стартових умов завдання стану кожної функціональної вершини

$$f_j^{in}(\bar{u}_j) \leftrightarrow K \subset G(K, A) \mid f_j^{in}(\bar{u}_j) = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases}$$

$$\bar{u}_j = \phi_j \left(\bigcup_{\substack{i=1, \\ i \neq j}}^n f_i^{in}(\bar{u}_i) \right) = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \quad (4.8)$$

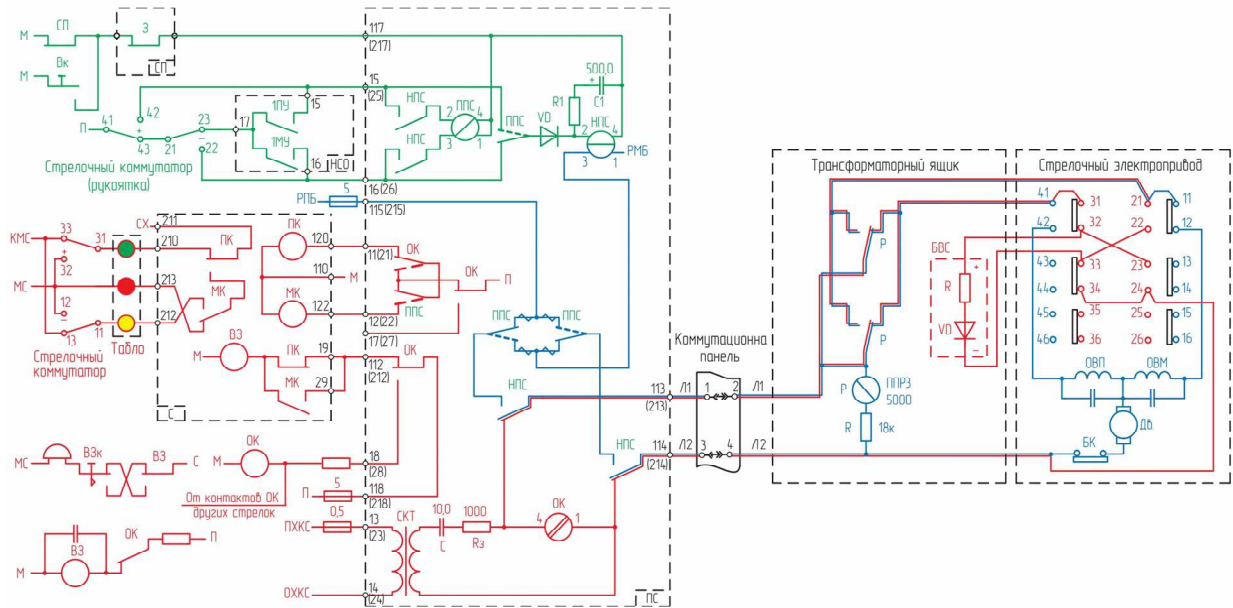
де ϕ – функція, що визначає стан умовних реле та їх контактів у складі схеми, яка відтворюється вкладеним графом $G(K, A)$.

З урахуванням виразу (4.8) вкладений граф може бути повністю заданий у аналітичному вигляді відповідною ФАЛ. Проте використання графічних образів релейно-контактних схем є доречнішим і зручнішим за їх формалізацію, проте це не є принциповим з точки зору синтезу моделей для випробувань МПЦ та інших СКРП розподіленими технологічними об'єктами.

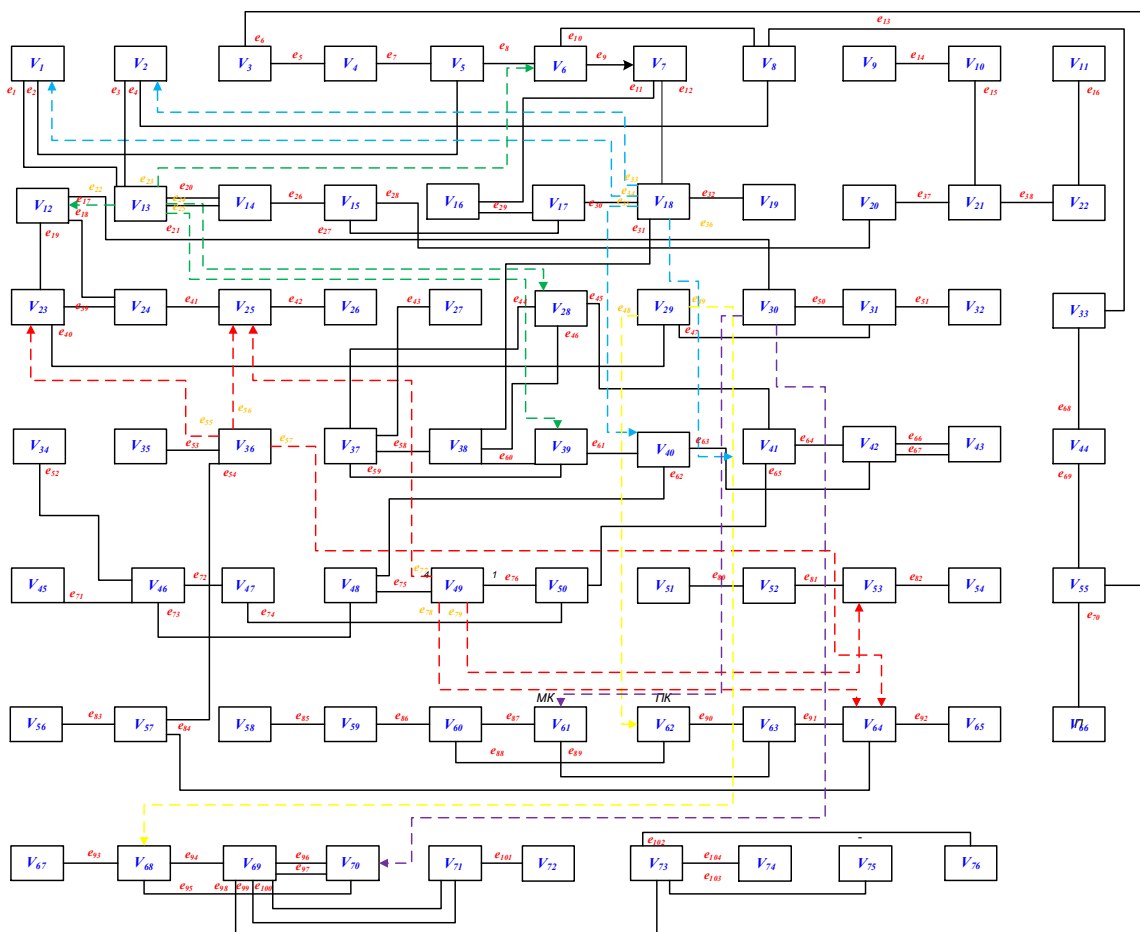
На прикладі функціональної вершини стрілки ЕЦ вкладений граф $G(K, A)$, базований на двопровідній схемі керування стрілочним електроприводом, наведено на рисунку 4.4.

З урахуванням положень алгебри логіки та дискретної математики [176] наведений граф функціональної вершини $G(K, A)$ є графом переходів і виходів дискретного автомату, яким є відповідна функціональна вершина в даному випадку. Враховуючи, що до складу схеми керування стрілкою (рисунок 4.4-а) входять внутрішні релейно-контактні елементи з пам'яттю (поляризоване пускове реле ППС, комбіноване контрольне реле ОК), стан яких не змінюється при відсутності впливів на відповідний ОКК (стрілку), що полягає у відсутності подачі команд на її переведення, а стан вихідних змінних (контроль поточного положення стрілки) залежить тільки від відповідних внутрішніх змінних (стану контрольних реле ОК, ПК і МК), то відповідна функціональна вершина є дискретним автоматом I роду (автомат Мілі).

а)



б)



а – двопровідна схема керування стрілкою;

б – вкладений граф функціональної вершини стрілки

Рисунок 4.4 – Вкладена графо-функціональна модель стрілки

Відповідно до рисунку 4.4-б функціональний підграф $G(K,A)$ для стрілки містить 76 вершин, згідно чого розмірність СФТМ для зазначеного графу складатиме 76×76 . Така розмірність є достатньо громіздкою задля безпосереднього формування. Тому для синтезу підмоделі для відтворення стрілки у складі моделі для випробувань системи МПЦ доцільно скористатися ММПС, запропонованим у третьому розділі цього дослідження.

Відповідно до формул (3.14) – (3.23) і процедури, формалізованої у вигляді таблиці 3.2, першим кроком використання ММПС для функціональної вершини стрілки ЕЦ (за умови виконуваності п.п. 1 – 3 таблиці 3.2 щодо складеного вкладеного графу) є виділення масиву опорних дерев G_{OED} із послідуочим видаленням розрізу $E^* = \{e_{ij}\}$ для зазначеної графо-функціональної моделі при дотриманні встановлених вимог ММПС до них.

Із дотриманням правил, встановлених у підрозділах 3.2, 3.3 цього дослідження, для функціональної вершини (вкладеного графу) стрілки обираються такі опорні елементарні дерева $G_o^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij})$, індекси елементів яких визначаються таблицею 4.1 (всього утворюється дев'ять компонент G_{kf}).

Відповідно до таблиці 4.1 утворюючим розрізом $E^*_{стр}$, що формуватиме компоненти $G_{kf}(l)$, буде $E^*_{стр} = \{e_9, e_{26}, e_{38}, e_{58}, e_{68}, e_{73}, e_{82}, e_{86}, e_{103}\}$, $[E^*_{стр}] = 9$. Для зазначених компонент формуються блоки ФТМ $|M_{фтм_l}|$, що вводяться у САПР моделі для випробувань МПЦ.

Таблиця 4.1 – Визначення ОЕД та розрізу для графу $G(K,A)$ стрілки

Номер компоненти G_{kf}	Значення l	Значення $l+1$	Індекс вершини v_i	Індекс вершини v_j	Індекс ребра e_{ij}
1	1	2	6	7	9
2	2	3	14	15	26
3	3	4	21	22	38
4	4	5	30	31	58
5	5	6	37	38	68
6	6	7	45	46	73
7	7	8	53	54	82
8	8	9	62	63	86
9	9	–	71	72	103

За відповідним принципом згідно типових альбомів складаються вкладені графи $G(K,A)$ усіх стрілок та інших ОКК залізничної станції.

Після формування вкладених графів для усіх ОКК необхідним є синтез СФТМ для усієї залізничної станції, що закладається в модель для випробувань системи МПЦ. На прикладі СКРП станції «Карапиші» (рисунок 3.5) із урахуванням таблиці 3.2 для її графу G_{YF} обираються такі ОЕД

$$G_{\partial}^{1/2}(v_5, v_7, e_5), G_{\partial}^{2/3}(v_6, v_8, e_6), G_{\partial}^{3/4}(v_{16}, v_{18}, e_{17}), G_{\partial}^{4/5}(v_{17}, v_{19}, e_{18}), \\ G_{\partial}^{5/6}(v_{38}, v_{39}, e_{42}), G_{\partial}^{6/7}(v_{42}, v_{43}, e_{44}), G_{\partial}^{7/8}(v_{51}, v_{53}, e_{54}), G_{\partial}^{8/-}(v_{52}, v_{54}, e_{56}),$$

що породжують утворюючий розріз $E^*_{МПЦ} = \{e_5, e_6, e_{17}, e_{18}, e_{42}, e_{44}, e_{54}, e_{56}\}$, $[E^*_{МПЦ}] = 8$.

Блоки ПТМ $|M_{фтм_l}|$, які формуються згідно утворених розрізом $E^*_{МПЦ}$ компонент $G_{kf}(1 - 8)$, у модифікованому вигляді вводяться у відповідну САПР.

Беручи до уваги попередній досвід використання МПС для синтезу моделей для випробувань МПЦ [70] і адаптуючи застосовану при ньому структурну схему синтезу відповідних моделей, коригуючи її під особливості ММПС, формується структура роботи САПР моделі для випробувань СКРП (рисунок 4.5).

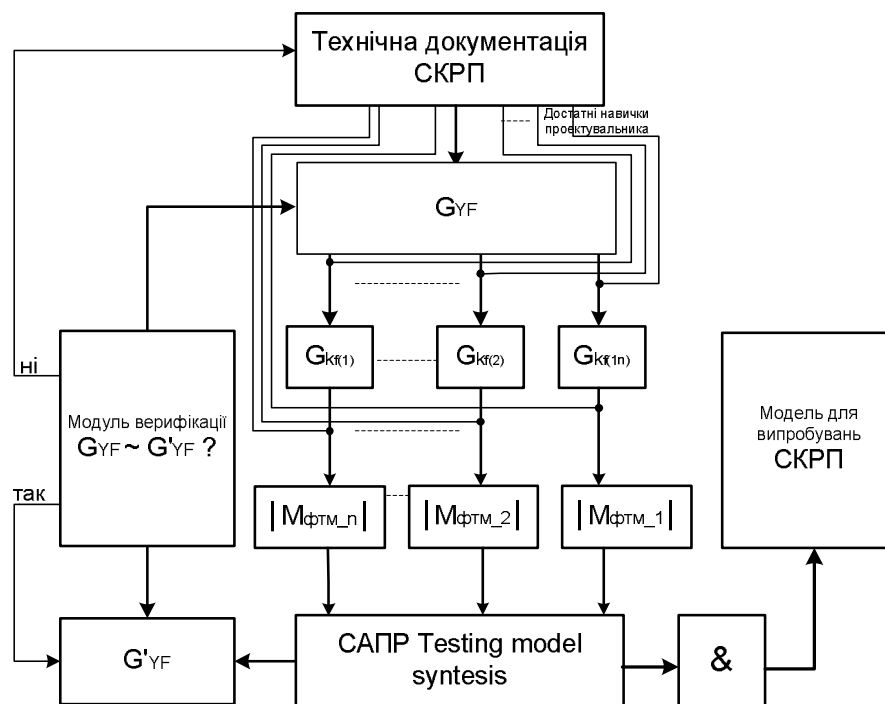


Рисунок 4.5 – Функціональна схема роботи САПР синтезу моделі для випробувань СКРП на базі ММПС

Функціональний G_{YF} для СКРП (у даному випадку – МПЦ, хоча алгоритм є універсальним для будь-яких систем) складається на підставі аналізу технічної документації на технологічний об'єкт, на прикладі системи МПЦ – головним чином, згідно схематичного плану станції (для станції «Крапиші» – рисунок 3.1). Аналогічно до використання МПС, при достатніх компетентностях проєктувальника випробувальної моделі $G_{kf}(l)$ і навіть блоки ФТМ $|M_{фтм_l}|$ можуть формуватися безпосередньо на підставі аналізу технічної документації, оминаючи візуалізацію повної графо-функціональної моделі.

Блоки ФТМ доцільно представляти у вигляді текстових файлів $M_i.txt$, що завантажуються у відповідний САПР (рисунок 4.6).

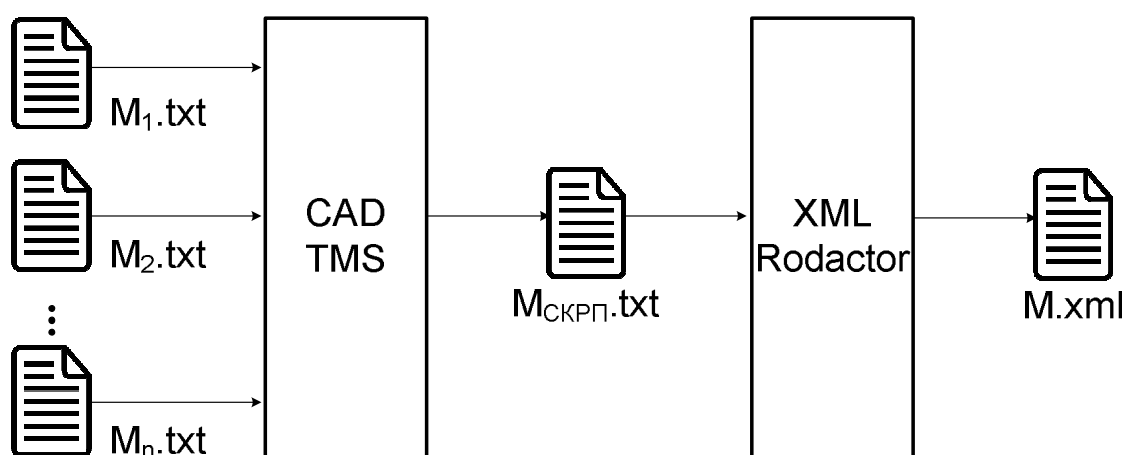


Рисунок 4.6 – Спосіб представлення блоків ФТМ та їх інтеграції у САПР моделі для випробувань СКРП

Програмні засоби САПР, що на рисунку 4.6 позначені як CAD TMS (Testing model synthesis), формує результуючий текстовий файл $M_{СКРП}.txt$. Зазначений файл через перетворювач формату *.txt у формат *.xml (для файлів конфігурації), позначений як XML Redactor, конвертується у належний для конфігурації формат. У загальному випадку це може бути будь-який формат, прийнятний для файлів конфігурації (*.cfg, *.ini тощо).

Формування моделі для випробувань у вигляді відповідного програмного модулю (рисунок 4.6) відбувається після верифікації сгенерованого САПР

програмного забезпечення на предмет помилок при виконанні всього ланцюга від вибору ОЕД, розрізі E^* , складання ФТМ та їх текстових файлів, що відбувається в блоці модуля верифікації. Зазначений модуль візуалізує результат синтезу функціонального графа у вигляді контрольного графа G'_{YF} . Верифікація (адекватність моделі) підтверджується у разі ізоморфізму графів G_{YF} та G'_{YF} [176].

Шляхом корегування комп'ютерної програми, що використовувалася при МПС, формується програмний код САПР ММПС, який реалізує функціональну схему синтезу моделі, зображену на рисунку 4.5.

У результаті використання САПР ММПС для синтезу моделі для випробувань МПЦ станції «Карапиші» модулем верифікації утворено контрольно-функціональний граф G'_{YF} , що зображений на рисунку 4.7.

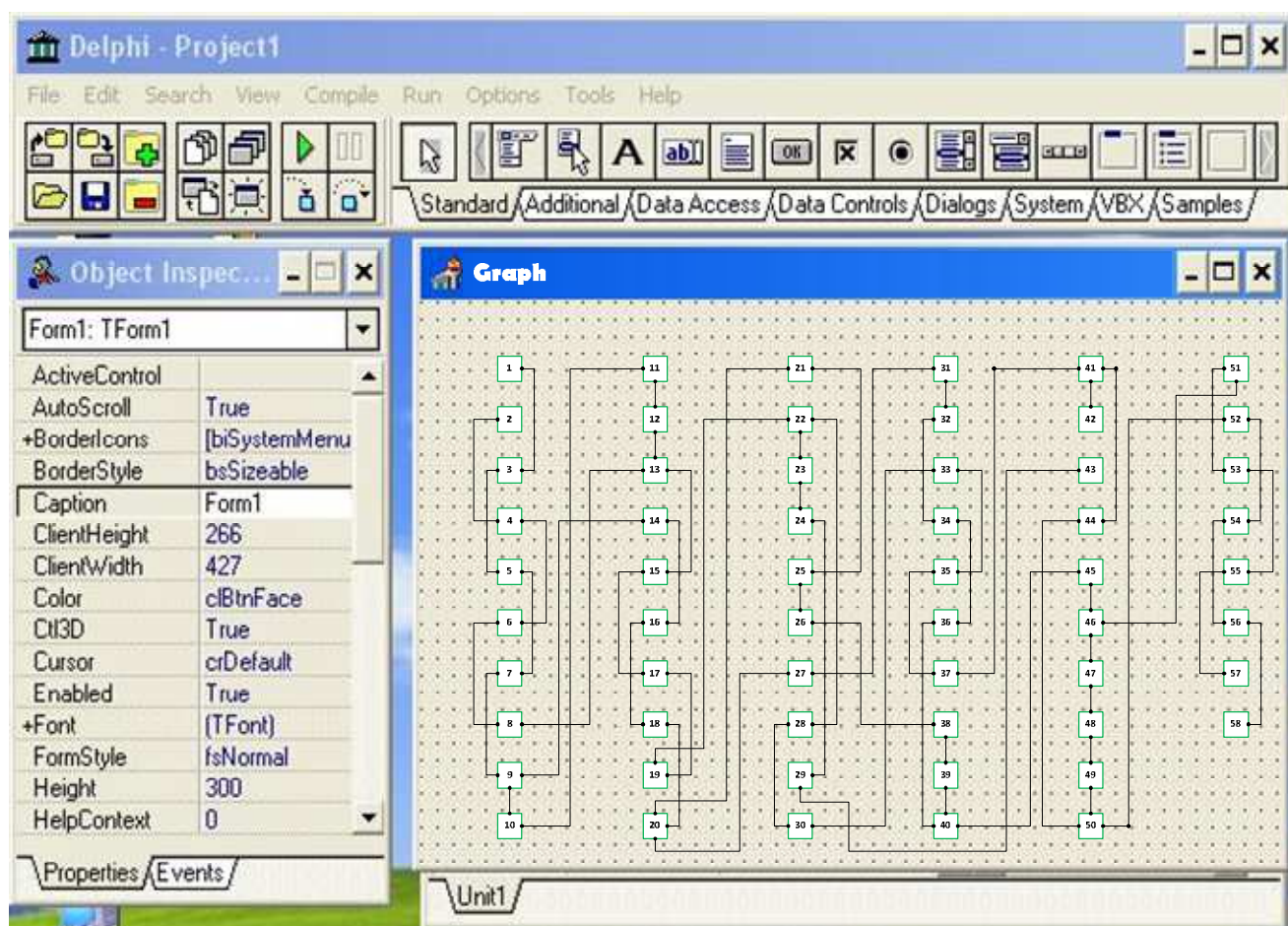


Рисунок 4.7 – Візуалізація роботи модуля верифікації САПР ММПС для МПЦ станції «Карапиші» у середовищі Delphi 7.0

Із порівняння рисунків 3.5 і 4.7 можна впевнитися в дотриманні ізоморфізму між відповідними вихідним і контрольним функціональними графами, що свідчить про коректність дотримання всіх процедур синтезу моделі.

Аналогічним чином виконується синтез і верифікація вкладених моделей для функціональних вершин, які за функціональними схемами, зображеними на рисунку 4.5 і 4.6, інтегруються в модель для випробувань СКРП у цілому. Адекватність моделі для випробувань у цілому (вже після виконання синтезу) перевіряється шляхом тестування. На прикладі МПЦ станції «Карапиші» адекватність синтезованої моделі перевірена та підтверджена із використанням програми TestCAN шляхом відтворення всіх можливих станів ОКК у складі моделі та їх порівняння з нормованими (регламентованими протоколом обміну) для відповідних типів контролерів, що входять до складу об'єкту випробувань, за методикою, наведеною в працях [56, 69].

Використання розробленого методичного підходу до контролю функціональних параметрів СКРП здійснено також щодо інтелектуально-аналітичної системи підтримки прийняття рішень (ІАС ППР) для мікропроцесорної диспетчерської централізації (ДЦ) промислового комбінату [4]. Можливість використання підходу щодо діагностування релейно-контактних пристроїв СКРП мікропроцесорними засобами діагностики підтверджена на прикладі контрольного пункту автоматичної локомотивної сигналізації (КП АЛСН) моторвагонного депо (додаток Д) [1 – 3]. Результати відповідних апробаційних досліджень підтверджують універсальність підходу щодо різних видів СКРП як на магістральному, так і промислового транспорту.

4.3 Результати випробувань системи мікропроцесорної централізації та їх оброблення

Розроблені метод ММПС та модель оцінки тестового покриття функціональних випробувань використані під час імітаційних та стендових випробувань системи МПЦ станції «Карапиші» на базі ТОВ «Хартрон-Енерго» (м. Харків) на різних етапах виробництва протягом 2018 – 2020 років [119].

Нижче наведено аналіз деяких статистичних даних, які були отримані за результатами функціональних випробувань програмного забезпечення (ПЗ) пристроїв середнього рівня в одноканальному варіанті для всіх каналів резервування підсистеми обробки залежностей [3, 4, 14, 32, 103].

Слід зазначити, що в кожного каналу резервування середнього рівня є свій незалежний розробник або група розробників. За вказаний час було проведено десять етапів (виділено десять контрольних точок розробки ПЗ) випробувань; на кожному етапі (протяжність кожного етапу 6–7 робочих днів без врахування вихідних) проведені комплексні випробування програмного забезпечення кожного каналу резервування. На основі складених протоколів випробувань по закінченню кожного етапу розробникам програмного забезпечення видавалися відповідні виписки з протоколів, що містили зауваження, які підлягали усуненню у встановлені строки. Наведені нижче залежності отримані на основі даних протоколів випробувань, оцінка їх достовірності виконана за методом тестування, що описаний у роботі [69].

У результаті отримано розподіл загальних помилок розробників програмного забезпечення в дискретному часі, який являє собою етапи випробувань. На рисунку 4.8 наведені графіки загальних помилок по трьом каналам, зіставлені в одних осях.

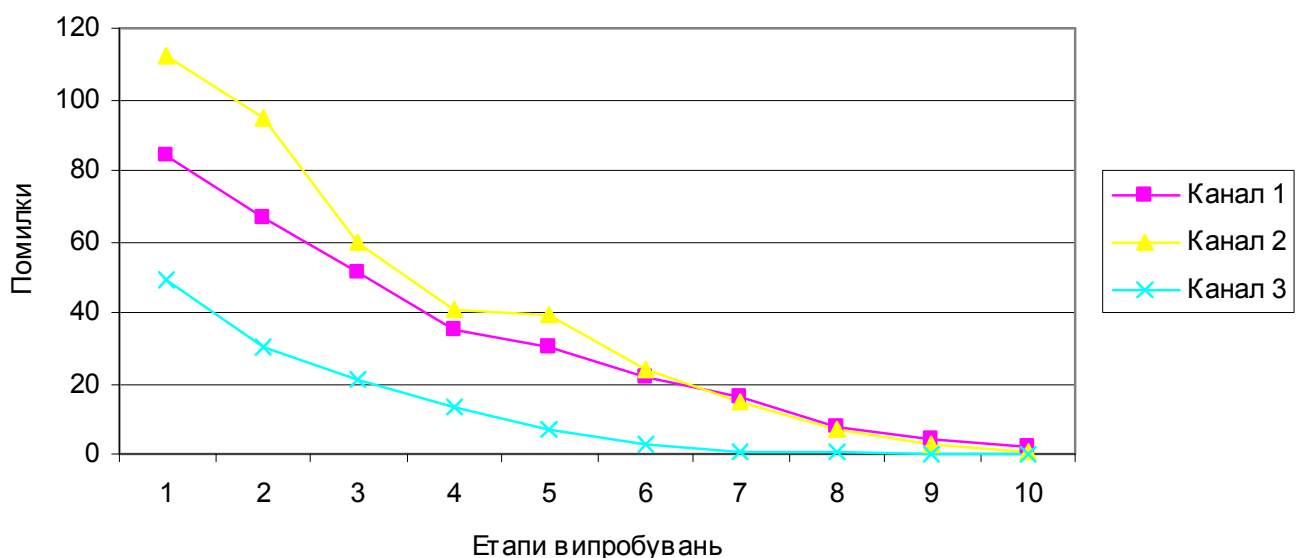


Рисунок 4.8 – Графік розподілу загальних помилок ПЗ каналів резервування системи МПЦ за етапами випробувань

Як видно з графіків, в розподілі помилок явно просліджується експоненціальна складова, що додатково підтверджує найбільшу розповсюдженість експоненціальної функції в природі. Відповідно висувається гіпотеза про саме експоненціальний закон розподілу загальних помилок ПЗ у трьох каналах резервування підсистеми логічних залежностей системи МПЦ.

Відповідно висувається гіпотеза про саме експоненціальний закон розподілу загальних помилок ПЗ у трьох каналах резервування підсистеми логічних залежностей системи МПЦ.

Для перевірки висунутої гіпотези використовується спеціалізоване програмне забезпечення EasyFit 3.0, яке здійснює встановлення законів розподілу випадкових статистичних величин, використовуючи при цьому відомі математичні критерії – Колмогорова, Бартлета, χ^2 -квадрат тощо.

Для цього попередньо вводяться наведені на рисунку 4.8 статистичні дані у програмне вікно EasyFit 3.0 (рисунок 4.9).

	A	B	C
1	117	82	50
2	97	67	30
3	60	47	22
4	41	38	18
5	39	36	9
6	22	21	4
7	18	18	1
8	9	9	1
9	3	3	1
10	2	2	1
11			
12			

Рисунок 4.9 – Інтерфейс введення статистичних даних з результатів випробувань ПЗ системи МПЦ у програмне середовище EasyFit 3.0

У програмному вікні на рисунку 4.9 в три окремі стовпчики введено дані випробувань ПЗ підсистеми логічних залежностей МПЦ для кожного з її каналів резервування. Задачею послідувочої обробки даних є встановлення дискретної

випадкової величини, що є усередненим результатом визначення кількості помилок в усіх трьох каналах резервування, а також визначення закону її розподілу та додаткових параметрів.

Після введення відповідних статистичних даних про результати випробувань ПЗ системи МПЦ спеціалізоване програмне середовище EasyFit 3.0 виконує їх оброблення та визначає із певними відхиленнями ймовірний закон розподілу дискретної випадкової величини (рисунок 4.10).

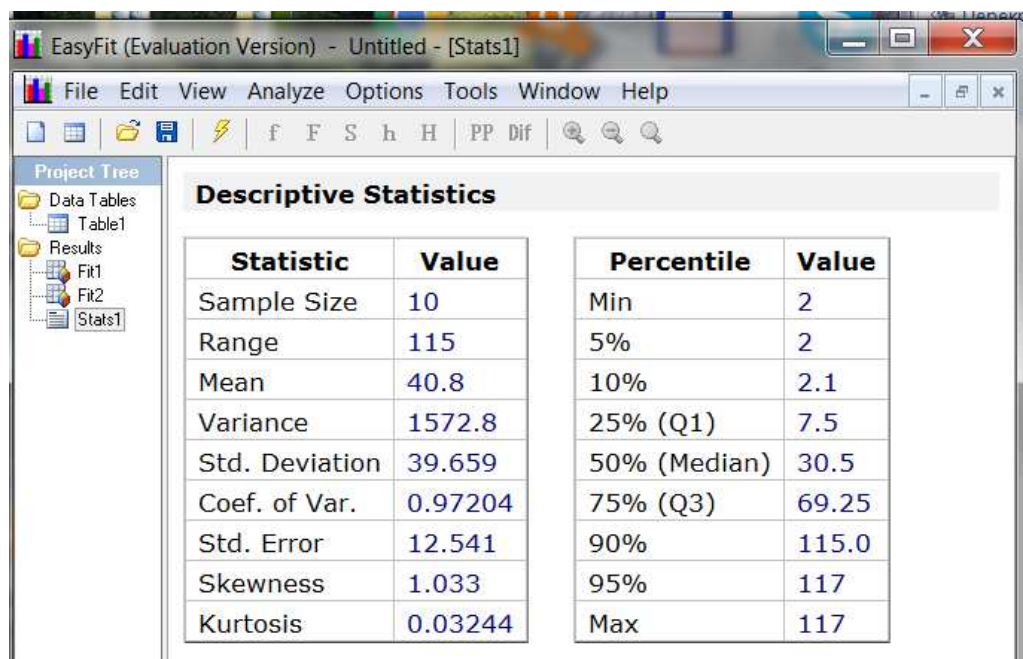


Рисунок 4.10 – Цифрові результати оброблення статистичних даних про результати випробувань ПЗ системи МПЦ програмою EasyFit 3.0

Як вбачається із рисунку 4.10, програмним середовищем не тільки за принципом рангової пріоритетності визначено експоненціальний закон розподілу дискретної випадкової величини (якою є середня кількість помилок в усіх трьох каналах резервування підсистеми логічних залежностей системи мікропроцесорної централізації стрілок та сигналів), але й підраховано основні параметри дискретної випадкової величини, такі як математичне сподівання та дисперсію. Також визначено додаткові параметри дискретної випадкової величини, такі як середньоквадратичне відхилення, коефіцієнт кореляції тощо.

Згідно підрахованих і наведених на рисунку 4.10 результативних даних програмним середовищем EasyFit 3.0 побудовано гістограму та графік розподілу дискретної випадкової величини, що становить результати випробувань ПЗ підсистеми логічних залежностей МПЦ (рисунок 4.11).

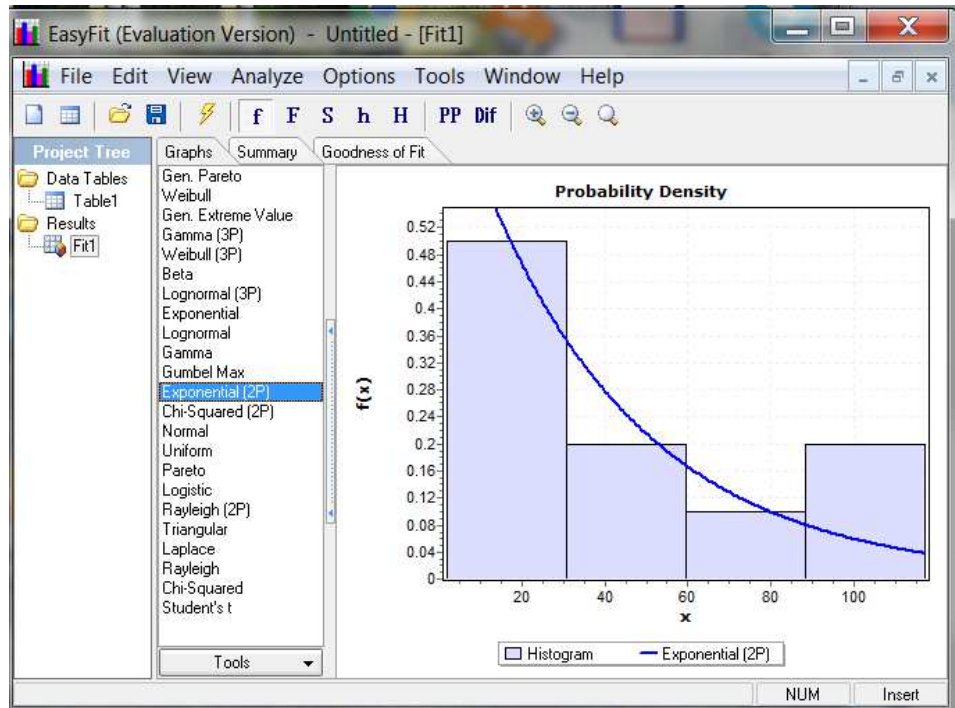


Рисунок 4.11 – Гістограма та графік розподілу дискретної випадкової величини, що визначає результати випробувань ПЗ системи МПЦ

Експонентний закон розподіляє також і пріоритет надійності, часто використовуваного для прогнозування надійності в період нормальної експлуатації, коли поступові відмови ще не проявилися і надійність характеризується раптовими відмовами. Ці відмови викликаються несприятливим збігом багатьох обставин і тому мають постійну інтенсивність.

Експоненціальне розподіл знаходить широке застосування в аналітичному обслуговуванні, аналізує розподіл технологій на відмову від виробів, час безвідмовної роботи елементів.

Як видно з графіків, не дивлячись на загальний для всіх трьох каналів характер залежностей, в ПЗ кожного каналу спостерігається достатньо суттєва різниця в кількості несправних помилок на кожному етапі випробувань (висота

кривих), так і різна швидкість зміни функцій розподілу (нахил кривих в бік «позитивних змін» на графіках).

Це пояснюється як суб'єктивними факторами, такими як: різна кваліфікація розробників програмного забезпечення, компетенція в області технології функціонування електричної централізації, інтенсивність взаємодії з технологіями, рівень відповідальності і т.д., так і об'єктивними, а саме: наявність одного чи групи розробників для програмного забезпечення різних каналів резервування, різна реакція на оперативні зміни в технічному завданні тощо. Наприклад, над розробкою ПЗ другого і третього каналів резервування підсистеми обробки залежностей МПЦ працюють по одному спеціалісту, а першого – два. В той же час кваліфікацію розробника ПЗ третього каналу можна вважати найвищою серед усіх відповідних програмістів.

Далі проведена приблизна апроксимація отриманих залежностей для якісної оцінки ефективності випробувань ПЗ кожного каналу резервування. Вона виконана на базі гіпотези, що розподіл помилок у дискретному часі має наступний вигляд

$$N_{i_{заг\ ном}}(t) = \frac{1}{K_{i_{заг}}} \cdot e^{-\lambda_{i_{заг}} t}, \quad (4.9)$$

де $N_{i_{заг\ ном}}(t)$ – кількість загальних помилок для ПЗ i -го серверу на t -му етапі випробувань ($i = 1, 2, 3$), де $N_{i_{заг\ ном}}(t) > 0$;

$K_{i_{заг}}$ – загальний коефіцієнт ефективності ПЗ для i -го каналу;

$\lambda_{i_{заг}}$ – загальна інтенсивність виправлень помилок для i -го каналу, $0 < \lambda_{i_{заг}} < 1$;

t – дискретний час (етап випробувань), $t = 1, 2, \dots, 10$).

Коефіцієнт $K_{i_{заг}}$ характеризує висоту графіків розподілу помилок, тобто визначає ефективність впливу результатів випробувань на черговий (проміжний або кінцевий) варіант ПЗ.

Параметр $\lambda_{i_{заг}}$ характеризує нахил графіків у бік «позитивних змін» в роботі ПЗ і визначає динамічність роботи розробників над помилками.

В сукупності параметри $K_{i_{заг}}$ та $\lambda_{i_{заг}}$ визначають загальну ефективність програмного забезпечення відповідного каналу резервування системи МПЦ.

Для знаходження параметрів Ki_{zag} і λi_{zag} складається система рівнянь на базі виразу (4.10) для третього і восьмого етапів випробувань (етапи вибрані таким чином, щоб врахувати приблизний характер кривих для початку, середини і кінця ланцюга випробувань) для кожного каналу резервування

$$\begin{cases} N_{zag\text{ном}}(t) = \frac{1}{Ki_{zag}} \cdot e^{-\lambda i_{zag} \times 3} \\ N_{zag\text{ном}}(t) = \frac{1}{Ki_{zag}} \cdot e^{-\lambda i_{zag} \times 8} \end{cases} \quad (4.10)$$

Система (4.10) розв'язується окремо для кожного каналу резервування шляхом підстановки даних з рисунків 4.8 – 4.10

$$\begin{aligned} \text{Канал 1: } \begin{cases} N_{zag\text{ном}}(t) = \frac{1}{Ki_{zag}} \cdot e^{-\lambda i_{zag} \times 3} \\ N_{zag\text{ном}}(t) = \frac{1}{Ki_{zag}} \cdot e^{-\lambda i_{zag} \times 8} \end{cases} &\Rightarrow \begin{cases} \ln(51) - \ln\left(\frac{1}{K1_{zag}}\right) = -\lambda 1_{zag} \times 3; \\ \ln(8) - \ln\left(\frac{1}{K1_{zag}}\right) = -\lambda 1_{zag} \times 8; \end{cases} \Rightarrow \\ \Rightarrow \begin{cases} 3,93 - \ln\left(\frac{1}{K1_{zag}}\right) = -\lambda 1_{zag} \times 3; \\ 2,08 - \ln\left(\frac{1}{K1_{zag}}\right) = -\lambda 1_{zag} \times 8; \end{cases} &\Rightarrow \ln\left(\frac{1}{K1_{zag}}\right) = 3,93 + 3\lambda 1_{zag} \Rightarrow \\ \Rightarrow -3\lambda 1_{zag} - 1,85 = -8\lambda 1_{zag} \Rightarrow -5\lambda 1_{zag} = -1,85 \Rightarrow \lambda 1_{zag} = 0,37 \Rightarrow \\ \Rightarrow \ln\left(\frac{1}{K1_{zag}}\right) = 3,93 + 1,11 \Rightarrow \ln\left(\frac{1}{K1_{zag}}\right) = 5,04 \Rightarrow \frac{1}{K1_{zag}} = 154,39 \Rightarrow K1_{zag} = 6,48 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Приймається:

– загальна інтенсивність виправлень помилок ПЗ першого каналу

$$\lambda I_{zag} = 0,37 \text{ етап}^{-1};$$

– загальний коефіцієнт ефективності ПЗ першого каналу

$$K1_{zag} = 6,48 \times 10^{-3}.$$

Аналогічно, вирішуючи систему (4.10) для 3-го і 8-го етапів випробувань для інших серверів, знаходяться для них інтенсивності виправлень помилок та коефіцієнти ефективності.

Канал 2

$$\lambda_{2_{заг}} = 0,43 \text{ етап}^{-1};$$

$$K_{2_{заг}} = 4,63 \times 10^{-3}.$$

Канал 3

$$\lambda_{3_{заг}} = 0,61 \text{ етап}^{-1};$$

$$K_{3_{заг}} = 7,69 \times 10^{-3}.$$

На основі розрахованих інтенсивності виправлення помилок і коефіцієнта ефективності ПЗ можна оцінювати ефективність як процесу випробувань, так і ефективності роботи відповідного розробника (групи розробників) програмного забезпечення. Слід зазначити, що підстановка в систему (4.10) значень саме третього і восьмого етапів випробувань є умовною, але вибір опорних точок хоч і не є принциповим, проте для визначеності подальших оцінок потребує чіткого призначення напередодні випробувань. Подальший розрахунок значень кількості помилок за формулою (4.9) і їх зіставлення з реальною кількістю помилок, виявлених під час випробувань, показує, що максимальна відносна похибка розрахунку за формулою (4.9) для трьох каналів резервування не перевищує 20%.

Для інтегрованої оцінки ефективності впливу зворотного зв'язку між випробувальником і розробником ПЗ вводиться поняття комплексного коефіцієнту виправлень загальних помилок для кожного i -го каналу резервування МПЦ, який позначається через $ni_{заг}$

$$ni_{заг} = Ki_{заг} \times \lambda_{i_{заг}}. \quad (4.11)$$

За величиною коефіцієнту $ni_{заг}$ можна робити інтегровані висновки про ефективність випробувань та здатність розробників виправляти припущені помилки технологічних алгоритмів і програм роботи МПЦ.

За формулою (4.11) розраховується значення комплексного коефіцієнту виправлень помилок для кожного з трьох каналів резервування серверу МПЦ

$$n1_{заг} = K1_{заг} \times \lambda1_{заг} = 6,48 \times 10^{-3} \times 0,37 = 2,40 \times 10^{-3} \text{ етап}^{-1};$$

$$n2_{заг} = K2_{заг} \times \lambda2_{заг} = 4,63 \times 10^{-3} \times 0,43 = 1,99 \times 10^{-3} \text{ етап}^{-1};$$

$$n3_{заг} = K3_{заг} \times \lambda3_{заг} = 7,69 \times 10^{-3} \times 0,61 = 4,69 \times 10^{-3} \text{ етап}^{-1}.$$

Встановлені та обраховані комплексні коефіцієнти виправлення помилок ПЗ можуть слугувати первинними показниками якості його розроблення для системи МПЦ та інших цифрових засобів СКРП.

На підставі прикладного використання розробок дисертації розраховано річний економічний ефект від їх впровадження в експлуатацію, що становить 330,75 тис. грн. при запланованих обсягах модернізації СКРП на АТ «Укрзалізниця» (додаток Е). Очікуваний річний економічний ефект від впровадження результатів дисертації на об'єктах промислового залізничного транспорту складає орієнтовно 350 тис. грн., що підтверджується актом впровадження на ПАТ «МК «Запоріжсталь» (додаток І). Крім того, підприємством, яке спеціалізується на виробництві мікропроцесорних СКРП, додатково заявлено очікуваний економічний ефект на етапі їх підготовки до експлуатації в розмірі 200 тис. грн. у розрахунку на середню залізничну станцію, що підтверджується актом впровадження на ТОВ «Хартрон-Енерго» (додаток І).

Отримані та заявлені результати дозволяють стверджувати про доцільність запровадження відповідних науково-прикладних результатів у виробництво та експлуатацію СКРП на магістральному і промислового залізничному транспорті. При певному доопрацюванні вони можуть бути застосовані при вдосконаленні систем керування технологічними процесами на інших видах транспорту.

4.4 Висновки за розділом

У процесі практичної апробації та верифікації результатів дисертаційного дослідження досягнуті такі результати:

1. Встановлені закономірності, які визначають залежності між глибиною контролю (тестовим покриттям), складністю та масштабністю СКРП і їх показниками експлуатаційної готовності. Визначено, що використання розробленого методу випробувань дозволяє збільшити коефіцієнт готовності СКРП до 18%, інтенсивність відновлення систем до 6-ти разів.

2. Визначено, що переваги розробленого методу випробувань СКРП порівняно з найближчим аналогом, які полягають у покращенні показників готовності та відновлення, дозволяють скоротити прогнозований непродуктивний простій у русі поїздів до 16%.

3. Сформовані основні принципи зважування функціональних вершин графо-функціональних моделей СКРП, що використовуються при синтезі їх моделей для випробувань. Визначено багатоваріантність такого зважування, яке може здійснюватися аналітичним, графічними та комбінованими шляхами.

4. Розроблено вкладену графо-функціональну модель для функціональної вершини об'єкту керування та контролю СКРП на прикладі стрілки ЕЦ. Опрацьована можливість використання методу модифікованих прямих сум для її суперпозиції з функціональним графом залізничної станції.

5. Апробовано використання методу модифікованих прямих сум на прикладі системи МПЦ залізничної станції «Карапиші». Для цього розроблено САПР синтезу моделі для випробувань СКРП, який використано для станції «Карапиші» та перевірена коректність його роботи за допомогою атестованих засобів діагностики системи МПЦ.

6. Проведені випробування системи МПЦ станції «Карапиші» із використанням науково-прикладних результатів дисертації. Встановлено, що виявленні помилки програмного забезпечення при їх поступовому виправленні підлягають експоненціальному закону розподілу.

7. Запропоновано критерії оцінки ефективності роботи над помилками розробників програмного забезпечення на підставі аналізу результатів функціональних випробувань системи МПЦ, що враховують швидкість зміни відповідних функцій при від'ємній монотонності.

8. На підставі розрахованого економічного ефекту від впровадження результатів дисертації зроблено висновок про їх ефективність та доцільність.

ВИСНОВКИ

Відповідно до поставлених цілі та завдань дисертаційного дослідження було вирішено актуальне науково-прикладне завдання з підвищення експлуатаційної готовності СКРП на основі контролю їх функціональних параметрів, що здійснюється шляхом вдосконалення методів і моделей функціональних випробувань у процесі виробництва, експлуатації, технічного обслуговування та ремонту, зокрема:

1. За результатами опрацювання статистичних даних щодо експлуатаційної надійності функціонування СКРП на залізничному транспорті України, аналізу її впливу на безперебійність руху поїздів встановлено, що фізичний знос технічних засобів СКРП станом на 2020 рік складає 65%. У таких умовах спостерігається тенденція до зменшення рівня експлуатаційної готовності СКРП, яка виявляється у збільшенні сумарного вимушеного простою в русі поїздів через відмови пристроїв СКРП.

2. За результатами прогнозування впливу основних чинників на експлуатаційну надійність діючих пристроїв СКРП до 2030 року визначено тренд, відповідно до якого вплив людського й технічного чинників на експлуатаційну готовність СКРП зрівняються до 2024 року, а до 2030 року технічний чинник переважатиме людський майже в 2 рази. В таких умовах загострюється актуальність задачі модернізації пристроїв СКРП на залізницях України, в протилежному випадку спостерігатиметься критичний рівень експлуатаційної готовності СКРП з середини 20-х років.

3. В результаті аналізу відомих методів, моделей та засобів контролю функціональних параметрів СКРП, спрямованих на підвищення їх експлуатаційної готовності, для подальшого вдосконалення взяті результати відповідних наукових досліджень вітчизняних та закордонних вчених, які базуються на графоаналітичному моделюванні технологічних об'єктів систем керування в процесі здійснення технічного контролю. При цьому визначена доцільність здійснення контролю функціональних параметрів з метою підвищення експлуатаційної

готовності СКРП, який виконується шляхом функціональних випробувань систем у процесі виробництва, експлуатації та ремонту.

4. За результатами опрацювання відомих графоаналітичних методів моделювання технологічних об'єктів СКРП, що можуть використовуватися при контролі їх функціональних параметрів, визначені базові графоаналітичні моделі та методи їх синтезу, що взяті за основу формування моделей для випробувань СКРП, призначених для забезпечення їх експлуатаційної готовності.

5. Для подальшої оцінки показників експлуатаційної готовності та ефективності контролю функціональних параметрів СКРП розроблено модель оцінки тестового покриття функціональних випробувань СКРП на розподілених технологічних об'єктах. На підставі розрахунку обмежень, похибок та адекватності моделі визначені умови припустимості її використання.

6. У результаті підходів до побудови графо-функціональної моделі технологічних об'єктів СКРП довільного призначення забезпечено можливість верифікації їх статичних і динамічних параметрів під час функціональних випробувань, що формує передумови для підвищення експлуатаційної готовності СКРП на різних об'єктах транспортної інфраструктури.

7. У результаті розроблення методу аналітичної інтерпретації графо-функціональних моделей технологічних об'єктів СКРП забезпечено можливість їх оброблення засобами комп'ютерної техніки при формуванні засобів контролю функціональних параметрів СКРП, призначених для забезпечення їх експлуатаційної готовності.

8. У результаті вдосконалення методу синтезу моделей для функціональних випробувань СКРП на базі вихідного блочно-діагонального розділення функціонально-топологічних матриць отримано новий метод формування відповідних моделей, який спрощує процедуру та підвищує ефективність контролю функціональних параметрів СКРП.

9. У результаті оцінки ефективності використання розробленого методу синтезу моделей для випробувань СКРП за ресурсними критеріями та критерієм збільшення глибини контролю встановлено, що даний метод дозволяє збільшити безпомилковість, зменшити кваліфікаційні та часові ресурси на забезпечення

експлуатаційної готовності СКРП до 3-х разів, а також збільшити глибину контролю до 2-х разів порівняно з найближчими аналогами.

10. У ході дослідження впливу результатів вдосконалення методів та моделей контролю функціональних параметрів на експлуатаційну готовність СКРП та безперервність дотримання графіку руху поїздів встановлені відповідні закономірності між масштабністю і складністю технологічних об'єктів, глибиною контролю СКРП та показниками експлуатаційної готовності. Відповідно до них розроблені в дисертаційній роботі методи, моделі та підходи до контролю функціональних параметрів СКРП дозволяють збільшити їх коефіцієнт готовності до 18% та інтенсивність відновлення до 6-ти разів. З урахуванням кореляційного зв'язку між показниками експлуатаційної готовності та безперервністю процесів перевезень відповідні результати дозволяють скоротити непродуктивні простої поїздів до 16%.

11. У процесі дослідження результатів практичного використання методів та моделей контролю функціональних параметрів СКРП на етапах виробництва та експлуатації визначено ефективність їх застосування для підвищення експлуатаційної готовності систем електричної централізації, диспетчерської централізації, автоматичної локомотивної сигналізації та ряду інтелектуально-аналітичних систем підтримки прийняття рішень. Зокрема, встановлено показники ефективності, які визначають забезпечення готовності програмних засобів СКРП у процесі їх виробництва та технічного обслуговування.

12. Прикладні результати дисертації мають універсальний характер щодо застосування в системах керування будь-якими транспортними процесами, а також в АСК ТП у інших сферах виробничо-технологічної діяльності. Вони мають також перспективи подальшого розвитку в напрямку застосування в технологіях експлуатації інших видів транспорту, зокрема – при забезпеченні належної експлуатаційної готовності технічних засобів керування польотами авіації, регулювання дорожнього руху, навігації морських та річкових суден тощо. Таким чином, результати роботи можуть бути взяті за основу для подальших досліджень у сфері технологій використання різних видів транспорту.

Економічний ефект від впровадження результатів дисертації складає приблизно 330,75 тис. грн. на рік при запланованих обсягах модернізації СКРП.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Каменєв О.Ю., Сіроклин І. М., Змій С. О., Щєбликіна О. В. Технологічна проблема регулювання пристроїв автоматичної локомотивної сигналізації моторвагонного рухомого складу. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. Вип. 168. С. 19 – 30.
2. Бойнік А.Б., Каменєв О.Ю., Змій С.О., Щєбликіна О.В., Гаєвський В.В. Дефектування технічного, технологічного та організаційного забезпечення контрольного пункту АЛСН моторвагонного депо. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті: науково-технічний журнал*. 2017. Вип. №13. С. 66 – 80.
3. Бойнік А.Б., Прилипко О.Ю., Каменєв О.Ю., Лазарєв О.В., Щєбликіна О.В. Вибір типу чутливого елемента для точкового колійного датчика. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. Вип. № 2. С. 31 – 39.
4. Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Щєбликіна О. В., Лазарєв О.В., Ушаков М.В. Модель диспетчерського керування взаємозалежними транспортними потоками на промисловому залізничному транспорті. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 182. С. 63 – 79.
5. Voinik, A., Prohunnyi, O., Kameniev, O. Lapko, A., Kuzmenko, D., Shcheblykina O. Development and investigation of methods of graphic-functional modeling of distributed systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 94. № 4 /4. 2018. P. 59-69. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.140636 (видання індексується у базі Scopus).
6. Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Щєбликіна О.В. Прогнозна динаміка впливу людського та технічного чинників на експлуатаційну надійність пристроїв залізничної автоматики. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2020. Вип. 40. С. 168 – 178.
7. Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Щєбликіна О.В. Математичні моделі верифікації ергатичних систем засобів залізничної автоматики. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. Вип. 4 (151). С. 7 – 14.
8. Щєбликіна О.В., Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Сагайдачний В.Г. Підвищення показників готовності та відновлення систем керування рухом

поїздів на основі збільшення глибини контролю. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. Вип. № 2. С. 32 – 42.

9. Kameniev O., Lapko A., Shcheblykina E. Improvement of technologies for the development of modern rail automation systems. *International journal for science, technics and innovations for the industry*. «MACHINES. TECHNOLOGIES. MATERIALS». Sofia, Bulgaria. 2017. Issue 11. P. 533 – 536.

10. Бойнік А.Б., Змій С.О., Каменєв О.Ю., Щєбликіна О.В. Метод та результати моделювання операцій чергового по станції: тези X Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті», м. Дніпро (14 – 15 грудня 2016 р.). – Дніпро: ДНУЗТ ім. академіка В. Лазаряна. 2016. С. 26.

11. Каменєв О.Ю., Щєбликіна О.В. Удосконалення та формалізація процедур складання технічних завдань розробникам програмного забезпечення систем керування та регулювання руху поїздів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: матеріали доповідей 29-ї міжнародної науково-практичної конференції, м. Чорноморськ (27 – 29 вересня 2016 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. №4 (Додаток). С. 27 – 28.

12. Щєбликіна О.В., Анічін В.В. Використання мобільного додатку автоматизованого робочого місця електромеханіка. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: матеріали доповідей 29-ї міжнародної науково-практичної конференції, м. Чорноморськ (27 – 29 вересня 2016 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. №4 (Додаток). С. 51.

13. Бойнік А.Б., Кустов В.Ф., Щєбликіна О.В., Каменєв О.Ю. Развитие научных основ и практических подходов к обеспечению и доказательству безопасности систем железнодорожной автоматики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: матеріали доповідей 30-ї міжнародної науково-практичної конференції, м. Одеса (20 – 23 вересня 2017 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2017. Вип. №4 (Додаток). С. 71 – 73.

14. Бойник А.Б., Щєблыкина Е.В. Проведение испытаний автоматизированной системы микропроцессорной централизации стрелок и сигналов на функциональную безопасность и безотказность на имитационных

моделях. *Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті*: тези VIII міжнародної науково-практичної конференції, м. Чернівці (01 – 03 лютого 2017 р.). – Дніпро: ДНУЗТ ім. академіка В. Лазаряна, 2017. С. 17 – 18.

15. Бойнік А.Б., Кустов В.Ф., Каменєв О.Ю., Змій С.О., Щєбликіна О.В. Особливості мікропроцесорного керування переїзною сигналізацією. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*: тези доповідей 79-ї міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті», м. Харків (25 – 27 квітня 2017 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2017. Вип. 169 (Додаток). С. 4 – 6.

16. Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Щєбликіна О.В. Верифікація програмних засобів, реалізованих мовою релейно-контактної логіки. *Free and open source software*: матеріали X ювілейної міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків (20 – 22 листопада 2018 р.). – Харків: ХНУБА, 2018. С. 68.

17. Мойсеєнко В.І., Каменєв О.Ю., Гаєвський В.В., Щєбликіна О.В. Розвиток засобів технічної діагностики інформаційно-керуючих систем на залізничному транспорті. *Прикладні науково-технічні дослідження*: матеріали II міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ (3 – 5 квітня 2018 р.). – Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2018. С. 168.

18. Каменєв О.Ю., Щєбликіна О.В. Вдосконалення процедур синтезу випробувальних моделей залізничної автоматики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: тези стендових доповідей та виступів 31-ї міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків (24 – 26 жовтня 2018 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. №4 (Додаток). С. 64 – 65.

19. Щєбликіна О.В., Кузьменко Д. М. Доказ безпечності мікропроцесорної системи напівавтоматичного блокування з радіоканалом. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: тези стендових доповідей та виступів 31-ї міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків (24 – 26 жовтня 2018 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. №4 (Додаток). С. 66.

20. Лапко А.О., Каменєв О.Ю., Щєбликіна О.В., Сагайдачний В.Г., Панасенко М.О., Кладко А.С. Аналіз способів моделювання розподілених систем. «ТАК» *Телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології*: збірка доповідей

всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, м. Покровськ (30 листопада 2018 р.). – Покровськ: ДВНЗ «ДонНТУ», 2018. С. 151 – 153.

21. Щебликіна О.В., Каменєв О.Ю., Лапко А.О. Автоматизація проектування об'єктів специфічного призначення. *Прикладні науково-технічні дослідження*: матеріали III міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ (3 – 5 квітня 2019 р). – Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2019. С. 45.

22. Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Щебликіна О.В. Система тунельної ідентифікації небезпечних об'єктів. *Прикладні науково-технічні дослідження*: матеріали III міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ (3 – 5 квітня 2019 р). – Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2019. С. 209.

23. Щеблыкина Е.В., Ушаков М.В. Повышение надежности эксплуатации эргатических систем управления путем применения технологии терминального доступа. Проблемы безопасности на транспорте: материалы IX международной научно-практической конференции, г. Гомель, Республика Беларусь (28 – 29 ноября 2019 г.). Часть 1. – Гомель: БелГУТ, 2019. С. 257 – 259.

24. Kameniev O., Lapko A., Shcheblykina E. Improvement of technologies for the development of modern rail automation systems. *Industry 4.0: Proceedings II International Scientific Conference, Borovets, Bulgaria (13–16 december 2017)*. – Sofia, Bulgaria: Scientific technical union of mechanical engineering “Industry-4.0”, 2017, Vol. 1/1. P. 107 – 110.

25. Пат. на корисну модель 122882, Україна, МПК G01S 17/42 (2006.01) Канал вимірювання радіальної швидкості літальних апаратів з можливістю розпізнавання літальних апаратів для мобільної однопунктної системи зовнішньо-траєкторних вимірювань. О.В.Коломійцев, І.І. Сачук, О.О. Зверєв, О.П. Нарезній, В.О. Павлій, І.В.Помогаєв, А.А. Прилипко, Ю.П. Рондін, М.Л.Троцько, О.В. Щебликіна. Заявка u201709114 від 14.09.2017; опубл. 25.01.2018, бюл. № 2.

26. Пат. на корисну модель 122883, Україна, МПК G01S 17/42 (2006.01) Канал вимірювання кутових швидкостей літальних апаратів з можливістю розпізнавання літальних апаратів для мобільної однопунктної системи зовнішньотраєкторних вимірювань. О.В. Коломійцев, І.І. Сачук, О.О. Зверєв,

Д.В. Молчанов, О. П. Нарезній, В.О. Павлій, А. А. Прилипко, Ю. П. Рондін, М.Л.Троцько, О.В. Щебликіна. Заявка u201709115 від 14.09.2017; опубл. 25.01.2018, бюл. № 2.

27. Пат. на корисну модель 123393, Україна, МПК G01S 17/42 (2006.01) Канал автоматичного супроводження літальних апаратів за напрямком з можливістю розпізнавання літальних апаратів для мобільної однопунктної системи зовнішньо-траєкторних вимірювань. О.В. Коломійцев, І.І. Сачук, С.В. Герасимов, О.О. Зверєв, Д.В. Молчанов, О.П. Нарезній, В.О. Павлій, Ю.П. Рондін, М.Л.Троцько, О.В. Щебликіна. Заявка u201709107 від 14.09.2017; опубл. 26.02.2018, бюл. № 4.

28. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року: Розпорядження Кабінету міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р / Кабінет міністрів України. Офіційний вісник України. 2018. № 52. С. 533. Ст. 1848. Код акта 90720/2018.

29. Залізничний транспорт України. URL: <https://mtu.gov.ua/timeline/Zaliznichniy-transport.html> (дата звернення 23.01.2019).

30. Про залізничний транспорт: Закон України. Вводиться в дію Постановою ВР № 274/96-ВР від 04.07.96, ВВР, 1996, N 40, ст. 184 / Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/273/96-%D0%B2%D1%80>.

31. Лапко А.О. Підхід до оцінювання ефективності систем технічного обслуговування пристроїв залізничної автоматики. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2015. Вип. 157. С. 194 – 200.

32. Leena G., Chetan Singh Vidawat, Nitesh Jha. Automatic Railway System. *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)*. 2017. Vol. 159(8). P. 30 – 33. DOI: 10.5120/ijca2017913018.

33. Aripov N., Aliyev R., Baratov D., Ametova E. Features of Construction of Systems of Railway Automatics and Telemechanics at the Organization of High-Speed Traffic in the Republic of Uzbekistan. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 134 P. 175 – 180.

34. Likhota R., Lontsikh P., Drolova E., Karaseva V., Livshitz I. Providing a synergetic effect in the quality improvement of the railway automatics system, MPC

Ebilock 950, maintenance. *Proceedings of the 2017 international conference quality management, transport and information security, information technologies*. 2017. P. 75 – 78. DOI: 10.1109/ITMQIS.2017.8085765.

35. Гаєвський В.В., Каменєв О.Ю. Інтеграція і уніфікація пристроїв та систем залізничної автоматики різного призначення. *Міжнародний техніко-економічний журнал “Українська Залізниця”*. 2019. Вип. №1 (67). С.29 – 31.

36. Про схвалення Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року: Розпорядження Кабінету міністрів України від 16 грудня 2009 р. № 1555-р / Урядовий портал: єдиний веб-портал органів виконавчої влади України. URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npras/243219821>. (дата звернення 04.12.2016).

37. Про затвердження Стратегічного плану розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року: Наказ Міністерства інфраструктури України від 21.12.2015 р. № 547 / Міністерство інфраструктури України. URL: <https://mtu.gov.ua/documents/443.html>.

38. Про схвалення концепції Державної програми реформування залізничного транспорту: Розпорядження Кабінету міністрів України від 27 грудня 2006 р. № 651-р / Урядовий портал: єдиний веб-портал органів виконавчої влади України. URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npras/60705298> (дата звернення 04.02.2017).

39. Чепурна-Кос І. В. Проблеми та напрями реформування залізничного транспорту України. *Економіка та держава*. 2011. Вип. 7. С.98 – 100.

40. Гриценко Н.В. Комплексний огляд реформування залізничного транспорту України. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2012. Вип. № 40. С.89 – 92.

41. Любохинець Л. М. Реформування залізничного транспорту: досвід країн ЄС. *Проблеми економіки транспорту*. 2016. Вип. № 12. С. 77 – 83.

42. Олег Суханик: «Головне завдання господарства – оновлення та розвиток засобів залізничної автоматики та телемеханіки, а провідне призначення – технічне обслуговування та ремонт пристроїв СЦБ та зв’язку» // Центр інформації транспорту України. URL: <https://railway-publish.com/interview/oleg-suhanik-golovne-zavdannya-gospodarstva-onovlennya-ta-rozvitok-zasobiv-zaliznichnoyi->

avtomatiki-ta-telemehaniki-a-providne-priznachennya-tehniche-obslugovuvannya-ta-remont-pristroyiv. (дата звернення 08.12.2017).

43. Про затвердження Правил технічної експлуатації залізниць України: Наказ Міністерства транспорту України від 20 грудня 1996 р. №411 (Про внесення зміни до Правил технічної експлуатації залізниць України: Наказ Міністерства транспорту України від 10 грудня 2003 р. №962) / Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0050-97>.

44. Про затвердження Інструкції з сигналізації на залізницях України: Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України від 23 червня 2008 р. № 747/ Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0747650-08>.

45. Про затвердження Інструкції з руху поїздів і маневрової роботи на залізницях України: Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України від 31 серпня 2005 р. №507 / Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0507650-05>.

46. Про затвердження Правил технічної експлуатації залізничного транспорту промислових підприємств: Наказ Промислової політики України від 12 лютого 2010 р. 70 / Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0237-10>.

47. Про затвердження та введення в дію Інструкції з сигналізації на залізничному транспорті промислових підприємств: Наказ Промислової політики України від 13 серпня 2010 р. № 407 / Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0407581-10>.

48. Про затвердження та введення в дію Інструкції з руху поїздів і маневрової роботи на залізничному транспорті промислових підприємств: Наказ Промислової політики України від 13 серпня 2010 р. № 407/Законодавство України. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0407581-10>.

49. Про внесення змін до наказу Міністерства транспорту України від 04 листопада 2003 року № 854 /Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1540-14>.

50. Правила технічної експлуатації метрополітенів України: Наказ Міністерства транспорту України від 4 листопада 2003 р. №854 (у редакції наказу

Міністерства інфраструктури України від 12 листопада 2014 р. № 578. / Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0590-04#n1543>.

51. Інструкція із сигналізації на метрополітенах України : Наказ Міністерства інфраструктури України від 7 листопада 2017 р. № 373 / Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0590-04#n1543>.

52. Басов В.І., Єлисеєв В.В., Петренко О.В., та ін. Мікропроцесорна система централізації МПЦ-У: навчальний посібник для студентів вузів залізничного транспорту. Київ. 2014. 430 с.

53. Мойсеєнко В. І., ред.: Загарія. Г. І. Мікропроцесорні системи залізничної автоматики. Ч. 1. Централізація стрілок та сигналів. Харків. 1999. 147 с.

54. Данько М. І., Мойсеєнко В. І., Рахматов В. З., Троценко В. І., Чепцов М. М. Мікропроцесорна диспетчерська централізація "Каскад" : Навч. посіб – Харків. 2005. 174 с.

55. Разгонов А. П. Модернізовані системи електричної централізації : Навч. посіб. / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. В.Лазаряна. Дніпропетровськ. 2003. 80 с.

56. Каменєв О.Ю. Удосконалення методів та засобів технічного контролю системи мікропроцесорної централізації: дис ... канд. техн. наук: 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту / Укр. держ. акад. залізн. трансп. Харків, 2014. 258 с.

57. Лапко А.О., Каменєв О.Ю., Сагайдачний В.Г., Коцюб Т.А. Експлуатаційні показники роботи пристроїв залізничної автоматики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. Вип. № 3. С. 37 – 44.

58. Олег Бунчуков: «Значна частина пристроїв залізничної автоматики та зв'язку підлягає повній заміні на сучасні пристрої та системи» // Центр інформації транспорту України. URL: <https://railway-publish.com/interview/oleg-bunchukov-znachna-chastina-pristroyiv-zaliznichnoyi-avtomatiki-ta-zv-yazku-pidlyagaye-povniy-zamini-na-suchasni-pristroyi-ta-sistemi>(датазвернення25.12.2018).

59. Олег Бунчуков: «Сучасні пристрої та технології – запорука підвищення ефективної діяльності господарства» // Центр інформації транспорту України. URL:

<https://railway-publish.com/interview/oleg-bunchukov-suchasni-pristroyi-ta-tehnologiyi-zaporuka-pidvishhennya-efektivnoyi-diyalnosti-gospodarstva> (дата звернення 25.12.2018).

60. Лапко А.О. Удосконалення технічного обслуговування пристроїв електричної сигналізації та централізації шляхом комплексного контролю технічного стану: дис ... канд. техн. наук: 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту / Укр. держ. акад. залізн. трансп. Харків, 2010. 249 с.

61. Залуцький І. Р., Цимбалюк В. М., Шевченко С. Г. Планування і діагностика діяльності підприємств: навч. посібник .Львів : «Новий Світ – 2000», 2009. – 319 с.

62. Аналіз експлуатаційної роботи галузі автоматики, телемеханіки та зв'язку Укрзалізниці за 2010-2019 рр. Київ: Департамент автоматики та телекомунікацій АТ «Укрзаліниця».

63. Кустов В.Ф. Основи теорії надійності та функційної безпечності систем залізничної автоматики: навч. посібник для вузів / Харків: УкрДАЗТ, 2008. 218 с.

64. Сапожников Вл.В., Сапожников В.В., Шаманов В.И. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учебное пособие для вузов ж.д. трансп. / Москва. 2003. 263 с.

65. Статистичні дані про Українські залізниці / Міністерство інфраструктури України. URL: <https://mtu.gov.ua/content/statistichni-dani-pro-ukrainski-zaliznici.html> (дата звернення: 19.03.2018).

66. Либерман А.Н. Техногенная безопасность: человеческий фактор. Санкт-Петербург : Изд-во "ВИС". 2006. 104 с.

67. Мойсеєнко В.І. Методи та моделі підвищення безпеки використання систем керування залізничної автоматики шляхом оперативного виявлення порушень: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту / Харків. Українська державна академія залізничного транспорту: УкрДАЗТ. 2011. 356 с.

68. Каменєв О.Ю. Проблематика підходів до дослідження безпеки використання ергатичних систем керування на залізничному транспорті. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. 2013. Вип. 44. С. 7 – 16.

69. Дослідження функційної безпечності та електромагнітної сумісності мікропроцесорної системи електричної централізації станції «Вугільна» на етапі імітаційних та стендових випробувань: звіт з НДР (проміж.) /Харків. УкрДАЗТ; керівник А.Б. Бойнік, 2012. Номер держ. реєстр. 0112U006925; інв. номер 0713U007283.

70. Мармоза А.Т. Теорія статистики: підручник для студентів вищих навчальних закладів // «Центр учбової літератури». Київ. 2013.592 с.

71. Світлична Т.І., Дріль Н.В. Прогнозування: Навчальне видання: Консп. лекції / Харківська національна академія міського господарства. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2010. 112 с.

72. Камінський Р.М., Дмитрів Г.Р. Порівняння методів згладжування часових рядів за критерієм відношення медіан. *Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка"*. Чернівці. 2009. Вип. 653. С. 111 – 116.

73. Ryland H. A Second Generation Electronic Interlocking : International Conference on Advanced Railway Control “Aspect 95”, IRSE. (London, 25-27 September, 1995). London. Sec. 10. P. 35 – 40.

74. Strelow H., Scharfenberg G. Das Mikrocomputersystem SIMIS/MES-80. *Signal+ Draht* 75.1983. Vol. 12. P. 229 – 234.

75. Saykowski R., Schultz E., Blei-diessel J. Programmable Logic Controllers in Railway Interlocking Sys-tems for Regional Lines of the DB Netze AG : Kommunikation in Verteilten Systemen, Kiel, Christian-Albrechts-Univer-sität (8-11 März, Germany). Germany. 2011. P. 205 – 207.

76. Arlat J. Composants COTS et sûreté de fonctionnement: Atelier thématique n°5. Toulouse. 2003. 12 ñ.

77. Böhm P. Das Elektronische Stellwerk ESTW L90 5 Einsatz auf der Strecke Kouvola – Pieksmki in Finnland. *Signal und Draht*. 2000. № 6. S. 26 – 29.

78. Cribbens A., Newing Dh., Ryland Ha. The microprocessor as a railway control system component. *Microprocessors*. 1976. Vol. 1, P. 41 – 47. DOI:10.1016/0308-5953(76)90107-0.

79. Kornaszewski M., Łukasik Z. Analysis of setups of the control of rail microprocessor systems. *Journal of Advances in Electrical and Electronic Engineering*. No. 1-2. Vol. 7/2008. Zilina – Slovak Republic. 2008. pp. 223 – 226.

80. CribbensAH. Microprocessors in railway signalling: the Solid-State Interlocking. *Microprocessors and Microsystems*. 1987. Vol. 11. P. 264 – 272. DOI: 10.1016/0141-9331(87)90269-9.

81. Pricevicius G., Dainys L., Adomaitis D., Šajev I. Railway segment management information system. *Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*. Vilnius. 2016. pp. 1 – 5.

82. Mansour B. Towards Digital Railways – Signalling and Train Control System: The contents of this paper was presented at Rail Solutions Asia conference (in Kuala Lumpur in May 2017). Kuala Lumpur.2017. URL: <http://www.hssgroup.com.my/2017/12/towards-digital-railways-signalling-and-train-control-system/> (дата звернення: 05.08.2018).

83. Krmac E., Djordjević B. An evaluation of train control information systems for sustainable railway using the analytic hierarchy process (AHP) model. *European Transport Research Review*. 2017. P. 9 – 35. DOI 10.1007/s12544-017-0253-9.

84. Lagerlöf P., Olofsson P., Swedish railway industry and global evolution of digital signalling systems // *Article from Global Review: 190610*. URL: <https://www.swedtrain.org/2019/06/14/swedish-railway-industry-and-global-evolution-of-digital-signalling-systems/> (дата звернення: 05.08.2018).

85. Patalay S. Analysis of Railway Interlocking Systems. *CMC Ltd*. P.1 – 23.

86. Markevicius V., Navikas D., Idzkowski A., Andriukaitis D., Valinevicius A., Zilys M. Practical Methods for Vehicle Speed Estimation Using a Microprocessor-Embedded System with AMR Sensors. *Sensors (Basel)*. 2018. Vol. 18(7): 2225. P. 1 – 12. DOI: 10.3390/s18072225.

87. The digital age of railway signaling // *Railway technology*. 2016. URL: <https://www.railway-technology.com/features/featurethe-digital-age-of-signalling-4699786/> (дата звернення: 04.06. 2019).

88. Tracks into the Future: Digital Signalling and Train Control // Publication Date: Week Commencing the 6th of November 2017. URL: https://www.smartrailworld.com/tracks_into_the_future_digital_signalling_and_train_control (дата звернення: 22.07.2018).

89. Digital Signalling & Train Control In-Depth Focus 2018 // Global Railway Review. 2018. URL: <https://www.globalrailwayreview.com/article/75634/digital-signalling-train-control-in-depth-focus-2018/> (дата звернення: 17.09.2019).

90. Fei Yan, Chunhai Gao, Tao Tang, Yao Zhou, A Safety Management and Signaling System Integration Method for Communication-Based Train Control System. *Urban Rail Transit*. 2017. Vol 3. Issue 2. P. 90 – 99.

91. Bickell MirseD. Improving performance and capacity on the railway. *Railengineer*. 26th march. 2018. URL: <https://www.railengineer.co.uk/2018/03/26/improving-performance-and-capacity-on-the-railway/> (дата звернення: 19.03.2014).

92. Australia's train signalling set to go digital. *ITnews*. Aug 28 2015. URL: <https://www.itnews.com.au/news/australias-train-signalling-set-to-go-digital-408467> (дата звернення: 19.10.2019).

93. Marais J., Beugin J., Berbineau M. A Survey of GNSS-Based Research and Developments for the European Railway Signaling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2017, Vol. 10 (18). P. 2602 – 2618.

94. Колесник А.И., Проектирование микропроцессорных систем железнодорожной автоматики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: матеріали доповідей 24-ї Міжнародної науково-практичної конференції*, м. Алушта. 2011. Вип. № 5. С. 141.

95. Вохминцев С.В., Семчук Р.В., Гуль А.О. Концепция информационного обеспечения железнодорожного транспорта. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2011. Вип. № 5. С. 27 – 31.

96. Кузьменко Д.М. Модернізація пристроїв залізничної автоматики. *Залізничний транспорт України*. 2009. Вип. № 4. С.51 – 53.

97. Кошевий С.В. Романчук В.Б. Сучасні інформаційні технології в системах залізничної автоматики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2011. Вип. № 4. С. 91 – 98.

98. Чалый А.А., Особенности реализации программного обеспечения микропроцессорной системы электрической централизации стрелок и сигналов поста «Южный». *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті:*

матеріали доповідей 21-ї Міжнародної науково-практичної конференції, м. Алушта. 2008. Вип. № 4 (Додаток). 34 с.

99. Нейчев О.В., Особенности построения аппаратных средств МПЦ-Д поста «Южный». *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: матеріали доповідей 21-ї Міжнародної науково-практичної конференції, м. Алушта. 2008. Вип. № 4 (Додаток). 36 с.

100. Мікропроцесорна централізація. URL: <http://rwa.ua/resheniya/promyshlenniy-zheleznodorozhnyiy-transport/mpcs.html?lang=uk> (дата звернення: 09.11.2019).

101. Автоматизована система мікропроцесорної централізації для промислового транспорту. Copyright by Ipra-Soft Designed by Ipra-Soft. 2016. URL: http://www.ipra-soft.com/mpc_tr_u.html (дата звернення: 03.12.2019).

102. Інноваційні мікропроцесорні системи управління рухом поїздів від RWA. *Журнал «Залізничне постачання»*. 2019. Вип. №1. С. 30 – 33.

103. Розроблення заходів із підвищення надійності та безпечності функціонування мікропроцесорних систем залізничної автоматики: звіт про НДР (заключний) / Харків. Український державний університет залізничного транспорту; кер. А. Бойнік; викон.: О. Каменєв [та ін.]. номер держреєстрації 0116U004891. Харків, 2018.

104. Розроблення системи підтримки прийняття рішень з організації перетинань потоків різних видів транспорту»: звіт про НДР (заключний) / Харків. Український державний університет залізничного транспорту; кер. А. Бойнік; викон.: О. Каменєв [та ін.]. номер держреєстрації 0115U000274. Харків, 2016.

105. Науково-практичний підхід підвищення безпеки дорожнього руху на залізничних переїздах: звіт про комплексну НДР (заключний) / Харків. Харківський національний автомобільно-дорожній університет; кер. І. Наглюк; викон.: О. Каменєв [та ін.]. номер держреєстрації 0115U03272, 0115U00274. Харків, 2016.

106. Kutsenko M., Ohar O., Rozsokha O., Smachilo Yu. Evaluation of the railway traffic safety level using the additive resultant indicator. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. №6/3 (90). 2017. P. 48 – 57.

107. Rojko A. Industry 4.0 Concept: Background and Overview. ECPE European Center for Power Electronics e.V.. Nuremberg. Germany. 2017. Vol. 11 № 5. P. 77 – 90.

108. Kans M., Galar D., Thaduri A. Maintenance 4.0 in Railway Transportation Industry. A data fusion approach of multiple maintenance data sources for real-world reliability modeling. 2016. P.317 – 331 DOI: 10.1007/978-3-319-27064-7_30.

109. Shukla D. Industry 4.0 Solutions For New-Age Railways And Airways. 2019. URL:<https://electronicsforu.com/technology-trends/tech-focus/industry-4-solutions-railways-airways> (дата звернення: 28.12.2019).

110. Мойсеєнко В.І., Огар О.М., Гаєвський В.В. Розвиток залізничних цифрових систем та технологій у контексті інженерії 4.0. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. Вип.№ 3. С. 11 – 20.

111. Kanso K., Moller F., Setzer A. Automated Verification of Signalling Principles in Railway Interlocking. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science Systems*. 2009. Vol. 250, Issue 2. P.19 – 31. DOI:10.1016/j.entcs.2009.08.015.

112. Sener I., Kaymak O. T. , Usto Glu I, , Cansever G. Specification and formal verification of safety properties in a point automation System. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. 2016. Vol.24 P. 1384 – 1396. DOI:10.3906/elk-1311-27.

113. M.Aanæs Hoang Phuong Thai. Modelling and Verification of Relay Interlocking Systems. Technical University of Denmark Informatics and Mathematical Modelling Denmark. Kongens Lyngby. 2012. P. 360.

114. Fantechi A., Lecomte T., Romanovsky A. Reliability, Safety, and Security of Railway Systems. Modelling, Analysis, Verification, and Certification: second International conference, RSSRail, 2017 Pistoia, Italy, November 14 – 16, 2017 Proceedings. 2017. Pistoia. Italy. P. 217. DOI: 10.1007/978-3-319-68499-4.

115. Про затвердження інструкції з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) ЦШ-0060: Наказ Державної адміністрації залізничного транспорту України 07.10.2009 № 090-ЦЗ / Головне управління автоматики, телемеханіки та зв'язку. Київ. 2009.

116. Про затвердження технологічного процесу обслуговування ЦШ/0042: Наказ від 26.04.2006 № 347-ЦЗ. / Затверджений наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України.

117. Про затвердження типового проекту організації роботи ремонтно-технологічної дільниці дистанції сигналізації та зв'язку: Наказ від 08.11.2006

№ 664-ЦЗ / Затверджений наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України.

118. Самсонкин В.Н., Бойник А.Б., Прогонный А.Н. К вопросу эффективного управления работой дистанции сигнализации и связи. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2018. Вип. № 16. С. 95 – 105.

119. Розроблення заходів із підвищення надійності та безпечності функціонування мікропроцесорних систем залізничної автоматики: звіт про НДР (остаточний) / Харків. Український державний університет залізничного транспорту; кер. А.Б. Бойнік; викон.: О.В.Щебликіна [та ін.]. № держреєстрації 0116U004891. Харків, 2018. Розділ 4.

120. Проведення експертизи технічних рішень та методики розрахунку регулювальних таблиць тональних рейкових кіл. / Харків. Український державний університет залізничного транспорту; кер. Мороз В.П.; викон.: О.В.Щебликіна [та ін.]. Додаток В ,пп.2.1, 2.2.

121. V. Samsonkin, O. Goretskyi, V. Matsiuk, V. Myronenko, A. Voinik, V. Merkulov. Development of an approach for operative control over railway transport technological safety based on the identification of risks in the indicators of its operation. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Вип. 6/3 (102) 2019. С. 6 – 14.

122. Hwang J.-G., Baek J.-H., Jo H.-J., Lee K.-M. Black-box testing tool of railway signalling system software with a focus on user convenience.. *WIT Transactions on The Built Environment*. Korea. 2014. Vol 135. P. 99-108. DOI:10.2495/CR140081

123. Short R.C. Software Validation for a Railway Signalling System. *IFAC Proceedings*. 1983. Vol.16. Issue 18., P. 183 – 193.

124. Chen X., Wang D., Huang H., Wang Z. Verification and validation in railway signalling engineering – an application of enterprise systems techniques. *Enterprise Information Systems*. 2014. Vol. 8:4 P. 490-511. DOI: 10.1080/17517575.2013.835071.

125. Testing and Commissioning of Signalling and Operational Telecommunications Systems. *Railway Group Standard*. December 2000. P. 5 – 45.

126. Каракаев А.Б., Луканин А.В. Исследование основных зависимостей между показателями надежности и показателями глубины контроля судового электрооборудования. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2016. Вып. 3 (37). С.180 – 192.

127. Takashige T. Signalling Systems for Safe Railway Transport. *Japan Railway & Transport Review* 21. September 1999. Technology. 1999.Japan. P. 44-50.

128. Busard S., Cappart Q., Limbrée C. Pecheur C., Schaus P. Verification of railway interlocking systems. 4th International Workshop on Engineering Safety and Security Systems 2015 (ESSS'15) EPTCS 184.2015. 2015. Belgium. P. 19 – 31, doi:10.4204/EPTCS.184.2.

129. Bonacchi A. Fantechi A., Bacherin S. ; Tempestini M. Validation process for railway interlocking systems. *Science of Computer Programming*. 2016. Italy. Vol. 128. P. 2 – 21 DOI:10.1016/j.scico.2016.04.004.

130. Fantechi A., Fokkink W., Morzenti A. Some Trends in Formal Methods Applications to Railway Signaling. Italy. November 2012. P.1 – 20. DOI: 10.1002/9781118459898.ch4.

131. Amparo Morant Estevan, Dependability and Safety Evaluation of Railway Signalling Systems Based on Field Data. *Doctoral thesis: Operation and Maintenance Engineering* Luleå University of Technology Luleå, Sweden. 2015. ISSN 1402-1544.

132. Иванов Д.Е., Громова Т.В., Швецова-Шиловская Т.Н. Автоматизированный анализ контролепригодности систем контроля технологического оборудования на опасных производственных объектах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение»*. Москва, 2016. № 3. С. 114 – 128. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-3-114-128.

133. Nowakowski W., Wojarczak P., Lukasik Z. Verification and Validation of Railway Control Systems Using an Expert System. *Intelligent Transport Systems – From Research and Development to the Market Uptake: First International Conference, INTSYS 2017*, Hyvinkää, Finland, November 29-30, 2017, Proceedings. P.43 – 52

134. Luteberget B., Johansen C. Efficient verification of railway infrastructure designs against standard regulations. *Formal Methods in System Design*. February 2018, Volume 52, Issue 1, pp. 1 – 32.

135. Moiseenko V., Kameniev O., Butenko V., Gaievskiy V. Determination model of the apparatus state for railway automatics with restrictive statistical data. *Procedia Computer Science*. Kharkiv. Vol.149, 2019. P. 185 – 194. DOI:10.1016/j.procs.2019.01.122.

136. Moiseenko V., Kameniev O., Gaievskiy V. Predicting a technical condition of railway automation hardware under conditions of limited statistical data. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. jun. 2017. Vol. 3. №. 9 (87). P. 26 – 35,. ISSN 1729-4061.

137. Мойсеєнко В.І., Каменєв О.Ю., Гаєвський В.В., Кравченко К. В. Моделювання логічної підсистеми маршрутизації залізничної станції на основі функціональної ознаки. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. Вип. № 6. С. 3 – 11.

138. Samsonkin V. M., Goretsky O.A. Planning Method of the Traffic Safety Activities in Transport Systems Based On Risk Management . *IOSR Journal of Business and Management (IOSR-JBM)*. Vol. 19, Issue 8. Ver. II. (August 2017). P. 53 – 58.

139. Каменєв О. Ю. Удосконалення методів контролю параметрів системи мікропроцесорної централізації. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: науково-технічний журнал. Харків: УкрДУЗТ. 2013. Вип. №3. С. 75 – 77.

140. Кусайко А. І. Дослідження показників надійності МПЦ. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2012. Вип. № 4. С. 55 – 62. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecstrt2012/50882>.

141. Samsonkin V., Petinov Ja. Development of the method of efficient monitoring of the main activity of a train driver. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2016. № 6/3(78). С.52 – 59.

142. Бочков К.А., Харлап С.Н., Сивко Б.В. Разработка отказоустойчивых систем на основе диверситетных аксиоматических базисов. *Автоматика на транспорте*. 2016. Вып. №1 (2). С.47-64.

143. Бочков К.А., Харлап С.Н., Шевченко Д.Н. Методы и средства доказательства функциональной безопасности микроэлектронных систем железнодорожной автоматики. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. Днепропетровск: ДНУЗТ. 2011. Вып. № 2. С. 73 – 81.

144. Сивко Б.В. Методика доказательства безопасности программного обеспечения микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики. *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт*. 2014. № 2 (29). С. 21 – 27.

145. РД РБ БЧ 19.055-99. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Общие положения, порядок и методы проведения испытаний на безопасность. Минск, 1999. 20 с.

146. РД РБ БЧ 19.057-99. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Общие положения, порядок и методы доказательства безопасности систем и устройств ЖАТ. Минск, 1999. 20 с.

147. Памятка ОСЖД Р-800 от 16.11.2011 г. Основные эксплуатационно-технические требования к устройствам СЦБ железных дорог членов ОСЖД. Варшава, 2001. 16 с.

148. Брабанд Й., Хирао Ю., Людеке Д.Ф.. Взаимосвязь между стандартами CENELEC в области железнодорожной сигнализации и другими стандартами по безопасности. URL:<http://www.ibtrans.ru/upload/iblock/252/25224179d2f031147bf4a113e91b4411.pdf> (дата звернення: 19.03.2017).

149. Traussing, R. Safety-Critical Systems: Processes, Standards and Certification: for the Seminar “Analysis, Design and Implementation of Reliable Software” . Paderborn: Universität Paderborn, 2004. P. 17.

150. Griebel, S. Sicherheitsnormen im Umbruch. Revision der EN 5012X Suite. Siemens AG: Industry Sector, Mobility Division. 2008. P. 20.

151. Peter, B. The Concepts of IEC 61508. An Overview and Analysis. Bielefeld: RVS, 2005. 52 p.

152. ДСТУ 4178-2003. Комплекси технічних засобів систем керування та регулювання руху поїздів. Функційна безпечність і надійність. Вимоги та методи випробовування. Київ: Державний комітет України з питань техногенного регулювання та споживчої політики, 2003. 32 с.

153. Памятка ОСЖД Р-858 от 09.11.2006 г. Основные принципы обеспечения безопасности и безотказности микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Варшава, 2006. 24 с.

154. Методика доказу функціональної безпеки мікроелектронних комплексів систем керування та регулювання рухом поїздів. Затв. наказом «Укрзалізниці» від 17.08.2002 р. № 452-Ц. Київ.: Вид. ПП «Алькор», 2002. 106 с.

155. Moiseenko V., Kameniev O., Gaievskiy V. Interactive approaches to the organization off staff interaction with automated control/ V International Scientific Technical Conference «Engineering. Technologies. Education. Security'2017»: Proceedings . Vol. 2. Technics and Technologies. Information Technologies, Natural and Mathematical Sciences. 31.05.2017 – 03.06.2017, Veliko Tarnovo. – Sofia, Bulgaria: Scientific technical union of mechanical engineering “Industry-4.0”, 2017. P. 221 – 224.

156. Формування теоретичних засад підвищення ефективності використання інформаційно-керуючих систем на залізничному транспорті. кер. В. Мойсеєнко; викон.: В. Бутенко [та ін.]. номер держреєстрації 0116U000787. Харків, 2016.

157. ДСТУ 3021–95. Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення. Київ.: Держстандарт України. 1995. 71 с.

158. Бочков, К.А., Харлап С.Н. Методы обеспечения безопасности в микропроцессорных системах железнодорожной автоматики и телемеханики: учебное пособие для студентов транспортных специальностей высших учебных заведений. Гомель: БелГУТ. 2001. 84 с.

159. Cliff O., Prokopenko M., Fitch R. Minimising the Kullback-Leibler Divergence for Model Selection in Distributed Nonlinear Systems. *Entropy*. 2018. Vol. 20, Iss. 2., P. 1 – 28.

160. Zrafi R., Ghedira S., Besbes K. A Bond Graph Approach for the Modeling and Simulation of a Buck Converter. *Journal of Low Power Electronics and Applications*. 2018. Vol. 8. Iss. 1. P. 1 – 11.

161. Małeckki K. Graph Cellular Automata with Relation-Based Neighbourhoods of Cells for Complex Systems Modelling: A Case of Traffic Simulation. *Symmetry*. 2017. Vol. 9, Iss. 12. P. 1 – 23.

162. Holder K., Zech A., Ramsaier M. Model-Based Requirements Management in Gear Systems Design Based On Graph-Based Design Languages. *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7, Iss. 11. P. 1 – 24.

163. Chen Y., Y. Guo, Wang Y. Modeling and Density Estimation of an Urban Freeway Network Based on Dynamic Graph Hybrid Automata. *Sensors*. 2017. ,Vol. 17, Iss. 7., P. 1 – 24.
164. Zhang, H., Lu F. GSMNet: A Hierarchical Graph Model for Moving Objects in Networks. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2017. Vol. 6, Iss. 3. P. 1 – 23.
165. Liu J. The Treewidth of Induced Graphs of Conditional Preference Networks Is Small. *Information*. 2017. Vol. 7, Iss. 1. P. 1 – 13.
166. Listrovoy S., Panchenko S., Listrova E. Mathematical models in computer control systems railways and parallel computing: monograph. Kharkiv. 2017. 300 p.
167. Zhou G., Feng W., Zhou Q., Zhou H. State Tracking and Fault Diagnosis for Dynamic Systems Using Labeled Uncertainty Graph . *Sensors*. 2015. Vol. 15, Iss. 11. P. 2831 – 2851.
168. Huynh-The T., Banos O., Le B. Traffic Behavior Recognition Using the Pachinko Allocation Model. *Sensors*. 2015. Vol. 15, Iss. 7. P. 16040 – 16059.
169. Santone A., Vaglini G. Model Checking Properties on Reduced Trace Systems. *Algorithms*. 2014. Vol. 7, Iss. 3. P. 339 – 362.
170. Csiszar V., Hussami P., Komlos J. Testing Goodness of Fit of Random Graph Models . *Algorithms*. 2012. Vol. 5, Iss. 4. P. 629 – 635.
171. Lu M, Cornel C., Prasenjit S. Content Sharing Graphs for Deduplication-Enabled Storage Systems. *Algorithms*. 2012. Vol. 5, Iss. 2. P. 236 – 260.
172. Козаченко Д. Н., Вернигора Р. В., Березовый Н. И. Комплексный анализ железнодорожной инфраструктуры металлургического комбината на основе графоаналитического моделирования. *Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна «Транспортні системи і технології перевезень»*. Дніпропетровськ. 2012. Вип. 4. С. 55 – 60.
173. Bobrovskiy V. I., Kozachenko D. N., Vernigora R. V. Functional simulation of railway stations on the basis of finite-state automata . *Transport Problems: The Silesian University of Technology, Faculty of Transport, Katowice, Poland*. 2014. Vol. 9, Iss. 3. P. 57 – 66.

174. Каменєв О.Ю. Оцінка ефективності комбінованих випробувань мікропроцесорної централізації за критерієм мінімуму обладнання. *Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту*. 2014. Вип. 38. С. 33 – 44.

175. Missbauer H., Uzsoy R. Production Planning with Capacitated Resources and Congestion: monograph / H.Missbauer, R.Uzsoy; Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature. 2020. P.80. DOI: 10/1007/978-1-0716-0354-3_1.

176. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. Киев: Техніка, 1977. 768 с.

177. Кокурин И.М., Кондратенко Л.Ф. Эксплуатационные основы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: учеб. для вузов ж.-д. трансп. Москва: Транспорт, 1980. С.168.

178. Полякова О.М. Логістичний підхід до взаємодії магістрального і промислового залізничного транспорту. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. Харків. 2015. Вип. 49. С. 199 – 203.

179. Campos J., Cantos P. Rail Transport Regulation. *Economic Development Institute of the World Bank*. 2017. P. 66.

180. Corman F., Real-time Railway Traffic Management: dispatching in complex, large and busy railway networks. *TRAIL Thesis Series T2010/14, the Netherlands TRAIL Research School*. 2010. P. 212.

181. Miao Y., Research on Centralized Dispatching System of Rail Transit . 2018 *International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*. Xiamen, Fujian, China, 2018. P. 34 – 37.

182. Krasemann, J. Computational decision-support for railway traffic management and associated configuration challenges: An experimental study. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2015. Vol. 5. № 3. P. 95 – 109.

183. Долгополов П.В., Головка Т.В., Галишинець Т.В. Удосконалення диспетчерського керівництва дільниці на основі прогнозного моделювання перевізного процесу. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2015. Вип. 49 (1158). С. 36 – 39.

184. Волков В.П., Мырхалыков Ж.У., Грицук И.В., Никонов О.Я., Сатаев М.И., Волков Ю.В., Саипов А.А. Интеллектуальные и телематические

технологии на транспорте: монография / Под ред. д-ра техн. наук. профессора Волкова В.П. ШЫМКЕНТ: Изд-во ЮКГУ им. М. Ауэзова, 2016. С. 508.

185. Liudvinavičius, Dailyska S., Sladkowski A. New possibilities of railway traffic control systems. *Transport Problems*. 2016. Vol. 11. Iss. 2. P. 133 – 142.

186. Kara, T. Cengiz Savaş M. Design and Simulation of a Decentralized Railway Traffic Control System. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2016. Vol. 6. No. 2. P. 945 – 951.

187. Luan X., Schutter B. D., Boom T. Distributed optimization for real-time railway traffic management. *IFAC PapersOnLine* 51-9. 2018. P. 106 – 111.

188. Ajanović, Z. Stolz M, Horn M. A novel model-based heuristic for energy-optimal motion planning form automated driving . *IFAC PapersOnLine* 51-9. 2018. P. 255 – 260.

189. Rupp, A. Stolz M., Horn M. Decentralized Cooperative Merging using Sliding Mode Control. *IFAC PapersOnLine* 51-9. 2018. P. 349 – 354.

190. Білявський В. М. Організація системи диспетчеризації операційної діяльності підприємств. *Вісник Львівської комерційної академії*. 2014. № 45.С. 27 – 32.

191. Калінін О. В., Калінін О. В. Операційний менеджмент якості на підприємствах в межах реалізації його інноваційного розвитку. *Теоретичні і практичні аспекти економіки та інтелектуальної власності*. 2013. Вип. 2 (1). С. 218 – 224.

192. Rota B., Simic M. Traffic Flow Optimization on Freeways. *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 96. P. 1637 – 1646.

193. Gu G., Perdisci R., Zhang J. BotMiner: Clustering Analysis of Network Traffic for Protocol- and StructureIndependent Botnet Detection . *USENIX Association. 17th USENIX Security Symposium*. 2008. P. 139 – 154.

194. Loiseau P., Primet P., Gonçalves P. A Long-Range Dependent Model for Network Traffic with Flow-Scale Correlations. *Stochastic Models*. 2011. Vol. 27. Iss. 2. P. 333 – 361.

195. Cremer M., Ludvig J. A fast simulation model for traffic flow on the basis of Boolean operations *M. Cremer, Mathematical Computer Simulation*. 1986. Vol. 28. P. 297 – 303.

196. Скалозуб В.В., Паник Л.А. Многокритериальные модели задачи анализа транспортных сетей с учетом специализированных свойств носителей потоковгриц. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2010. № 4. С. 15 – 21.

197. М.Ф. Дмитриченко, В.П. Матейчик, В.П. Волков, О.К. Грищук, М.П. Цюман, І.В. Грищук, Г.О.Вайганг, О.А.Клименко. Програмне забезпечення систем моніторингу транспорту: монографія / Під редакцією Дмитриченка М.Ф. Київ: Вид-во НТУ «КПІ».2016. 204 с.

198. Жалак, М. І., Триус Ю. В. Основи теорії і методів оптимізації: навч. Посібник.Черкаси : Брама-Україна. 2005. 608 с.

199. Кустов В. Ф., Каменев А. Ю. Экспериментально-статические модели распределённых технологических объектов. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. № 2. С. 97-101.

200. Грищук І.В., Волков В.П., Худяков І.В., Симоненко Р.В., Володарець М.В. Особливості формування системи дистанційного визначення працездатності та безпеки експлуатації транспортних засобів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 19, т. 4. – с. 298 – 309.

201. Шаманов В.И. Ягудин Р.Ш., Ведерников Б.М. Эффективность технических мероприятий по повышению надежности действующих устройств автоматики и телемеханики. *Автоматика, телемеханика, связь*. 1990. Вып. №6. С. 30 – 32.

ДОДАТОК А

Аналіз методів графоаналітичного моделювання технологічних об'єктів

Дослідженню методів та засобів використання теорії графів та топологічних матриць при моделюванні технологічних систем та об'єктів як транспортного, так і промислового призначення (в тому числі з метою їх випробувань) присвячено немало праць. Результати відповідних досліджень оперуються, перш за все, саме об'єктами, розподіленими на площині або в просторі (залізничні станції, взаємопов'язані технологічні агрегати тощо). Прикладна тематика досліджень останніх років зводиться, здебільшого, до впровадження програмованої обробки математичних моделей обчислювальними засобами.

Одне із останніх досліджень, пов'язане із використанням графічного моделювання розподілених систем, опубліковано в роботі [159]. В ній використовується ациклічний граф для моделювання спрямованих зв'язків між компонентами розподіленої системи. Відтворення динамічних характеристик об'єктів розподіленої структури в роботі базується на використанні методів диференціальної топології. На її основі для кожного елемента графа встановлюється змінна вага, що залежить від поточного стану нелінійної системи. На підставі застосування різних законів розподілу випадкових величин, до яких відносяться вагові коефіцієнти графічної моделі, відтворюється сукупність її статичних та динамічних властивостей. Проте результати такого дослідження можуть бути застосовані лише для «нечітких» (стохастичних) систем, використання яких обмежене при керуванні відповідальними технологічними процесами.

Схожий підхід, але по відношенню до електронних схем, запропоновано в роботі [160]. Реалізовані в ній графічні моделі на підставі нечіткої ознаки відтворюють і змінюють зв'язки між елементами залежно від поточного стану електронних ключів (транзисторів). Таким чином, динамічна конвертація графа зв'язків визначає роботу електронної схеми в різних режимах.

Використання графоаналітичного моделювання для формування кліткових автоматів, що відтворюють роботу складних розподілених систем, розглянуто в роботі [161]. В ній враховано змінний характер переходів між елементами графа на

підставі динамічних станів кліткових автоматів, що реалізовано на прикладі регулювання транспортних потоків. Аналітична інтерпретація графів виконана на основі класичних матриць суміжності та матриць маршрутів. Повне відтворення елементів графічної моделі виконується за допомогою пари таких матриць, що ускладнює програмовану обробку моделі.

В аспекті використання графоаналітичного моделювання як фундаментальної основи автоматизованого проектування технічних систем опубліковано відповідне дослідження в праці [162]. В ній запропоновано застосування графічних мов програмування, що закладаються у відповідні САПР складних систем. Але при цьому пропонується використання типових інтерфейсів, що не можуть врахувати специфічність кожної окремої системи, а також відсутнє аналітичне представлення створених моделей.

Використання динамічних графів з метою моделювання та дослідження транспортних потоків розглянуто в роботі [163]. В основу процесу закладається поєднання динамічних графів і гібридних автоматів у єдину геометричну модель. На її підставі за ймовірнісними характеристиками, розрахованими на базі теореми Ляпунова, оцінюється щільність транспортних потоків у певних елементах транспортної мережі (зокрема – залізничної), яка моделюється графічно. Таким чином, запропонована в роботі модель є прототипом функціонального графа, який можна розповсюдити на територіально розподілені мережі із диференційованою щільністю розподілу потоків будь-якого виду (інформації, транспортних одиниць, технологічних рідин тощо).

Схожа задача вирішується в дослідженні, наведеному в роботі [164]. На відміну від роботи [163], у ній за основу береться розподілений стан трафіку рухомих об'єктів замість його точкової щільності. Робота передбачає ієрархічну структуру графічної моделі, що має чотири складових. Кожна з них інтерпретує характеристики потоків, місця зміни напрямків, швидкість і час їх зміни. Результати роботи інтегруються в єдину геометричну модель. Результатом моделі є імітація переміщень рухомих об'єктів із різними кінематичними параметрами, що дає можливість її використання при вирішенні широкого спектру завдань.

Робота [165] оперує використанням індукованих графів у задачах проектування систем, що відтворюються мережами умовних уподобань (CP-мережі). У роботі [165] запропоновано метод обчислення потрібної послідовності індукованого графу CP-мережі. У результаті досягається можливість скорочення розмірності графічних моделей (у частині кількості вершин та ребер) для відтворення технологічних систем та об'єктів довільного призначення.

У роботі [166] розглянуті аспекти використання графічних моделей для проектування та дослідження інформаційно-керуючих систем на залізничному транспорті. Зокрема, запропоновано метод графоаналітичного проектування програмного забезпечення для систем керування шляхом відтворення топологічного розвитку об'єктів транспортної інфраструктури. Метод базується на відтворенні вагових параметрів графічної моделі у параметрично-топологічних матрицях за принципом позиціювання комірок. В подальшому запропоновано спосіб аналітичного відтворення графів великої розмірності шляхом визначення опосередкованих прямих сум матричних блоків. Проте модель спеціалізується на відтворенні виключно статичних характеристик технологічних об'єктів. Динамічні властивості мають бути закладені у незмінному програмному коді.

Схожий підхід, реалізований для діагностики складних динамічних систем на базі зваженого децентралізованого графа, запропоновано в роботі [167]. За його допомогою моделюються траєкторії переходу системи у проміжний стан, який виникає після прояву відмов та несправностей. Методом Монте-Карло визначаються ймовірнісні характеристики тих чи інших траєкторій поведінки системи, що моделюється.

Також моделювання та оптимізацію транспортних потоків на основі направлено ациклічного графа запропоновано в роботі [168]. Модель визначає кореляцію між поведінкою учасників дорожнього руху, маючи у собі вкладену модель підтримки прийняття рішень. Це дозволяє підвищити ефективність керування та контролю за динамічною поведінкою розподілених систем.

У роботі [169] пропонується теоретико-множинне представлення розподілених систем на підставі законів нечіткої логіки, що є альтернативою графічного

представлення. Визначені таким чином маршрути між компонентами системи фактично є опосередкованою інтерпретацією її графічної моделі. В результаті вдається частково скоротити обсяг обчислень при подібному моделюванні.

Питання вдосконалення матричної інтерпретації геометричних моделей, базованих на випадкових графах, розглянуті в роботі [170]. Аналогічно роботі [166], в ній запропоновано блочне представлення топологічної матриці суцільного графу, проте не розглянуто методики її зворотного синтезу, а також не враховано наділення елементів графу множинними ваговими параметрами. Натомість у моделі частково розкриті функціональні властивості елементів графу за рахунок їх цифрового шифрування.

У роботі [171] запропоновано графічну модель зберігання файлових даних на територіально-розподілених носіях в умовах дедуплікації. Модель передбачає відтворення одночасного використання розподіленого інформаційного контенту, причому вага елементів графа визначає інформаційну завантаженість кожного з розподілених ресурсів. Модель може бути використана для відтворення довільних характеристик розподілених систем в умовах належності відповідних компонентів до класу толерантності.

Узагальнення методів, моделей та алгоритмів графоаналітичного автоматизованого проектування інфраструктурних об'єктів на прикладі залізничних станцій наведено у праці [172]. Аналогічно тому, як це зроблено в роботі [166], у роботі [172] передбачається геометричне представлення топологічного розвитку інфраструктурного об'єкта, проте аналітичне відтворення виконується не на основі топологічних матриць, а окремих списків інцидентності та вагових параметрів вершин та ребер. Це певним чином знижує універсальність математичної обробки графічних моделей, що є суттєвим недоліком запропонованих підходів.

У роботі [173] певним чином доопрацьовані графоаналітичні методи і моделі, запропоновані в роботі [172] у частині комп'ютерної реалізації та сфери застосування. Зокрема, в ній реалізовані підходи щодо використання зазначених видів моделювання у створенні тренажерів та інших навчальних комплексів для оперативного персоналу, пов'язаного із керуванням інфраструктурними об'єктами

(на прикладі залізничних станцій). Закладені в тренажери принципи можуть використовуватися в процесі випробувань систем.

Так чи інакше, слід узагальнити методи, моделі та засоби графоаналітичного моделювання розподілених технологічних систем та об'єктів, викладені у працях [159 – 173]. В аспекті застосування зазначених категорій з метою дослідження роботи та автоматизованого проектування інформаційно-керуючих систем, можна виділити такі їх загальні обмеження та недоліки:

- відсутність можливості відтворення необхідної повноти динамічних характеристик, що є потрібною для автоматизованого проектування (конфігурування) програмних засобів;

- складність позиціонування вагових параметрів графічних моделей по комірках параметрично-топологічних матриць;

- висока ймовірність помилок складачів моделей для конкретних об'єктів або систем внаслідок громіздкості;

- обмеження щодо співвідношення потужностей множин вагових параметрів елементів графів та розмірності матричних блоків, що відтворюють графічні моделі аналітичним чином.

Отже, подальше вдосконалення графоаналітичних методів моделювання з метою випробувань СКРП полягає в частковому усуненні зазначених обмежень. Це можливо за рахунок використання функціональних графів, в рамках функціоналів вершин та ребер яких відтворюються як статичні вагові параметри, так і динамічні властивості відтворюваних ними об'єктів. Для вирішення цих задач передбачається взяття за основу методів графоаналітичного моделювання, що наведені в роботах [159 – 173]. Шляхом синтезу запропонованих у них підходів, додаванням додаткових опрацювань та адаптації під мікропроцесорні СКРП різного функціонального призначення передбачається формування низки методів та моделей, які забезпечують можливість відтворення як статичних, так і динамічних характеристики систем керування в умовах реконфігурації силами і засобами спеціалістів у галузі технології роботи СКРП без корегування вихідного коду прикладних програмних засобів.

ДОДАТОК Б

Розв'язання системи лінійних рівнянь зв'язків між елементами тестового покриття систем керування рухом поїздів

Згідно з правилом Крамера кожний допоміжний (локальний) визначник Δ_{x_j} знаходиться із головного визначника системи (матриці біективних зв'язків) $\Delta_{Z_{\bar{0}_3}}$ шляхом заміни в ньому стовпця № j матрицею-стовпцем тестового покриття (стовпцем вільних членів)

$$\left\| \sum_{M_{ij}} z_{ij} \right\| \rightarrow \left\| \sum_i M_{mn_i}^M \right\|. \quad (\text{Б.1})$$

Відповідно до правила обчислення визначників квадратних матриць значення $\Delta_{Z_{\bar{0}_3}}$ та Δ_{x_j} розраховуються таким чином

$$\begin{aligned} \Delta_{Z_{\bar{0}_3}} &= \begin{vmatrix} 0 & \sum_{M_{12}} z_{12} & \sum_{M_{13}} z_{13} & \sum_{M_{14}} z_{14} \\ \sum_{M_{21}} z_{21} & 0 & \sum_{M_{23}} z_{23} & \sum_{M_{24}} z_{24} \\ \sum_{M_{31}} z_{31} & \sum_{M_{32}} z_{32} & 0 & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & \sum_{M_{42}} z_{42} & \sum_{M_{43}} z_{43} & 0 \end{vmatrix} = \sum_{j=1}^4 (-1)^{1+j} \sum_{M_{1j}} z_{1j} M_j^{-1} = \\ &= - \sum_{M_{12}} z_{12} \begin{vmatrix} \sum_{M_{21}} z_{21} & \sum_{M_{23}} z_{23} & \sum_{M_{24}} z_{24} \\ \sum_{M_{31}} z_{31} & 0 & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & \sum_{M_{43}} z_{43} & 0 \end{vmatrix} + \sum_{M_{13}} z_{13} \begin{vmatrix} \sum_{M_{21}} z_{21} & 0 & \sum_{M_{24}} z_{24} \\ \sum_{M_{31}} z_{31} & \sum_{M_{32}} z_{32} & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & \sum_{M_{42}} z_{42} & 0 \end{vmatrix} - \\ &\quad - \sum_{M_{14}} z_{14} \begin{vmatrix} \sum_{M_{21}} z_{21} & 0 & \sum_{M_{23}} z_{23} \\ \sum_{M_{31}} z_{31} & \sum_{M_{32}} z_{32} & 0 \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & \sum_{M_{42}} z_{42} & \sum_{M_{43}} z_{43} \end{vmatrix} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -\sum_{\dot{i}_{12}} z_{12} \left(\sum_{\dot{i}_{21}} z_{21} \begin{vmatrix} 0 & \sum_{\dot{i}_{34}} z_{34} \\ \sum_{\dot{i}_{43}} z_{43} & 0 \end{vmatrix} - \sum_{\dot{i}_{23}} z_{23} \begin{vmatrix} \sum_{\dot{i}_{31}} z_{31} & \sum_{\dot{i}_{34}} z_{34} \\ \sum_{\dot{i}_{41}} z_{41} & 0 \end{vmatrix} + \sum_{\dot{i}_{24}} z_{24} \begin{vmatrix} \sum_{\dot{i}_{31}} z_{31} & 0 \\ \sum_{\dot{i}_{41}} z_{41} & \sum_{\dot{i}_{43}} z_{43} \end{vmatrix} \right) + \\
&\quad + \sum_{\dot{i}_{13}} z_{13} \left(\sum_{\dot{i}_{21}} z_{21} \begin{vmatrix} \sum_{\dot{i}_{32}} z_{32} & \sum_{\dot{i}_{34}} z_{34} \\ \sum_{\dot{i}_{42}} z_{42} & 0 \end{vmatrix} + \sum_{\dot{i}_{24}} z_{24} \begin{vmatrix} \sum_{\dot{i}_{31}} z_{31} & \sum_{\dot{i}_{32}} z_{32} \\ \sum_{\dot{i}_{41}} z_{41} & \sum_{\dot{i}_{42}} z_{42} \end{vmatrix} \right) - \\
&\quad - \sum_{\dot{i}_{14}} z_{14} \left(\sum_{\dot{i}_{21}} z_{21} \begin{vmatrix} \sum_{\dot{i}_{32}} z_{32} & 0 \\ \sum_{\dot{i}_{42}} z_{42} & \sum_{\dot{i}_{43}} z_{43} \end{vmatrix} + \sum_{\dot{i}_{23}} z_{23} \begin{vmatrix} \sum_{\dot{i}_{31}} z_{31} & \sum_{\dot{i}_{32}} z_{32} \\ \sum_{\dot{i}_{41}} z_{41} & \sum_{\dot{i}_{42}} z_{42} \end{vmatrix} \right) = \\
&= -\sum_{\dot{i}_{12}} z_{12} \left(-\sum_{\dot{i}_{21}} z_{21} \sum_{\dot{i}_{34}} z_{34} \sum_{\dot{i}_{43}} z_{43} + \sum_{\dot{i}_{23}} z_{23} \sum_{\dot{i}_{34}} z_{34} \sum_{\dot{i}_{41}} z_{41} + \sum_{\dot{i}_{24}} z_{24} \sum_{\dot{i}_{31}} z_{31} \sum_{\dot{i}_{43}} z_{43} \right) + \\
&\quad + \sum_{\dot{i}_{13}} z_{13} \left(-\sum_{\dot{i}_{21}} z_{21} \sum_{\dot{i}_{34}} z_{34} \sum_{\dot{i}_{42}} z_{42} + \sum_{\dot{i}_{24}} z_{24} \sum_{\dot{i}_{31}} z_{31} \sum_{\dot{i}_{42}} z_{42} - \sum_{\dot{i}_{24}} z_{24} \sum_{\dot{i}_{32}} z_{32} \sum_{\dot{i}_{41}} z_{41} \right) - \\
&\quad - \sum_{\dot{i}_{14}} z_{14} \left(\sum_{\dot{i}_{21}} z_{21} \sum_{\dot{i}_{32}} z_{32} \sum_{\dot{i}_{43}} z_{43} + \sum_{\dot{i}_{23}} z_{23} \sum_{\dot{i}_{31}} z_{31} \sum_{\dot{i}_{42}} z_{42} + \sum_{\dot{i}_{23}} z_{23} \sum_{\dot{i}_{32}} z_{32} \sum_{\dot{i}_{41}} z_{41} \right),
\end{aligned}$$

де M_j^{-1} – додатковий мінор до відповідного члена матриці системи, що формується як визначник третього порядку при викресленні стовпця i і строки, на перетині яких дислокується відповідний член.

Враховуючи біективний характер взаємозв'язків між елементами множин M_{ij} , справедливою буде симетрія [158]

$$M_{ij} = M_{ji}, \tag{Б.2}$$

$$\sum_{\dot{i}_{ij}} z_{ij} = \sum_{\dot{i}_{ji}} z_{ji}.$$

З урахуванням наведеної симетрії (Б.2), розкриваючи дужки у вищенаведеному виразі для обчислення детермінанта $\Delta_{Z\delta_3}$ системи рівнянь, та

приймаючи умову симетричного пріоритету $i < j$, формується наступне поліноміальне значення для його обчислення

$$\Delta_{z_{63}} = \left(\sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{34}} z_{34} \right)^2 + \left(\sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} \right)^2 + \left(\sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} \right)^2 - \quad (Б.3)$$

$$- 2 \left(\sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{34}} z_{34} + \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} \sum_{M_{34}} z_{34} + \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{24}} z_{24} \right).$$

Відповідно до перетворень матриці біективних зв'язків за принципом (Б.1), враховуючи симетрію (Б.2) обчислюються допоміжні визначники Δ_{x_j} для кожного значення x_i .

Додатковий мінор для значення x_l обчислюється як

$$\Delta_{x_1} = \begin{vmatrix} [M_{\phi}^m] & \sum_{M_{12}} z_{12} & \sum_{M_{13}} z_{13} & \sum_{M_{14}} z_{14} \\ [M_{окк}^m] & 0 & \sum_{M_{23}} z_{23} & \sum_{M_{24}} z_{24} \\ [M_{mc}^m] & \sum_{M_{32}} z_{32} & 0 & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ [M_{наз}^m] & \sum_{M_{42}} z_{42} & \sum_{M_{43}} z_{43} & 0 \end{vmatrix} = [M_{\phi}^m] \begin{vmatrix} 0 & \sum_{M_{23}} z_{23} & \sum_{M_{24}} z_{24} \\ \sum_{M_{32}} z_{32} & 0 & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ \sum_{M_{42}} z_{42} & \sum_{M_{43}} z_{43} & 0 \end{vmatrix} -$$

$$- \sum_{M_{12}} z_{12} \begin{vmatrix} [M_{окк}^m] & \sum_{M_{23}} z_{23} & \sum_{M_{24}} z_{24} \\ [M_{mc}^m] & 0 & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ [M_{наз}^m] & \sum_{M_{43}} z_{43} & 0 \end{vmatrix} + \sum_{M_{13}} z_{13} \begin{vmatrix} [M_{окк}^m] & 0 & \sum_{M_{24}} z_{24} \\ [M_{mc}^m] & \sum_{M_{32}} z_{32} & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ [M_{наз}^m] & \sum_{M_{42}} z_{42} & 0 \end{vmatrix} -$$

$$- \sum_{M_{14}} z_{14} \begin{vmatrix} [M_{окк}^m] & 0 & \sum_{M_{23}} z_{23} \\ [M_{mc}^m] & \sum_{M_{32}} z_{32} & 0 \\ [M_{наз}^m] & \sum_{M_{42}} z_{42} & \sum_{M_{43}} z_{43} \end{vmatrix} = [M_{\phi}^m] \left(- \sum_{M_{23}} z_{23} \begin{vmatrix} \sum_{M_{32}} z_{32} & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ \sum_{M_{42}} z_{42} & 0 \end{vmatrix} + \sum_{M_{24}} z_{24} \begin{vmatrix} \sum_{M_{32}} z_{32} & 0 \\ \sum_{M_{42}} z_{42} & \sum_{M_{43}} z_{43} \end{vmatrix} \right) -$$

$$\begin{aligned}
& -\sum_{M_{12}} z_{12} \left(\begin{array}{c|c} 0 & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ \hline [M_{окк}^m] & \sum_{M_{43}} z_{43} \end{array} \right) - \sum_{M_{23}} z_{23} \left(\begin{array}{c|c} [M_{mc}^m] & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ \hline [M_{наз}^m] & 0 \end{array} \right) + \sum_{M_{24}} z_{24} \left(\begin{array}{c|c} [M_{mc}^m] & 0 \\ \hline [M_{наз}^m] & \sum_{M_{43}} z_{43} \end{array} \right) + \\
& + \sum_{M_{13}} z_{13} \left(\begin{array}{c|c} \sum_{M_{32}} z_{32} & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ \hline [M_{окк}^m] & 0 \end{array} \right) + \sum_{M_{24}} z_{24} \left(\begin{array}{c|c} [M_{mc}^m] & \sum_{M_{32}} z_{32} \\ \hline [M_{наз}^m] & \sum_{M_{42}} z_{42} \end{array} \right) - \\
& - \sum_{M_{14}} z_{14} \left(\begin{array}{c|c} \sum_{M_{32}} z_{32} & 0 \\ \hline [M_{окк}^m] & \sum_{M_{43}} z_{43} \end{array} \right) + \sum_{M_{23}} z_{23} \left(\begin{array}{c|c} [M_{mc}^m] & \sum_{M_{32}} z_{32} \\ \hline [M_{наз}^m] & \sum_{M_{42}} z_{42} \end{array} \right) = \\
& = [M_{\phi}^m] \left(\sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{34}} z_{34} \sum_{M_{42}} z_{42} + \sum_{M_{24}} z_{24} \sum_{M_{32}} z_{32} \sum_{M_{43}} z_{43} \right) - \\
& - \sum_{M_{12}} z_{12} \left(-[M_{окк}^m] \sum_{M_{34}} z_{34} \sum_{M_{43}} z_{43} + \sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{34}} z_{34} [M_{наз}^m] + \sum_{M_{24}} z_{24} [M_{mc}^m] \sum_{M_{43}} z_{43} \right) + \\
& + \sum_{M_{13}} z_{13} \left(-[M_{окк}^m] \sum_{M_{34}} z_{34} \sum_{M_{42}} z_{42} + \sum_{M_{24}} z_{24} [M_{mc}^m] \sum_{M_{42}} z_{42} - \sum_{M_{24}} z_{24} \sum_{M_{32}} z_{32} [M_{наз}^m] \right) - \\
& - \sum_{M_{14}} z_{14} \left([M_{окк}^m] \sum_{M_{32}} z_{32} \sum_{M_{43}} z_{43} + \sum_{M_{23}} z_{23} [M_{mc}^m] \sum_{M_{42}} z_{42} - \sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{32}} z_{32} [M_{наз}^m] \right).
\end{aligned}$$

Розкриваючи дужки, враховуючи умови (Б.1) та $i < j$, формується аналогічний (Б.3) поліноміальний вираз для мінора Δx_l

$$\begin{aligned}
\Delta_{x_l} = & 2[M_{\phi}^m] \sum_{M_{23}} z_{23} + [M_{окк}^m] \sum_{M_{12}} z_{12} \left(\sum_{M_{34}} z_{34} \right)^2 - [M_{наз}^m] \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{34}} z_{34} - \\
& - [M_{mc}^m] \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{24}} z_{24} \sum_{M_{34}} z_{34} - [M_{окк}^m] \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} \sum_{M_{34}} z_{34} + [M_{mc}^m] \sum_{M_{13}} z_{13} \left(\sum_{M_{24}} z_{24} \right)^2 - \\
& - [M_{наз}^m] \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{24}} z_{24} - [M_{окк}^m] \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{34}} z_{34} - \\
& - [M_{mc}^m] \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{24}} z_{24} + [M_{наз}^m] \sum_{M_{14}} z_{14} \left(\sum_{M_{23}} z_{23} \right)^2.
\end{aligned}$$

Виконуючи групування спільних членів у отриманому виразі за прив'язкою до модифікованих множин тестового покриття формується вираз

$$\begin{aligned}
 \Delta_{x_1} = & 2 \left[M_{\phi}^M \right] \sum_{M_{23}} z_{23} + \left[M_{окк}^M \right] \sum_{M_{34}} z_{34} \left(\sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{34}} z_{34} - \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} - \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} \right) + \\
 & + \left[M_{наз}^M \right] \sum_{M_{23}} z_{23} \left(\sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} - \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{34}} z_{34} - \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} \right) + \\
 & + \left[M_{mc}^M \right] \sum_{M_{24}} z_{24} \left(\sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} - \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{34}} z_{34} - \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} \right).
 \end{aligned} \tag{Б.4}$$

Аналогічно обчислюються додаткові мінори $\Delta x_2 - \Delta x_4$

$$\begin{aligned}
 \Delta_{x_2} = & \begin{vmatrix} 0 & [M_{\phi}^M] & \sum_{M_{13}} z_{13} & \sum_{M_{14}} z_{14} \\ \sum_{M_{21}} z_{21} & [M_{окк}^M] & \sum_{M_{23}} z_{23} & \sum_{M_{24}} z_{24} \\ \sum_{M_{31}} z_{31} & [M_{mc}^M] & 0 & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & [M_{наз}^M] & \sum_{M_{43}} z_{43} & 0 \end{vmatrix} = - [M_{\phi}^M] \begin{vmatrix} \sum_{M_{21}} z_{21} & \sum_{M_{23}} z_{23} & \sum_{M_{24}} z_{24} \\ \sum_{M_{31}} z_{31} & 0 & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & \sum_{M_{43}} z_{43} & 0 \end{vmatrix} + \\
 & + \sum_{M_{13}} z_{13} \begin{vmatrix} \sum_{M_{21}} z_{21} & [M_{окк}^M] & \sum_{M_{24}} z_{24} \\ \sum_{M_{31}} z_{31} & [M_{mc}^M] & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & [M_{наз}^M] & 0 \end{vmatrix} - \sum_{M_{14}} z_{14} \begin{vmatrix} \sum_{M_{21}} z_{21} & [M_{окк}^M] & \sum_{M_{23}} z_{23} \\ \sum_{M_{31}} z_{31} & [M_{mc}^M] & 0 \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & [M_{наз}^M] & \sum_{M_{43}} z_{43} \end{vmatrix} = \\
 = & - [M_{\phi}^M] \left(\begin{vmatrix} 0 & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ \sum_{M_{21}} z_{21} & \sum_{M_{43}} z_{43} \end{vmatrix} - \sum_{M_{23}} z_{23} \begin{vmatrix} \sum_{M_{31}} z_{31} & \sum_{M_{41}} z_{41} \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & 0 \end{vmatrix} + \sum_{M_{24}} z_{24} \begin{vmatrix} \sum_{M_{31}} z_{31} & 0 \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & \sum_{M_{43}} z_{43} \end{vmatrix} \right) + \\
 & + \sum_{M_{13}} z_{13} \left(\begin{vmatrix} [M_{mc}^M] & \sum_{M_{34}} z_{34} \\ \sum_{M_{21}} z_{21} & 0 \end{vmatrix} - [M_{окк}^M] \begin{vmatrix} \sum_{M_{31}} z_{31} & \sum_{M_{41}} z_{41} \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & 0 \end{vmatrix} + \sum_{M_{24}} z_{24} \begin{vmatrix} \sum_{M_{31}} z_{31} & [M_{mc}^M] \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & [M_{наз}^M] \end{vmatrix} \right) - \\
 & - \sum_{M_{14}} z_{14} \left(\begin{vmatrix} [M_{mc}^M] & 0 \\ \sum_{M_{21}} z_{21} & \sum_{M_{43}} z_{43} \end{vmatrix} - [M_{окк}^M] \begin{vmatrix} \sum_{M_{31}} z_{31} & 0 \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & \sum_{M_{43}} z_{43} \end{vmatrix} + \sum_{M_{23}} z_{23} \begin{vmatrix} \sum_{M_{31}} z_{31} & [M_{mc}^M] \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & [M_{наз}^M] \end{vmatrix} \right).
 \end{aligned}$$

Після опрацювання визначників другого порядку в попередньому виразі формується лінійна комбінація

$$\begin{aligned} \Delta_{x_2} = & - \left[M_{\phi}^m \right] \left(- \sum_{M_{21}} z_{21} \sum_{M_{34}} z_{34} \sum_{M_{43}} z_{43} + \sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{34}} z_{34} \sum_{M_{41}} z_{41} + \sum_{M_{24}} z_{24} \sum_{M_{32}} z_{31} \sum_{M_{43}} z_{43} \right) + \\ & + \sum_{M_{13}} z_{13} \left(- \sum_{M_{21}} z_{21} \sum_{M_{34}} z_{34} \left[M_{naz}^m \right] + \left[M_{окк}^m \right] \sum_{M_{34}} z_{34} \sum_{M_{41}} z_{41} + \sum_{M_{24}} z_{24} \sum_{M_{31}} z_{31} \left[M_{naz}^m \right] - \sum_{M_{24}} z_{24} \left[M_{mc}^m \right] \sum_{M_{41}} z_{41} \right) - \\ & - \sum_{M_{14}} z_{14} \left(\sum_{M_{21}} z_{21} \left[M_{mc}^m \right] \sum_{M_{43}} z_{43} - \left[M_{окк}^m \right] \sum_{M_{31}} z_{31} \sum_{M_{43}} z_{43} + \sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{31}} z_{31} \left[M_{naz}^m \right] - \sum_{M_{23}} z_{23} \left[M_{mc}^m \right] \sum_{M_{41}} z_{41} \right). \end{aligned}$$

Після виконання умов (Б.2) та $i < j$

$$\begin{aligned} \Delta_{x_2} = & \left[M_{\phi}^m \right] \sum_{M_{12}} z_{12} \left(\sum_{M_{34}} z_{34} \right)^2 + \left[M_{\phi}^m \right] \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{34}} z_{34} + \left[M_{\phi}^m \right] \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} \sum_{M_{34}} z_{34} + \\ & + \left[M_{naz}^m \right] \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{34}} z_{34} + 2 \left[M_{окк}^m \right] \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{34}} z_{34} + \left[M_{naz}^m \right] \left(\sum_{M_{13}} z_{13} \right)^2 \sum_{M_{24}} z_{24} - \\ & - \left[M_{mc}^m \right] \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{24}} z_{24} - \left[M_{mc}^m \right] \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{34}} z_{34} - \left[M_{naz}^m \right] \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} + \\ & + \left[M_{mc}^m \right] \left(\sum_{M_{14}} z_{14} \right)^2 \sum_{M_{23}} z_{23}. \end{aligned}$$

Виконуючи групування подібних членів за функціональною прив'язкою до тестового покриття

$$\begin{aligned} \Delta_{x_2} = & \left[M_{окк}^m \right] \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{34}} z_{34} + \left[M_{\phi}^m \right] \sum_{M_{34}} z_{34} \left(\sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{34}} z_{34} + \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} + \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} \right) + \\ & + \left[M_{naz}^m \right] \sum_{M_{13}} z_{13} \left(\sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} - \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{34}} z_{34} - \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} \right) + \\ & + \left[M_{mc}^m \right] \sum_{M_{14}} z_{14} \left(\sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} - \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{34}} z_{34} - \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} \right). \end{aligned} \quad (Б.5)$$

З урахуванням умов (Б.2) та $i < j$

$$\begin{aligned} \Delta_{x_3} = & \left[M_{наз}^m \right] \left(\sum_{M_{12}} z_{12} \right)^2 \sum_{M_{34}} z_{34} - \left[M_{окк}^m \right] \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{34}} z_{34} - \left[M_{наз}^m \right] \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} + \\ & + 2 \left[M_{mc}^m \right] \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{24}} z_{24} - \left[M_{\phi}^m \right] \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{24}} z_{24} \sum_{M_{34}} z_{34} + \left[M_{\phi}^m \right] \sum_{M_{13}} z_{13} \left(\sum_{M_{24}} z_{24} \right)^2 - \\ & - \left[M_{\phi}^m \right] \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{24}} z_{24} - \left[M_{наз}^m \right] \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} - \left[M_{окк}^m \right] \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{24}} z_{24} + \\ & + \left[M_{окк}^m \right] \left(\sum_{M_{14}} z_{14} \right)^2 \sum_{M_{23}} z_{23}. \end{aligned}$$

Після групування та приведення подібних членів:

$$\begin{aligned} \Delta_{x_3} = & 2 \left[M_{mc}^m \right] \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{24}} z_{24} + \left[M_{наз}^m \right] \sum_{M_{12}} z_{12} \left(\sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{34}} z_{34} - \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} - \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} \right) + \\ & + \left[M_{окк}^m \right] \sum_{M_{14}} z_{14} \left(\sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} - \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{34}} z_{34} - \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} \right) + \\ & + \left[M_{\phi}^m \right] \sum_{M_{24}} z_{24} \left(\sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} - \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{34}} z_{34} - \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} \right). \end{aligned} \quad (Б.6)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{x_4} = & \begin{vmatrix} 0 & \sum_{M_{12}} z_{12} & \sum_{M_{13}} z_{13} & \left[M_{\phi}^m \right] \\ \sum_{M_{21}} z_{21} & 0 & \sum_{M_{23}} z_{23} & \left[M_{окк}^m \right] \\ \sum_{M_{31}} z_{31} & \sum_{M_{32}} z_{32} & 0 & \left[M_{mc}^m \right] \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & \sum_{M_{42}} z_{42} & \sum_{M_{43}} z_{43} & \left[M_{наз}^m \right] \end{vmatrix} = - \sum_{M_{12}} z_{12} \begin{vmatrix} \sum_{M_{21}} z_{21} & \sum_{M_{23}} z_{23} & \left[M_{окк}^m \right] \\ \sum_{M_{31}} z_{31} & 0 & \left[M_{mc}^m \right] \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & \sum_{M_{43}} z_{43} & \left[M_{наз}^m \right] \end{vmatrix} + \\ & + \sum_{M_{13}} z_{13} \begin{vmatrix} \sum_{M_{21}} z_{21} & 0 & \left[M_{окк}^m \right] \\ \sum_{M_{31}} z_{31} & \sum_{M_{32}} z_{32} & \left[M_{mc}^m \right] \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & \sum_{M_{42}} z_{42} & \left[M_{наз}^m \right] \end{vmatrix} - \left[M_{\phi}^m \right] \begin{vmatrix} \sum_{M_{21}} z_{21} & 0 & \sum_{M_{23}} z_{23} \\ \sum_{M_{31}} z_{31} & \sum_{M_{32}} z_{32} & 0 \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & \sum_{M_{42}} z_{42} & \sum_{M_{43}} z_{43} \end{vmatrix} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -\sum_{M_{12}} z_{12} \left(\sum_{M_{21}} z_{21} \begin{vmatrix} 0 & [M_{mc}^m] \\ \sum_{M_{43}} z_{43} & [M_{na3}^m] \end{vmatrix} - \sum_{M_{23}} z_{23} \begin{vmatrix} \sum_{M_{31}} z_{31} & [M_{mc}^m] \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & [M_{na3}^m] \end{vmatrix} + [M_{окк}^m] \begin{vmatrix} \sum_{M_{31}} z_{31} & 0 \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & \sum_{M_{43}} z_{43} \end{vmatrix} \right) + \\
&+ \sum_{M_{13}} z_{13} \left(\sum_{M_{21}} z_{21} \begin{vmatrix} \sum_{M_{31}} z_{31} & [M_{mc}^m] \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & [M_{na3}^m] \end{vmatrix} + [M_{окк}^m] \begin{vmatrix} \sum_{M_{31}} z_{31} & \sum_{M_{32}} z_{32} \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & \sum_{M_{42}} z_{42} \end{vmatrix} \right) - \\
&- [M_{\phi}^m] \left(\sum_{M_{21}} z_{21} \begin{vmatrix} \sum_{M_{32}} z_{32} & 0 \\ \sum_{M_{42}} z_{42} & \sum_{M_{43}} z_{43} \end{vmatrix} + \sum_{M_{23}} z_{23} \begin{vmatrix} \sum_{M_{31}} z_{31} & \sum_{M_{32}} z_{32} \\ \sum_{M_{41}} z_{41} & \sum_{M_{42}} z_{42} \end{vmatrix} \right) = \\
&= -\sum_{M_{12}} z_{12} \left(-\sum_{M_{21}} z_{21} [M_{mc}^m] \sum_{M_{43}} z_{43} - \sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{31}} z_{31} [M_{na3}^m] + \sum_{M_{23}} z_{23} [M_{mc}^m] \sum_{M_{41}} z_{41} + [M_{окк}^m] \sum_{M_{31}} z_{31} \sum_{M_{43}} z_{43} \right) + \\
&+ \sum_{M_{13}} z_{13} \left(\sum_{M_{21}} z_{21} \sum_{M_{32}} z_{32} [M_{na3}^m] - \sum_{M_{21}} z_{21} [M_{mc}^m] \sum_{M_{42}} z_{42} + [M_{окк}^m] \sum_{M_{31}} z_{31} \sum_{M_{42}} z_{42} - [M_{окк}^m] \sum_{M_{32}} z_{32} \sum_{M_{41}} z_{41} \right) - \\
&- [M_{\phi}^m] \left(\sum_{M_{21}} z_{21} \sum_{M_{32}} z_{32} \sum_{M_{43}} z_{43} + \sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{31}} z_{31} \sum_{M_{42}} z_{42} - \sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{32}} z_{32} \sum_{M_{41}} z_{41} \right).
\end{aligned}$$

З урахуванням умов (Б.3) та основи за меншим індексом

$$\begin{aligned}
\Delta_{x4} &= [M_{mc}^m] \left(\sum_{M_{12}} z_{12} \right)^2 \sum_{M_{34}} z_{34} - 2 [M_{na3}^m] \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{23}} z_{23} - [M_{mc}^m] \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} - \\
&- [M_{окк}^m] \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{34}} z_{34} - [M_{mc}^m] \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} + [M_{окк}^m] \left(\sum_{M_{13}} z_{13} \right)^2 \sum_{M_{24}} z_{24} - \\
&- [M_{окк}^m] \left(\sum_{M_{13}} z_{13} \right)^2 \sum_{M_{23}} z_{23} - [M_{\phi}^m] \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{34}} z_{34} - [M_{\phi}^m] \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{24}} z_{24} + \\
&+ [M_{\phi}^m] \sum_{M_{14}} z_{14} \left(\sum_{M_{23}} z_{23} \right)^2.
\end{aligned}$$

Після групування та приведення подібних членів

$$\begin{aligned}
 \Delta_{x_4} = & 2 \left[M_{наз}^m \right] \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{23}} z_{23} + \\
 & + \left[M_{mc}^m \right] \sum_{M_{12}} z_{12} \left(\sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{34}} z_{34} - \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} - \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} \right) + \\
 & + \left[M_{окк}^m \right] \sum_{M_{13}} z_{13} \left(\sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} - \sum_{M_{14}} z_{14} \sum_{M_{23}} z_{23} - \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{34}} z_{34} \right) + \\
 & + \left[M_{\phi}^m \right] \sum_{M_{23}} z_{23} \left(\sum_{M_{23}} z_{23} \sum_{M_{14}} z_{14} - \sum_{M_{12}} z_{12} \sum_{M_{34}} z_{34} - \sum_{M_{13}} z_{13} \sum_{M_{24}} z_{24} \right).
 \end{aligned} \tag{Б.7}$$

Підраховані детермінант (визначник) та додаткові мінори дозволяють безпосередньо знайти необхідні розв'язки системи рівнянь.

ДОДАТОК В

Таблиця перевірки адекватності моделі оцінки тестового покриття

Parameter			Y3 expression1		Y3 expression2		Margin		Accuracy, %	
Sequence	Y1	Y2	min	Max	min	max	of min	of max	of min	of max
1	-100	-100	0	100	1	100	-1	0	100	0
2	-100	-99	0	100	1	100	-1	0	100	0
3	-100	-98	0	100	1	100	-1	0	100	0
4	-100	-97	0	100	1	100	-1	0	100	0
5	-100	-96	0	100	1	100	-1	0	100	0
6	-100	-95	0	100	1	100	-1	0	100	0
7	-100	-94	0	100	1	100	-1	0	100	0
8	-100	-93	0	100	1	100	-1	0	100	0
9	-100	-92	0	100	1	100	-1	0	100	0
10	-100	-91	0	100	1	100	-1	0	100	0
11	-100	-90	0	100	1	100	-1	0	100	0
12	-100	-89	0	100	1	100	-1	0	100	0
13	-100	-88	0	100	1	100	-1	0	100	0
14	-100	-87	0	100	1	100	-1	0	100	0
15	-100	-86	0	100	0	100	0	0	0	0
16	-100	-85	0	100	0	100	0	0	0	0
17	-100	-84	0	100	0	100	0	0	0	0
18	-100	-83	0	100	0	100	0	0	0	0
19	-100	-82	0	100	0	100	0	0	0	0
20	-100	-81	-1	100	0	100	-1	0	100	0
21	-100	-80	-1	100	0	100	-1	0	100	0
22	-100	-79	-1	100	0	100	-1	0	100	0
23	-100	-78	-1	100	0	100	-1	0	100	0
24	-100	-77	-1	100	-1	100	0	0	0	0
25	-100	-76	-1	100	-1	100	0	0	0	0
26	-100	-75	-1	100	-1	100	0	0	0	0
27	-100	-74	-1	100	-1	100	0	0	0	0
28	-100	-73	-2	100	-1	100	-1	0	50	0
29	-100	-72	-2	100	-1	100	-1	0	50	0
30	-100	-71	-2	100	-1	100	-1	0	50	0
31	-100	-70	-2	100	-2	100	0	0	0	0
32	-100	-69	-2	100	-2	100	0	0	0	0
33	-100	-68	-3	100	-2	100	-1	0	33.333333	0
34	-100	-67	-3	100	-2	100	-1	0	33.333333	0
35	-100	-66	-3	100	-3	100	0	0	0	0
36	-100	-65	-3	100	-3	100	0	0	0	0
37	-100	-64	-4	100	-3	100	-1	0	25	0
38	-100	-63	-4	100	-3	100	-1	0	25	0

Продовження – Додаток В

Parameter			Y3 expression1		Y3 expression2		Margin		Accuracy, %	
Sequence	Y1	Y2	min	max	min	max	of min	of max	of min	of max
39	-100	-62	-4	100	-4	100	0	0	0	0
40	-100	-61	-4	100	-4	100	0	0	0	0
41	-100	-60	-5	100	-4	100	-1	0	20	0
42	-100	-59	-5	100	-4	100	-1	0	20	0
43	-100	-58	-5	100	-5	100	0	0	0	0
44	-100	-57	-6	100	-5	100	-1	0	16.666667	0
45	-100	-56	-6	100	-5	100	-1	0	16.666667	0
46	-100	-55	-6	100	-6	100	0	0	0	0
47	-100	-54	-7	100	-6	100	-1	0	14.285714	0
48	-100	-53	-7	100	-6	100	-1	0	14.285714	0
49	-100	-52	-7	100	-7	100	0	0	0	0
50	-100	-51	-8	100	-7	100	-1	0	12.5	0
51	-100	-50	-8	100	-8	100	0	0	0	0
52	-100	-49	-9	100	-8	100	-1	0	11.111111	0
53	-100	-48	-9	100	-8	100	-1	0	11.111111	0
54	-100	-47	-9	100	-9	100	0	0	0	0
55	-100	-46	-10	100	-9	100	-1	0	10	0
56	-100	-45	-10	100	-10	100	0	0	0	0
57	-100	-44	-11	100	-10	100	-1	0	9.0909091	0
58	-100	-43	-11	100	-11	100	0	0	0	0
59	-100	-42	-12	100	-11	100	-1	0	8.3333333	0
60	-100	-41	-12	100	-12	100	0	0	0	0
61	-100	-40	-13	100	-13	100	0	0	0	0
62	-100	-39	-14	100	-13	100	-1	0	7.1428571	0
63	-100	-38	-14	100	-14	100	0	0	0	0
64	-100	-37	-15	100	-14	100	-1	0	6.6666667	0
65	-100	-36	-16	100	-15	100	-1	0	6.25	0
66	-100	-35	-16	100	-16	100	0	0	0	0
67	-100	-34	-17	100	-16	100	-1	0	5.8823529	0
68	-100	-33	-18	100	-17	100	-1	0	5.5555556	0
69	-100	-32	-18	100	-18	100	0	0	0	0
70	-100	-31	-19	100	-19	100	0	0	0	0
71	-100	-30	-20	100	-19	100	-1	0	5	0
72	-100	-29	-21	100	-20	100	-1	0	4.7619048	0
73	-100	-28	-22	100	-21	100	-1	0	4.5454545	0
74	-100	-27	-23	100	-22	100	-1	0	4.3478261	0
75	-100	-26	-24	100	-23	100	-1	0	4.1666667	0
76	-100	-25	-25	100	-24	100	-1	0	4	0
77	-100	-24	-26	100	-25	100	-1	0	3.8461538	0
78	-100	-23	-27	100	-26	100	-1	0	3.7037037	0
79	-100	-22	-28	100	-27	100	-1	0	3.5714286	0

Продовження – Додаток В

Parameter			Y3 expression1		Y3 expression2		Margin		Accuracy, %	
Sequence	Y1	Y2	min	Max	min	max	of min	of max	of min	of max
80	-100	-21	-29	100	-28	100	-1	0	3.4482759	0
81	-100	-20	-30	100	-29	100	-1	0	3.3333333	0
82	-100	-19	-31	100	-31	100	0	0	0	0
83	-100	-18	-33	100	-32	100	-1	0	3.030303	0
84	-100	-17	-34	100	-33	100	-1	0	2.9411765	0
85	-100	-16	-36	100	-35	100	-1	0	2.7777778	0
86	-100	-15	-37	100	-36	100	-1	0	2.7027027	0
87	-100	-14	-39	100	-38	100	-1	0	2.5641026	0
88	-100	-13	-40	100	-40	100	0	0	0	0
89	-100	-12	-42	100	-41	100	-1	0	2.3809524	0
90	-100	-11	-44	100	-43	100	-1	0	2.2727273	0
91	-100	-10	-46	100	-45	100	-1	0	2.173913	0
92	-100	-9	-49	100	-47	100	-2	0	4.0816327	0
93	-100	-8	-51	100	-50	100	-1	0	1.9607843	0
94	-100	-7	-54	100	-52	100	-2	0	3.7037037	0
95	-100	-6	-57	100	-55	100	-2	0	3.5087719	0
96	-100	-5	-60	100	-58	100	-2	0	3.3333333	0
97	-100	-4	-64	100	-62	100	-2	0	3.125	0
98	-100	-3	-68	100	-66	100	-2	0	2.9411765	0
99	-100	-2	-73	100	-70	100	-3	0	4.109589	0
100	-100	-1	-81	100	-77	100	-4	0	4.9382716	0
101	-100	0	-100	100	-86	100	-14	0	14	0
102	-100	1	-100	100	-100	100	0	0	0	0
103	-100	2	-100	100	-100	100	0	0	0	0
104	-100	3	-100	100	-100	100	0	0	0	0
105	-100	4	-100	100	-100	100	0	0	0	0
106	-100	5	-100	100	-100	100	0	0	0	0
107	-100	6	-100	100	-100	100	0	0	0	0
108	-100	7	-100	100	-100	100	0	0	0	0
109	-100	8	-100	100	-100	100	0	0	0	0
110	-100	9	-100	100	-100	100	0	0	0	0
111	-100	10	-100	100	-100	100	0	0	0	0
112	-100	11	-100	100	-100	100	0	0	0	0
113	-100	12	-100	100	-100	100	0	0	0	0
114	-100	13	-100	100	-100	100	0	0	0	0
115	-100	14	-100	100	-100	100	0	0	0	0
116	-100	15	-100	100	-100	100	0	0	0	0
117	-100	16	-100	100	-100	100	0	0	0	0
118	-100	17	-100	100	-100	100	0	0	0	0
119	-100	18	-100	100	-100	100	0	0	0	0
120	-100	19	-100	100	-100	100	0	0	0	0

Продовження – Додаток В

Parameter			Y3 expression1		Y3 expression2		Margin		Accuracy, %	
Sequence	Y1	Y2	min	max	min	max	of min	of max	of min	of max
121	-100	20	-100	100	-100	100	0	0	0	0
122	-100	21	-100	100	-100	100	0	0	0	0
123	-100	22	-100	100	-100	100	0	0	0	0
124	-100	23	-100	100	-100	100	0	0	0	0
125	-100	24	-100	100	-100	100	0	0	0	0
126	-100	25	-100	100	-100	100	0	0	0	0
127	-100	26	-100	100	-100	100	0	0	0	0
128	-100	27	-100	100	-100	100	0	0	0	0
129	-100	28	-100	100	-100	100	0	0	0	0
130	-100	29	-100	100	-100	100	0	0	0	0
131	-100	30	-100	100	-100	100	0	0	0	0
132	-100	31	-100	100	-100	100	0	0	0	0
133	-100	32	-100	100	-100	100	0	0	0	0
134	-100	33	-100	100	-100	100	0	0	0	0
135	-100	34	-100	100	-100	100	0	0	0	0
136	-100	35	-100	100	-100	100	0	0	0	0
137	-100	36	-100	100	-100	100	0	0	0	0
138	-100	37	-100	100	-100	100	0	0	0	0
139	-100	38	-100	100	-100	100	0	0	0	0
140	-100	39	-100	100	-100	100	0	0	0	0
141	-100	40	-100	100	-100	100	0	0	0	0
142	-100	41	-100	100	-100	100	0	0	0	0
143	-100	42	-100	100	-100	100	0	0	0	0
144	-100	43	-100	100	-100	100	0	0	0	0
145	-100	44	-100	100	-100	100	0	0	0	0
146	-100	45	-100	100	-100	100	0	0	0	0
147	-100	46	-100	100	-100	100	0	0	0	0
148	-100	47	-100	100	-100	100	0	0	0	0
149	-100	48	-100	100	-100	100	0	0	0	0
150	-100	49	-100	100	-100	100	0	0	0	0
151	-100	50	-100	100	-100	100	0	0	0	0
152	-100	51	-100	100	-100	100	0	0	0	0
153	-100	52	-100	100	-100	100	0	0	0	0
154	-100	53	-100	100	-100	100	0	0	0	0
155	-100	54	-100	100	-100	100	0	0	0	0
156	-100	55	-100	100	-100	100	0	0	0	0
157	-100	56	-100	100	-100	100	0	0	0	0
158	-100	57	-100	100	-100	100	0	0	0	0
159	-100	58	-100	100	-100	100	0	0	0	0
160	-100	59	-100	100	-100	100	0	0	0	0
161	-100	60	-100	100	-100	100	0	0	0	0

Продовження – Додаток В

Parameter			Y3 expression1		Y3 expression2		Margin		Accuracy, %	
Sequence	Y1	Y2	min	Max	min	max	of min	of max	of min	of max
162	-100	61	-100	100	-100	100	0	0	0	0
163	-100	62	-100	100	-100	100	0	0	0	0
164	-100	63	-100	100	-100	100	0	0	0	0
165	-100	64	-100	100	-100	100	0	0	0	0
166	-100	65	-100	100	-100	100	0	0	0	0
167	-100	66	-100	100	-100	100	0	0	0	0
168	-100	67	-100	100	-100	100	0	0	0	0
169	-100	68	-100	100	-100	100	0	0	0	0
170	-100	69	-100	100	-100	100	0	0	0	0
171	-100	70	-100	100	-100	100	0	0	0	0
172	-100	71	-100	100	-100	100	0	0	0	0
173	-100	72	-100	100	-100	100	0	0	0	0
174	-100	73	-100	100	-100	100	0	0	0	0
175	-100	74	-100	100	-100	100	0	0	0	0
176	-100	75	-100	100	-100	100	0	0	0	0
177	-100	76	-100	100	-100	100	0	0	0	0
178	-100	77	-100	100	-100	100	0	0	0	0
179	-100	78	-100	100	-100	100	0	0	0	0
180	-100	79	-100	100	-100	100	0	0	0	0
181	-100	80	-100	100	-100	100	0	0	0	0
182	-100	81	-100	100	-100	100	0	0	0	0
183	-100	82	-100	100	-100	100	0	0	0	0
184	-100	83	-100	100	-100	100	0	0	0	0
185	-100	84	-100	100	-100	100	0	0	0	0
186	-100	85	-100	100	-100	100	0	0	0	0
187	-100	86	-100	100	-100	100	0	0	0	0
188	-100	87	-100	100	-100	100	0	0	0	0
189	-100	88	-100	100	-100	100	0	0	0	0
190	-100	89	-100	100	-100	100	0	0	0	0
191	-100	90	-100	100	-100	100	0	0	0	0
192	-100	91	-100	100	-100	100	0	0	0	0
193	-100	92	-100	100	-100	100	0	0	0	0
194	-100	93	-100	100	-100	100	0	0	0	0
195	-100	94	-100	100	-100	100	0	0	0	0
196	-100	95	-100	100	-100	100	0	0	0	0
197	-100	96	-100	100	-100	100	0	0	0	0
198	-100	97	-100	100	-100	100	0	0	0	0
199	-100	98	-100	100	-100	100	0	0	0	0
200	-100	99	-100	100	-100	100	0	0	0	0
201	-100	100	-100	100	-100	100	0	0	0	0
202	-99	-100	0	100	1	100	-1	0	100	0

Продовження – Додаток В

Parameter			Y3 expression1		Y3 expression2		Margin		Accuracy, %	
Sequence	Y1	Y2	min	max	min	max	of min	of max	of min	of max
459	-98	-44	-10	100	-10	100	0	0	0	0
460	-98	-43	-11	100	-10	100	-1	0	9.0909091	0
461	-98	-42	-11	100	-11	100	0	0	0	0
462	-98	-41	-12	100	-11	100	-1	0	8.3333333	0
463	-98	-40	-12	100	-12	100	0	0	0	0
464	-98	-39	-13	100	-12	100	-1	0	7.6923077	0
465	-98	-38	-13	100	-13	100	0	0	0	0
466	-98	-37	-14	100	-14	100	0	0	0	0
467	-98	-36	-15	100	-14	100	-1	0	6.6666667	0
468	-98	-35	-15	100	-15	100	0	0	0	0
469	-98	-34	-16	100	-16	100	0	0	0	0
470	-98	-33	-17	100	-16	100	-1	0	5.8823529	0
471	-98	-32	-18	100	-17	100	-1	0	5.5555556	0
472	-98	-31	-18	100	-18	100	0	0	0	0
473	-98	-30	-19	100	-19	100	0	0	0	0
474	-98	-29	-20	100	-19	100	-1	0	5	0
475	-98	-28	-21	100	-20	100	-1	0	4.7619048	0
476	-98	-27	-22	100	-21	100	-1	0	4.5454545	0
477	-98	-26	-23	100	-22	100	-1	0	4.3478261	0
478	-98	-25	-24	100	-23	100	-1	0	4.1666667	0
479	-98	-24	-25	100	-24	100	-1	0	4	0
480	-98	-23	-26	100	-25	100	-1	0	3.8461538	0
481	-98	-22	-27	100	-26	100	-1	0	3.7037037	0
482	-98	-21	-28	100	-27	100	-1	0	3.5714286	0
483	-98	-20	-29	100	-28	100	-1	0	3.4482759	0
484	-98	-19	-30	100	-30	100	0	0	0	0
485	-98	-18	-32	100	-31	100	-1	0	3.125	0
486	-98	-17	-33	100	-32	100	-1	0	3.030303	0
487	-98	-16	-34	100	-34	100	0	0	0	0
488	-98	-15	-36	100	-35	100	-1	0	2.7777778	0
489	-98	-14	-37	100	-37	100	0	0	0	0
490	-98	-13	-39	100	-38	100	-1	0	2.5641026	0
491	-98	-12	-41	100	-40	100	-1	0	2.4390244	0
492	-98	-11	-43	100	-42	100	-1	0	2.3255814	0
493	-98	-10	-45	100	-44	100	-1	0	2.2222222	0
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
40401	100	100	-100	-1	-100	-1	0	0	0	0

ДОДАТОК Г

Визначення ефективності графо-функціонального методу контролю функціональних параметрів систем керування рухом поїздів

Ефективність графо-функціонального методу (ММПС) синтезу моделей для випробувань СКРП доцільно обчислювати в порівнянні з найближчим аналогом, яким є МПС, запропонований в працях [56, 69, 166].

У зазначених працях у якості параметрів оптимізації МПС були взяті сумарний об'єм файлів, які складаються проектувальником моделі, вимірний у кількості умовних текстових символів (тегів) $N_{тег}$; тривалість формування моделі $t_{форм} \sim N_{тег}$ та прогнозована кількість помилок проектувальника $N_{ном} \sim N_{тег}$ щодо яких доцільно застосувати відповідний розрахунок для ММПС.

Додатковим параметром оптимізації, який є актуальним для використання як ММПС, так і МПС, є мінімальне обмеження щодо розмірності компонент суцільної графічної моделі, на базі яких формуються її блоки $N_{к_мін}$, який є критичним з точки зору можливостей розділення графічної моделі на складові та відповідно універсальності використання методу синтезу моделей для випробувань.

Крім того, виходячи з матеріалів другого розділу, в якості параметрів оптимізації ММПС слід врахувати компоненти тестового покриття, які зазначені, зокрема в таблицях 2.1, 2.2, виразах (2.1) – (2.3) тощо. Зазначені параметри, відповідно до результатів дослідження, описаного в другому розділі, зводяться до кількості функцій та технологічних ситуацій, які дозволяють охопити модель для випробувань при їх реалізації $N_{фтт}$.

Відповідним чином порівняльні критерії ефективності β між використанням ММПС і МПС формалізуються так [56, 69, 166]

$$\beta_{тег} = \frac{N_{тег_ммпс}}{N_{тег_мпс}} \rightarrow \min, \quad \beta_{форм} = \frac{t_{форм_ммпс}}{t_{форм_мпс}} \rightarrow \min, \quad \beta_{ном} = \frac{N_{ном_ммпс}}{N_{ном_мпс}} \rightarrow \min,$$

$$\beta_{к_мін} = \frac{N_{к_мін_ммпс}}{N_{к_мін_мпс}} \rightarrow \min, \quad \beta_{фтт} = \frac{N_{фтт_ммпс}}{N_{фтт_мпс}} \rightarrow \max, \quad (Г.1)$$

де підписи ММПС і МПС в індексах параметрів оптимізації визначають належність до розроблюваного методу та його найближчого аналога.

Зазначені параметри ефективності β зводяться до приведених обернених параметрів δ наступним чином

$$\begin{aligned}\delta_{тег} &= \frac{N_{тег_мпс} - N_{тег_ммпс}}{N_{тег_ммпс}} = \beta_{тег} - 1 \rightarrow \max, \\ \delta_{форм} &= \frac{t_{форм_ммпс} - t_{форм_мпс}}{t_{форм_ммпс}} = \beta_{форм} - 1 \rightarrow \max, \\ \delta_{ном} &= \frac{N_{ном_мпс} - N_{ном_ммпс}}{N_{ном_ммпс}} = \beta_{ном} - 1 \rightarrow \max, \\ \delta_{к_мін} &= \frac{N_{к_мін_мпс} - N_{к_мін_ммпс}}{N_{к_мін_ммпс}} = \beta_{к_мін} - 1 \rightarrow \max, \\ \delta_{фтп} &= \frac{N_{фтп_мпс} - N_{фтп_ммпс}}{N_{фтп_ммпс}} = \beta_{фтп} - 1 \rightarrow \min.\end{aligned}\tag{Г.2}$$

Окремої уваги заслуговує той факт, що параметри $t_{форм}$ і $N_{ном}$ є пропорційними до кількості тегів формування моделі для випробувань і визначаються наступним чином

$$\begin{aligned}t_{форм_мпс} &= K_{форм_мпс} N_{тег_мпс}, \quad N_{ном_мпс} = K_{ном_мпс} N_{тег_мпс}, \\ t_{форм_ммпс} &= K_{форм_ммпс} N_{тег_ммпс}, \quad N_{ном_ммпс} = K_{ном_ммпс} N_{тег_ммпс},\end{aligned}\tag{Г.3}$$

де $K_{форм}$ та $K_{ном}$ – відповідно коефіцієнти, які визначають тривалість операцій на заповнення одного тегу та приведену умовну кількість помилок проєктувальника моделі в розрахунку на один тег.

Таким чином, характер залежностей для критеріїв $\beta_{тег}$, $\beta_{форм}$, $\beta_{ном}$, $\delta_{тег}$, $\delta_{форм}$ і $\delta_{ном}$ у виразах (Г.1) і (Г.2) буде ідентичним, а відрізнятися вони будуть тільки градуванням відповідних шкал аргументів і значень функцій.

У свою чергу порівняльна характеристика кількості тегів $N_{тег}$ для МПС і ММПС визначається такими проміжними параметрами, як: розмірність матриці

(ПТМ для МПС, СФТМ для ММПС) та кількість аргументів/параметрів, які визначають статичні та/або динамічні властивості ОКК у складі технологічного об'єкту СКРП (вагових параметрів $\overline{m_{ij}}$ для МПС та аргументів функцій $\overline{u_i}$ функцій $f_i(\overline{u_i})$ для ММПС)

$$N_{тег_мпс} = \Phi_1(p_{ПТМ}, q_{ПТМ}, \overline{m_{ij}}), \quad N_{тег_мпс} = \Phi_2(q_{ФТМ}, \overline{u_i}), \quad (Г.4)$$

де Φ_1, Φ_2 – правила, відповідно до яких обчислюються кількість тегів при використанні МПС і ММПС;

p – кількість рядків (ребер) у складі прямокутної ПТМ;

q – кількість стовпців (вершин) у складі прямокутної ПТМ або кількість рядків/стовпців (вершин) у складі квадратної СФТМ.

При цьому співвідношення між параметрами $p_{ПТМ}$ і $q_{ПТМ}$ визначається кількістю ділянок колії з одного боку та інших ОКК з другого боку у складі технологічного об'єкту СКРП, які моделюються відповідно ребрами і вершинами в складі топологічної моделі G_Y .

За результатами обстежень схематичних планів близько 50 залізничних станцій магістрального і промислового залізничного транспорту України, серед яких станції «Транзитна» ТОВ «Вуглепромтранс», «Коксова» ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг», «Вугільна» ВАТ «МК «Запоріжсталь», «Рудна» ВАТ «МК «Запоріжсталь», «ЦОФ» ПрАТ «ДТЕК «Павлоградвугілля», «Фабрична» ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат», «Карпиші» регіональної філії «Південно-Західна залізниця», «Липів Ріг» регіональної філії «Південно-Західна залізниця», «Рогань» регіональної філії «Південна залізниця», «Чугуїв» регіональної філії «Південна залізниця», «Удачна» регіональної філії «Донецька залізниця» тощо, залежно від топології конкретної станції параметри $p_{ПТМ}$ і $q_{ПТМ}$ відрізняються одне від одного на 2-5% у відносному значенні як у більшу, так і в меншу сторону. Це дає підстави із граничною похибкою та встановленим обмеженням вважати ці параметри умовно рівними один одному

$$\begin{aligned}
 & p_{ПТМ} \approx q_{ПТМ}, \\
 \Delta_{\max}^{p/q} &= |p_{ПТМ} - q_{ПТМ}| = |q_{ПТМ} - p_{ПТМ}| = \begin{cases} 0,05q_{ПТМ}, \text{ якщо } q_{ПТМ} > p_{ПТМ}, \\ 0,05p_{ПТМ}, \text{ якщо } p_{ПТМ} > q_{ПТМ}, \end{cases} \\
 \delta_{\max}^{p/q} = 0,05 &= \begin{cases} \frac{\Delta_{\max}^{p/q}}{p_{ПТМ}} = \frac{|p_{ПТМ} - q_{ПТМ}|}{p_{ПТМ}} = \frac{|q_{ПТМ} - p_{ПТМ}|}{p_{ПТМ}}, \text{ якщо } q_{ПТМ} > p_{ПТМ}, \\ \frac{\Delta_{\max}^{p/q}}{q_{ПТМ}} = \frac{|p_{ПТМ} - q_{ПТМ}|}{q_{ПТМ}} = \frac{|q_{ПТМ} - p_{ПТМ}|}{q_{ПТМ}}, \text{ якщо } p_{ПТМ} > q_{ПТМ}, \end{cases} \quad (Г.5) \\
 \delta_{\max}^{p/q} \% &= \delta_{\max}^{p/q} \times 100\% = 5\%,
 \end{aligned}$$

де $\Delta_{\max}^{p/q}$ та $\delta_{\max}^{p/q}$ – відповідно максимальні абсолютна і відносна похибка при умовно прийнятій рівності між значеннями $p_{ПТМ}$ і $q_{ПТМ}$.

При цьому слід враховувати, що з урахуванням припущень і обмежень (Г.5) кількість рядків або стовпців СФТМ буде вдвічі більшою за відповідну кількість для ПТМ ($q_{ФТМ} = 2q_{ПТМ}$), відповідно до чого розмірність СФТМ буде вчетверо більшою ніж розмірність ПТМ ($q^2_{ФТМ} = 4q_{ПТМ} \times q_{ПТМ} = 4q^2_{ПТМ} = 4q^2_{ПТМ}$). Це безпосередньо впливає з того, що всі ОКК, які у складі графічної моделі G_Y відтворювалися ребрами, у складі графо-функціональної моделі G_{YF} відтворюються додатковими вершинами, кількість яких відповідно до умов (Г.5) подвоюється. Отже, розмірність СФТМ порівняно з ПТМ подвоюється як по вертикалі, так і по горизонталі, звідки загальна розмірність збільшується вчетверо.

При цьому також слід враховувати, що безпосереднє використання як МПС, так і ММПС проєктувальником моделі для випробувань базується на заповненні відповідних блоків матриць, а після їх прямого сумування інші складові ПТМ і СФТМ заповнюються автоматично нульовими елементами та/або блоками $|M_{енк/нлк}|$. Відповідно до цього та з урахуванням обмежень (Г.5), встановлюються такі додаткові обмеження щодо валідності ефективності ММПС за критерієм β_{mez} , які визначають його обчислення:

– ОКК, що відтворюються опорними вершини $v_i \in V_i$ у складі графічної моделі G_Y , відтворюються вершинами v_i або v_j у складі елементарних опорних дерев G_{OED} у складі графо-функціональної моделі G_{YF} технологічного об'єкту СКРП;

– відповідно до попереднього пункту та умов (Г.5) кількість блоків ФТМ буде вдвічі більшою ніж кількість блоків ПТМ для моделювання одного й того ж технологічного об'єкту СКРП;

– асиметрія щодо розмірності окремих блоків ПТМ для компонент $G_k(l)$ і ФТМ для компонент $G_{kf}(l)$ не перевищує 10% по відношенню до середнього значення даної розмірності;

– кількість компонент та блоків ПТМ $G_k(l) \leftrightarrow |M_{птм_l}|$ вдвічі менша за кількість компонент та блоків ФТМ $G_{kf}(l) \leftrightarrow |M_{фтм_l}|$.

У доповнення до обмежень та умов (Г.4) перелічені додаткові умови формалізуються таким чином

$$\forall a_h \in A / A_{оін} \leftrightarrow !\exists v_i \in V_l \subset V \subset G_Y \leftrightarrow !\exists v_i \in G_{\delta}^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij}) \subset G_{YF},$$

$$\forall G_k(l) \subset G_Y \left| \frac{[G_k(l)] - \frac{\sum_{l=1}^n [G_k(l)]}{n}}{\frac{\sum_{l=1}^n [G_k(l)]}{n}} \times 100\% = \left(\frac{[G_k(l)]}{\frac{\sum_{l=1}^n [G_k(l)]}{n}} - 1 \right) \times 100\% \leq 10\%, \right.$$

$$\forall G_{kf}(l) \subset G_{YF} \left| \frac{[G_{kf}(l)] - \frac{\sum_{l=1}^{2n} [G_{kf}(l)]}{2n}}{\frac{\sum_{l=1}^n [G_{kf}(l)]}{2n}} \times 100\% = \left(\frac{[G_{kf}(l)]}{\frac{\sum_{l=1}^n [G_{kf}(l)]}{2n}} - 1 \right) \times 100\% \leq 10\%. \right.$$

У квадратних дужках в наведених виразах позначається розмірність відповідних компонент графів, як сума потужностей множин вершин і ребер V_l і E_l , що входять до складу компоненти графу G_Y або G_{YF}

$$[G_k(l)], [G_{kf}(l)] = [V_l] + [E_l].$$

Згідно встановлених умов і припущень кількість тегів, які потребуються введення при синтезі моделі для випробувань СКРП при використанні МПС і ММПС, становитиме

$$N_{тег_мпс} = nq_{МПС}^2 \left[\overline{m_{ij}} \right],$$

$$N_{тег_ммпс} = 2n \left(q_{ММПС}^2 - q_{ММПС} + q_{ММПС} \left[\overline{u_i} \right] \right) = 2nq_{ММПС} \left(q_{ММПС} - 1 + \left[\overline{u_i} \right] \right),$$

де у квадратних дужках позначається потужність множин, визначених векторами вагових параметрів ОКК та аргументів їх функціоналів.

Узагальнено, позначивши аналогічні елементи для розрахунку кількості тегів у МПС і ММПС, як $q_{МПС} \rightarrow q_{ММПС} \rightarrow x, \left[\overline{m_{ij}} \right] \rightarrow \left[\overline{u_i} \right] \rightarrow y$ у рівняння для розрахунку критеріїв ефективності $\beta_{тег}, \delta_{тег}$, будуть являти собою відношення двох двовимірних поліномів

$$\beta_{тег} = \frac{N_{тег_мпс}}{N_{тег_ммпс}} = \frac{nx^2y}{2nx(x+y-1)} = \frac{xy}{2(x+y-1)},$$

$$\delta_{тег} = \beta_{тег}^{-1} - 1 = \frac{2(x+y-1)}{xy} - 1 = \frac{2x+2y-xy-2}{xy}. \quad (Г.6)$$

Виходячи із встановленої пропорційності (Г.3), вираз (Г.6) буде справедливим і для підрахунку критеріїв ефективності $\beta_{тег}, \beta_{форм}, \beta_{ном}, \delta_{тег}, \delta_{форм}$ і $\delta_{ном}$, зокрема через скорочення в чисельнику і знаменнику відповідних дробів коефіцієнтів пропорційності, зазначених у виразі (Г.4).

Встановивши додаткові обмеження використання МПС і ММПС щодо розмірності ПТМ/СФТМ на рівні $q_{max}=200$ та кількості вагових параметрів/аргументів функцій на рівні $\left[\overline{m_{ij}} \right]_{max} = \left[\overline{u_i} \right]_{max} = 50$, відповідно до виразів (Г.6) побудовані графічні залежності, наведені на рисунках Г.1, Г.2.

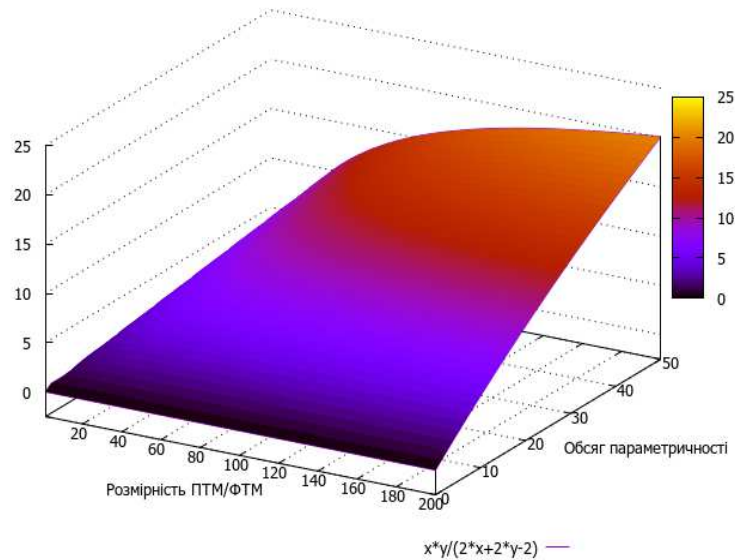


Рисунок Г.1 – 3D залежність між значеннями критеріїв ефективності $\beta_{тег}$, $\beta_{форм}$, $\beta_{ном}$ від розмірності матриць та обсягу вагових параметрів (аргументів функцій)

З наведених залежностей вбачається, перш за все, додатня монотонність функції ефективності для параметрів $\beta_{тег}$, $\beta_{форм}$, $\beta_{ном}$ та від'ємна монотонність для параметрів $\delta_{тег}$, $\delta_{форм}$, $\delta_{ном}$ при всіх значеннях x , y , які фактично відтворюють кількість ОКК СКРП та обсяг множин їх властивостей. Такий стан речей цілком узгоджується з критеріями, встановленими виразами (Г.1) і (Г.2).

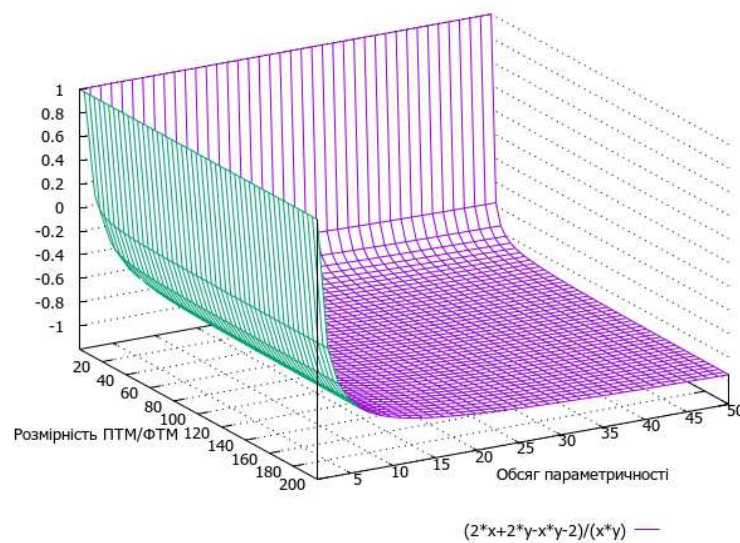


Рисунок Г.2 – 3D залежність між значеннями критеріїв ефективності $\delta_{тег}$, $\delta_{форм}$, $\delta_{ном}$ від розмірності матриць та обсягу вагових параметрів (аргументів функцій)

Крім того, з рисунка Г.1 вбачається рівність доміант змінних x і y (масштабності технологічного об'єкту СКРП та обсягу параметричності) при формуванні додатної монотонності щодо параметрів β та від'ємної монотонності стосовно значень δ , що спостерігається у відсутності асиметрії крутизни 3D графіків порівняно між змінними x і y .

Зазначена наочність доводиться симетричністю виразів (Г.5) відносно змінних x і y , а також ізоморфізмом частинних похідних функцій $z_\beta(x,y) = \beta_{тег}, \beta_{форм}, \beta_{ном}$ та $z_\delta(x,y) = \delta_{тег}, \delta_{форм}, \delta_{ном}$:

$$\begin{aligned} z_\beta \Big|_x &= \frac{\partial z_\beta}{\partial x} = \frac{\partial(xy)}{\partial x} - 2 \frac{\partial(x+y-1)}{\partial x} = y - 2, \\ z_\beta \Big|_y &= \frac{\partial z_\beta}{\partial y} = \frac{\partial(xy)}{\partial y} - 2 \frac{\partial(x+y-1)}{\partial y} = x - 2, \\ z_\delta \Big|_x &= \frac{\partial z_\delta}{\partial x} = 2 \frac{\partial\left(x + y - \frac{xy}{2} - 1\right)}{\partial x} - \frac{\partial(xy)}{\partial x} = 2(1 - y), \\ z_\delta \Big|_y &= \frac{\partial z_\delta}{\partial y} = 2 \frac{\partial\left(x + y - \frac{xy}{2} - 1\right)}{\partial y} - \frac{\partial(xy)}{\partial y} = 2(1 - x). \end{aligned}$$

Наведені вирази для часткових похідних також доводять додатню і від'ємну монотонність для функцій $z_\beta(x,y)$ та $z_\delta(x,y)$ навіть поза встановленими діапазонами значень розмірності технологічних об'єктів СКРП та обсягів параметричності ОКК, яка наочно демонструється лінійними графіками на рисунку Г.3, де функції z'_β та z'_δ умовно позначені як z , а їх аргументи – як x .

При цьому найбільший науково-практичний інтерес представляють технологічні об'єкти СКРП відносно невеликої розмірності, зокрема – залізничні станції з кількістю стрілок до 22-х, щодо яких відбувається експериментальне запровадження в дослідну експлуатацію сучасних СКРП найближчим часом. Для встановлення ефективності ММПС для таких об'єктів на рисунку Г.4 в одних осях побудовані тримірні графіки параметрів $\beta_{тег}, \beta_{форм}, \beta_{ном}$ та $\delta_{тег}, \delta_{форм}, \delta_{ном}$ в обмеженому діапазоні значень аргументів x, y .

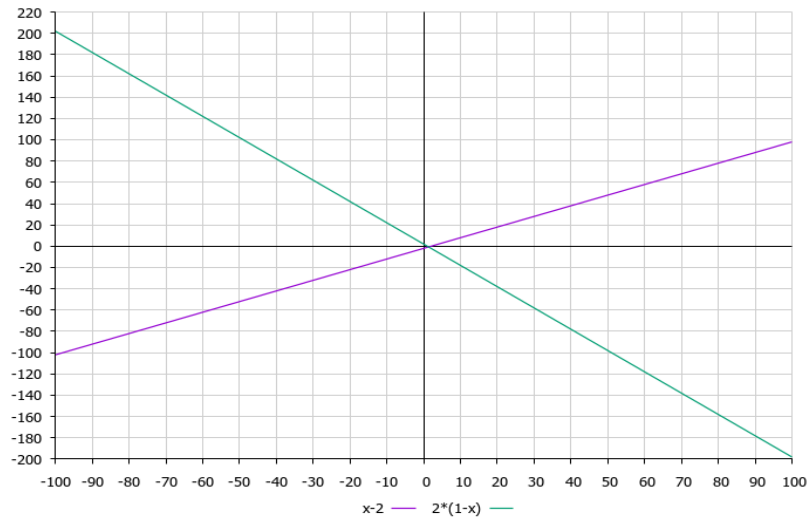


Рисунок Г.3 – Похідні функцій ефективності модифікованого методу
прямих сум синтезу моделей для випробувань СКРП

Як вбачається із наведених залежностей, для СКРП об'єктів невеликої розмірності (до яких відноситься система МПЦ станції «Карпиші») працеватрати на формування моделі для випробувань, тривалість її синтезу та прогнозована кількість помилок проектувальника при використанні ММПС можуть бути зменшені до чотирьох разів порівняно із МПС, що підтверджує ефективність використання розробленого методу за зазначеними критеріями.

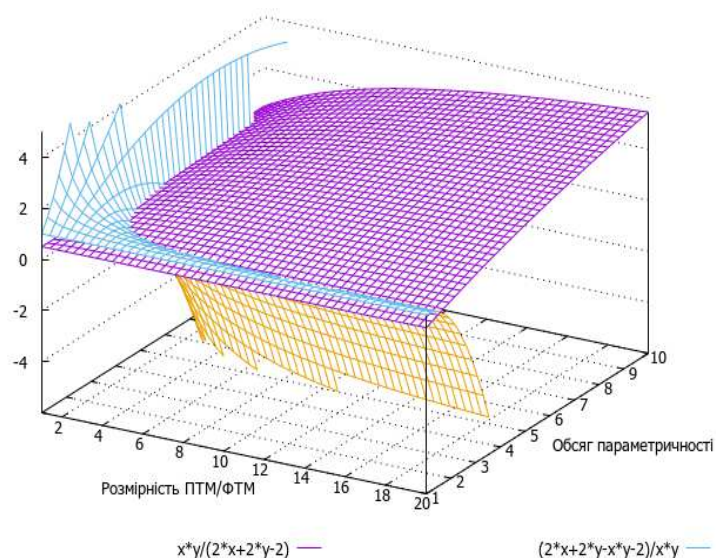


Рисунок Г.4 – 3D-залежності основних параметрів ефективності ММПС для
технологічних об'єктів СКРП малої розмірності

Стосовно критерію β_{k_min} слід зазначити, що відповідні їм параметри $N_{k_min_мпс}$ та $N_{k_min_ммпс}$ мають сталі значення і відповідно до результатів досліджень [70, 82, 105] та виразів (3.14) – (3.18) становлять

$$N_{k_min_мпс} = \text{const} = 5 \times 5, N_{k_min_ммпс} = \text{const} = 3 \times 3,$$

звідки безпосередньо випливає, що

$$\beta_{k_min} = \text{const} = 5 \times 5 / 3 \times 3 \approx 1,67, \delta_{k_min} = 1,67 - 1 = 0,67.$$

Значення $N_{k_min_ммпс} = 3 \times 3$ пояснюється при цьому розмірністю матриць спільних $|M_{\delta}^{l/l+1}|$ (3.18), що становить 2×2 , із необхідністю додавання мінімально можливої розмірності пересічних матриць $|M_{\delta}|$, рівної 1×1 .

Точна оцінка критеріїв $\beta_{фгп}$ та $\delta_{фгп}$ є край складною та вимагає деталізованих вихідних даних щодо кожного технологічного об'єкту випробувань (станції, перегону, ділянки, конкретної СКРП тощо). Тому в рамках цього дослідження виконується орієнтовна оцінка зазначених критеріїв, що базується на визначенні пропорційності пов'язаних із ними параметрів для МПС і ММПС.

З цією метою за основу береться модель оцінки тестового покриття функціональних випробувань (2.35) та її приведений вираз, що визначає її зв'язок із складовими тестового покриття СКРП.

Виходячи з властивостей МПС [56, 69, 166], а також відповідно до діаграми зв'язків, наведеної на рисунку 2.3, у складі графоаналітичної моделі СКРП, що базується на використанні ПТМ, відсутнє відтворення зв'язків між ОКК та функціями системи ($Z_{12} = 0$), звідки згідно виразу (2.23) параметр $Y_1 = Z_{12}Z_{34} = 0$. У той же час для графо-функціональної моделі, базованої на використанні СФТМ і закладеної у використання ММПС, всі зв'язки $\{Z_{ij}\}$, закладені на діаграмі на рисунку (2.3) та визначені у розділі 2, відтворюються в належному обсязі. Таким чином, обсяг тестового покриття згідно приведеної моделі при використанні МПС і ММПС буде орієнтуватися на такі вирази відношень пропорційності

$$\begin{aligned}
N_{\phi mn} &\sim \frac{1}{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3)}, \\
N_{\phi mn_mmpc} &= N_{\phi mn} \Big|_{Y_{1,2,3} \neq 0}, \\
N_{\phi mn_mnc} &= N_{\phi mn} \Big|_{Y_1=0} = \frac{1}{Y_2^2 + Y_3^2 - 2Y_2Y_3} = (Y_2 - Y_3)^{-2}.
\end{aligned}
\tag{Г.7}$$

Відповідно до виразів (Г.6), (Г.7) критерії ефективності щодо тестового покриття функціональних випробувань СКРП задаються так

$$\begin{aligned}
\beta_{\phi mn} &\sim \frac{(Y_2 - Y_3)^{-2}}{\left[Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) \right]^{-1}} = \frac{(Y_2 - Y_3)^2 + Y_1^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3)}{(Y_2 - Y_3)^2} = \\
&= 1 + \frac{Y_1^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3)}{(Y_2 - Y_3)^2} = 1 + \frac{Y_1^2 - 2Y_1Y_2 - 2Y_1Y_3 + Y_2^2 - Y_2^2}{(Y_2 - Y_3)^2} = 1 + \frac{(Y_1 - Y_2)^2 - 2Y_1Y_3 + Y_2^2}{(Y_2 - Y_3)^2}.
\end{aligned}
\tag{Г.8}$$

Виходячи з встановленої у цьому розділі взаємно-однозначної відповідності між ОКК та його функціями ($a_i \leftrightarrow f_i(u_i)$), а також характер зв'язків між компонентами тестового покриття (рисунок 2.3), значення Y_1 можна вважати приблизно рівним значенню Y_2 межах кожного технологічного об'єкта СКРП ($Y_1 \approx Y_2$). Зазначена умовна рівність приймається як додаткове обмеження моделі оцінки тестового покриття функціональних випробувань при дослідженні ефективності використання ММПС порівняно з МПС. При зазначеному припущенні та обмеженні вираз (Г.8) трансформується таким чином

$$\beta_{\phi mn} \sim 1 + \frac{(Y_2 - Y_2)^2 - 2Y_2Y_3 + Y_2^2}{(Y_2 - Y_3)^2} = 1 + \frac{Y_2(Y_2 - 2Y_3)}{(Y_2 - Y_3)^2}.
\tag{Г.9}$$

Відповідно до виразу (Г.9) на рисунку (Г.5) побудовані графічні 3D-залежності, які визначають характер мінливості параметра $\beta_{\phi mn}$ при зміні Y_2, Y_3 .

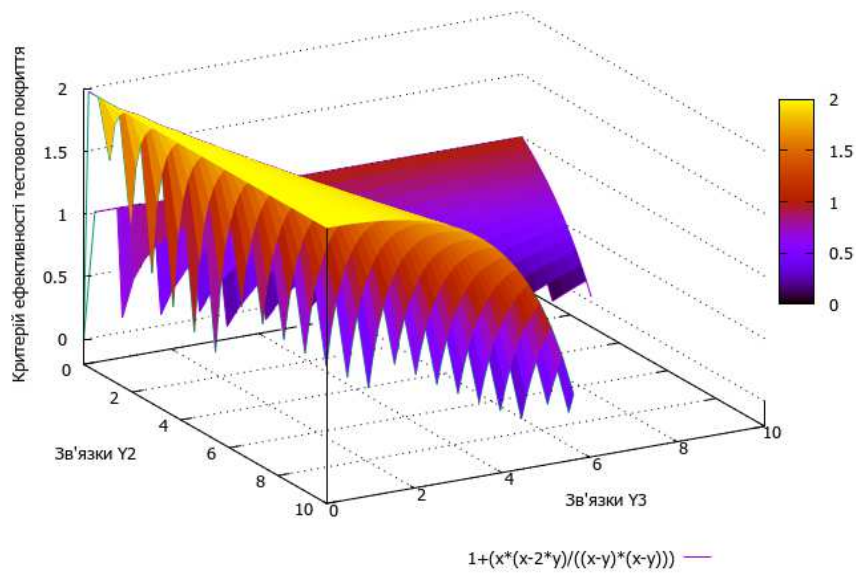


Рисунок Г.5 – 3D-графік орієнтованої (пропорційної) оцінки критерію ефективності тестового покриття $\beta_{\text{фТП}}$

Аналогічно, відповідно до нижнього виразу у формулі (Г.6) на рисунку Г.6 наведено 3D-графік для критерію $\delta_{\text{фТП}} = \beta_{\text{фТП}} - 1$.

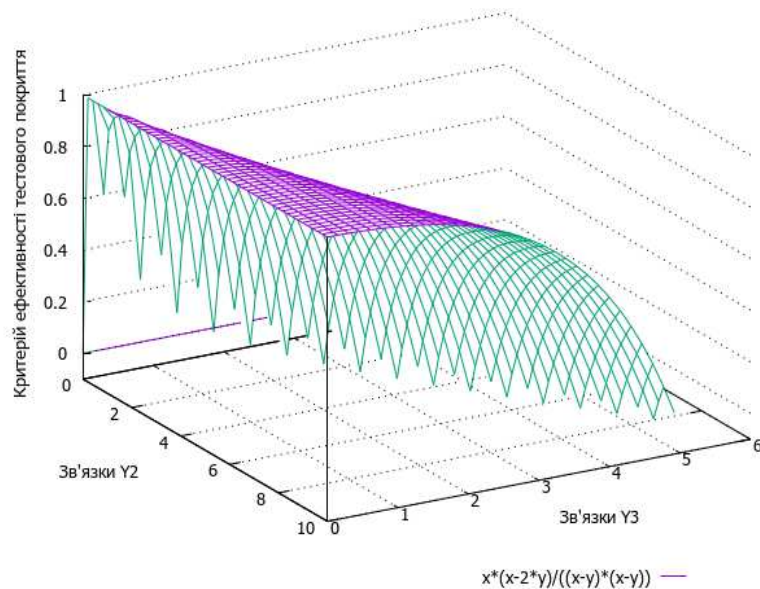


Рисунок Г.6 – 3D-графік орієнтованої (пропорційної) оцінки критерію ефективності тестового покриття $\delta_{\text{фТП}}$

З наведених графіків вбачається, що до точки нескінченного розриву $Y_2 \approx Y_3$ при збільшенні кожного з цих параметрів відбувається зменшення значень $\delta_{\text{фтп}}$ і $\beta_{\text{фтп}}$, що цілком відповідає критерію ефективності ММПС, встановленого останніми виразами в формулах (3.22) і (3.23). Відповідно до виразу (2.23) та рисунку 2.3 зазначена точка відповідає рівнозначності кількості зв'язків між усіма складовими тестового покриття функціональних випробувань СКРП, встановлених таблицями 2.1, 2.2, рисунком 2.2, формулами (2.8), (2.9) та іншими. Вона визначає граничні умови застосування ММПС та МПС з точки зору масштабності технологічних об'єктів випробувань СКРП, порушення яких визначає межі ефективності використання розроблюваного методу. Деталізація зазначених обмежень, зокрема – встановлення конкретних розмірів масштабності, потребує окремого дослідження.

При дотриманні зазначених обмежень у цілому, як вбачається з отриманих залежностей на графіках рисунків (Г.5), (Г.6), використання ММПС порівняно з МПС дозволяє досягти прямого виграшу в тестовому покритті функціональних випробувань до двох разів, а опосередкованого виграшу (співвідношення різниці проміжних параметрів двох методів) до 100%.

У цілому, відповідно до оцінки критеріїв ефективності ММПС і МПС, виконаної в цьому підрозділі, використання розробленого методу є суттєво більш ефективним, порівняно з найближчим аналогом. Це визначає доцільність проведених досліджень та перспективність використання ММПС при верифікації програмно-апаратних засобів СКРП.

ДОДАТОК Д

Модель для випробувань автоматичної локомотивної сигналізації на
контрольному пункті моторвагонного депо

З метою вдосконалення методології випробувань пристроїв автоматичної локомотивної сигналізації (АЛСН) на контрольних пунктах (КП) моторвагонного депо, яка передбачає використання графо-функціональних моделей випробувальних ділянок, попередньо виконується дефектування відповідного КП. На прикладі депо РПЧ-1 регіональної філії «Південна залізниця» процес і результати дефектування в частині технології перевірки дії відповідних пристроїв.

У результаті дослідження і дефектування технологічного, технічного й організаційного забезпечення КП АЛСН, опублікованого в працях [1, 3], при діючій схемі прокладання випробувального шлейфу КП (один шлейф на одну головну секцію з кожної сторони технологічного каналу депо) і дотриманні всіх вимог щодо ТО пристроїв АЛСН (головним чином – інструкції ЦТ-ЦШ/0072) сумарний час технологічного простою T_{np} основних виробничих ланок депо через виконання робіт по перевірці й регулюванню пристроїв АЛСН становить

$$T_{np} = t_{оч_пу-1} + t_{пер_пу1-2} + t_{оч_пу-2}, \quad (Д.1)$$

$t_{оч_пу-1}$ – час очікування після закінчення робіт з ТО АЛСН на випробувальному шлейфі біля РШ-1 (закінчення другої фази);

$t_{оч_пу-2}$ – час очікування дозволу на початок робіт після прибуття потяга секцією 09 на випробувальний шлейф РШ-2 (кінець третьої – початок четвертої фази);

$t_{пер_пу1-2}$ – час переміщення моторвагонного рухомого складу (МВРС) між шлейфами РШ-1 і РШ-2 (третьа фаза).

При цьому в формулі (Д.1) не врахований незапобіжний час простою після заходу потяга на канаву перед дозволом на роботи (кінець першої – початок другої фази). Даний простій є невід’ємним етапом технологічного процесу роботи РПЧ-1 незалежно від характеру технології обслуговування та ремонту пристроїв АЛСН на моторвагонних секціях цього депо.

В свою чергу, проміжний параметр $t_{пер_пу1-2}$ тривіально дорівнює часові руху електропотяга від початкової точки, що відповідає розміщенню секції 01 над шлейфом РШ-1 до кінцевої точки, що відповідає положенню секції 09 над шлейфом РШ-2, і визначається таким чином

$$t_{пер_пу1-2} = (L_k - L_n) / v_n = \Delta L_{кп} / v_n, \quad (Д.2)$$

де v_n – швидкість руху електропотяга при переміщенні від РШ-1 до РШ-2, м/с;

L_k – довжина технологічної канави, м;

L_n – довжина електропотяга, м;

$\Delta L_{кп}$ – довжина шляху переміщення електропотяга від РШ-1 до РШ-2.

Довжина потяга визначається кількістю зчеплених у ньому головних, моторних та причіпних вагонів

$$L_n = 2 L_{лок} + n_{ваг} L_{ваг}, \quad (Д.3)$$

де $L_{лок}$ – довжина головної секції електропотяга, м;

$L_{ваг}$ – довжина моторного або причіпного вагону електропотяга, м;

$n_{ваг}$ – кількість моторних та причіпних вагонів у електропотязі.

Кількість причіпних вагонів у моторвагонному електропотязі поза дачним сезоном визначається його повною кількістю вагонів у чотири, шість або вісім штук, включаючи головні

$$n_{ваг} = m_n - 2, \quad (Д.4)$$

де m_n – загальна кількість головних, моторних та причіпних вагонів у електропотязі поза дачним сезоном: $m_n = 8, 6$ або 4 .

Параметр $t_{оч_пу-1}$ залежить від способу переміщення моторвагонного рухомого складу повздовж канави після першої зупинки секції 01 над випробувальним шлейфом шафи РШ-1. Таких способів є два:

- електропотяга переміщуватиметься повздовж канави за рахунок сили власних електродвигунів від енергії, наданої контактним проводом (своїм ходом);
- електропотяг переміщуватиметься повздовж канави за рахунок тяги або товкання його окремим маневровим локомотивом ЧМЕ-3, що задіяний для виконання маневрової роботи на території РПЧ-1.

При цьому слід враховувати, що перший спосіб передбачає підключення високої напруги до контактного проводу після виконання першого етапу робіт на секції 01 із необхідною витримкою часу після сповіщення персоналу по гучномовному зв'язку, а також організації витримки часу перед рухом потяга вже після підключення високої напруги до контактного проводу. В той же час другий спосіб визначає необхідність тільки витримки часу перед початком руху потяга, оскільки напруга до контактного проводу при ньому не підключається. Відповідно параметр $t_{оч_{пу-1}}$ у загальному випадку визначається так

$$t_{оч_{пу-1}} = t_{оч_{пу-1}} = \begin{cases} t_{з_{кп}} + t_{з_{п}}, & \text{якщо МВРС рухається "своїм ходом",} \\ t_{з_{п}}, & \text{якщо МВРС тягне або підштовхує локомотив,} \end{cases} \quad (Д.5)$$

де $t_{з_{кп}}$ – час затримки на виконання робіт після підключення високої напруги до контактного проводу над технологічною канавою;

$t_{з_{п}}$ – час затримки на початок руху потяга після попередження.

Отже, поєднуючи формули (Д.1) – (Д.5), користуючись комутативним законом арифметики (від перестановки місць доданків сума не змінюється), визначається сумарний час вимушеного простою в виконанні робіт на технологічній канаві для кожного заїхавшого туди електропотяга

$$T_{пр} = v_n \times \{L_k - [2 L_{лок} + (m_n - 2) L_{ваз}]\} + t_{оч_{пу-2}} + \begin{cases} t_{з_{кп}} + t_{з_{п}} \\ t_{з_{п}} \end{cases}. \quad (Д.6)$$

На підставі здійснених за формулою (Д.5) розрахунків формується таблиця Д.1 значень вимушеного простою в виконанні робіт із ТО та ПР електропотягів на технологічних канавах.

Таблиця Д.1 – Розрахунок часу простою в виконанні робіт з ТО та ПР на технологічних канавах через забезпечення функціонування КП АЛСН

Довжина потяга $L_{п, м}$	$\Delta L_{кп, м}$	Кількість вагонів		Швидкість руху $v_{п, м/хв.}$	Спосіб руху*	Тривалість простою, хв.			
		$n_{ваг}$	$m_{п}$			$t_{пер_рш1-2}$	$t_{оч_рш-1}$	$t_{оч_рш-2}$	$T_{пр}$
156,8	43,2	8	6	84	1	$\approx 0,5$	30	15	45,5
					2	$\approx 0,5$	15	15	30,5
117,6	82,4	6	4	84	1	$\approx 1,0$	30	15	46,0
					2	$\approx 1,0$	15	15	31,0
78,4	121,6	4	2	84	1	$\approx 1,5$	30	15	46,5
					2	$\approx 1,5$	15	15	31,5

* 1 – своїм ходом; 2 – за допомогою маневрового локомотиву

При цьому в середньому за робочу зміну РПЧ-1 процедури ТО-3 та ПР-1 в середньому на двох технологічних канавах проходять 3 – 5 електропотягів. З урахуванням штатного розпису цеху АЛСН-ПРЗ, сумарний час простою слід враховувати як додавання часу простою в виконанні робіт для кожного окремо взятого електропотяга, що проходить процедури ТО і ПР протягом робочої зміни. Таким чином, загальний сумарний час простою для випадків, коли ТО і ПР в депо проходять за зміну від трьох до п'яти електропотягів, визначається таблицею Д.2.

Таблиця Д.2 – Розрахунок сумарного та середнього сумарного часу простою в роботі виробничих ділянок РПЧ-1 через забезпечення функціонування КП АЛСН

Кількість вагонів, $n_{ваг}$	Спосіб руху	Тривалість простою для одного потяга	Сумарна тривалість простою для кількості потягів, що проходять ТО і ПР протягом зміни РПЧ-1, хв			Середнє значення, хв.
			3	4	5	
8	1	45,5	136,5	182	227,5	182
	2	30,5	91,5	122	152,5	122
6	1	46,0	138	184	230	184
	2	31,0	93	124	155	124
4	1	46,5	139,5	186	232,5	186
	2	31,5	94,5	126	157,5	126
Середнє значення простою для всіх наборів електропотягів для двох способів переміщення, хв.						154

Узагальнено вплив ТО або ПР пристроїв АЛСН на простій основних ланок РПЧ-1 демонструються ескізною часовою діаграмою на рисунку Д.1.

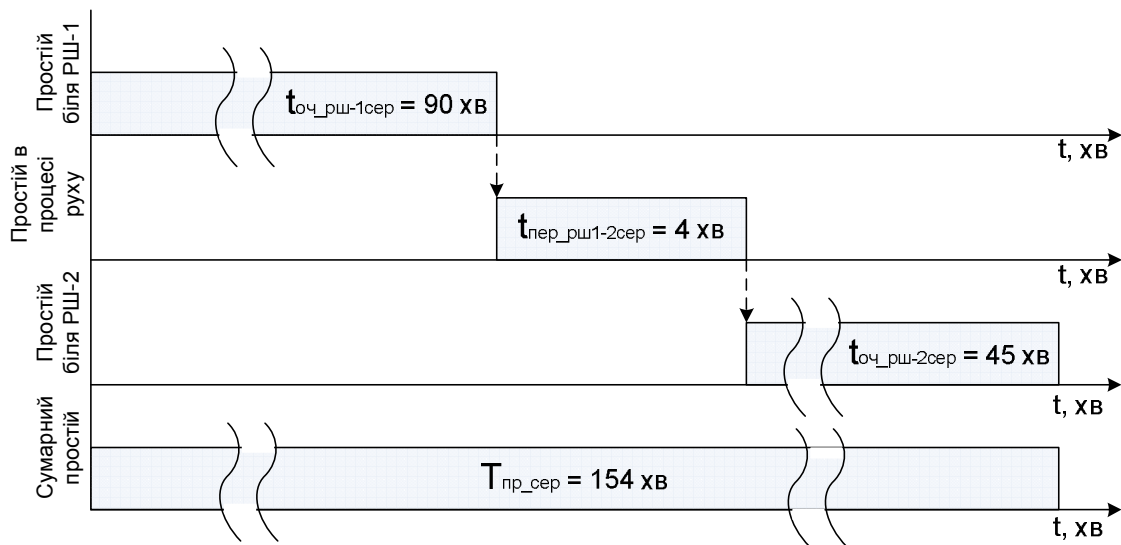


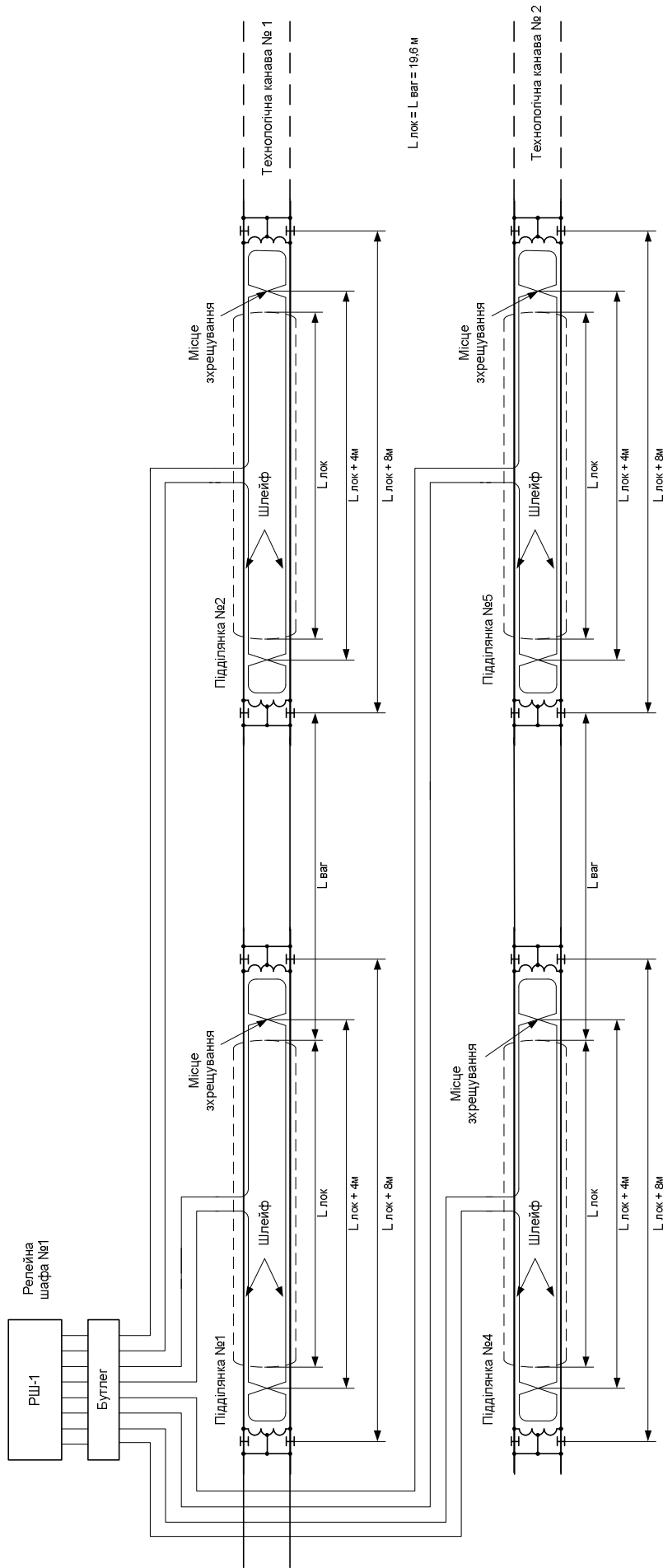
Рисунок Д.1 – Часова діаграма середнього простою виробничих ланок РПЧ-1 через забезпечення роботи КП АЛСН

Виходячи з наведеного дефектування, необхідно вжиття технічних заходів, які забезпечили б можливість перевірки дії пристроїв АЛСН та інших робіт з ТО на КП АЛСН без проміжних переміщень рухомого складу повздовж канами.

Виконати цю задачу необхідно без порушення діючих технічних норм та інструкції ЦТ-ЦШ-0072, які обмежують довжину шлейфа відповідно до довжини головної моторвагонної електросекції ($L_{\text{лок}} + 8$ м). Тому прокладання довгого шлейфу повздовж канами таким чином, щоб він просто охоплював головну секцію короткого електропотяга з боку РШ-1 неможливо. До того ж такий підхід не вирішує проблем заземлень на рейки в зоні технологічних канами.

Вирішенням проблеми є організація дискретизованої випробувальної ділянки, що має складатися із декількох підділянок із окремими шлейфами, прокладеними під головні секції електропотягів із різною кількістю вагонів. Така дискретизована ділянка має враховувати ізоляцію частин технологічних канами, на яких розташовуватимуться головні секції МВРС (рисунок Д.2).

З урахуванням розподілу кількості секцій в електропотягах РПЧ-1 (рисунок Д.3), середній простій після модернізації КП АЛСН становитиме



Технічні характеристики виробувальної ділянки:

- тип кабелю – КРПТНЗх16;
- довжина окремих виробувальних підділянок – 27,6 м;
- довжина секцій електропотятів – 19,6 м;
- кількість виробувальних підділянок - 6

Рисунок Д.2 – Модернізована схема прокладання шлейфу в східній частині виробувальної ділянки КП АЛСН РПЧ-1

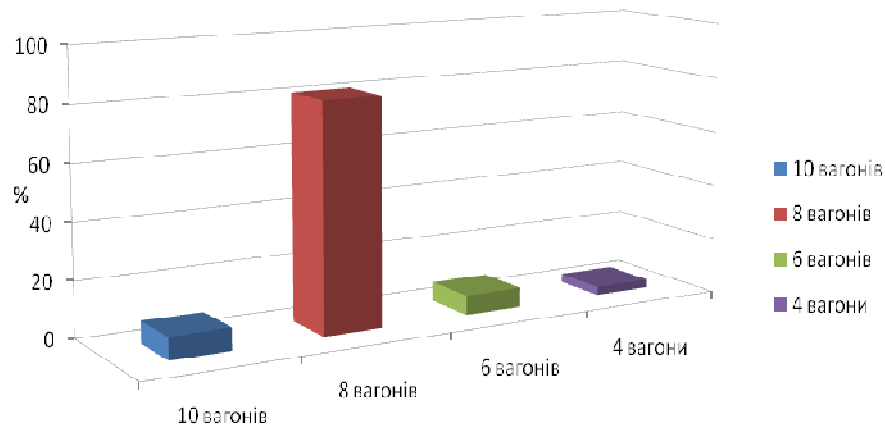


Рисунок Д.3 – Розподіл електропоїздів РПЧ-1 за кількістю вагонів протягом експлуатації за останні п'ять років

$$T_{np_сер_прив} = a_i \sum_{i=1}^4 T_{np_сер_ni} = a_1 T_{np_сер_10} + a_2 T_{np_сер_8} + a_3 T_{np_сер_6} + a_4 T_{np_сер_4}, \quad (Д.7)$$

де $T_{np_сер_прив}$ – приведені значення середнього простою технологічних ланок РПЧ-1 через забезпечення роботи КП АЛСН, підраховані з урахуванням статистики експлуатації різнокількісновагонних електропотягів;

a_i – коефіцієнт, що враховує вклад в експлуатацію електропоїздів з певною кількістю вагонів ($i = 1, 2, 3, 4$);

$T_{np_сер_ni}$ – середня тривалість простою в роботі ланок РПЧ-1 для забезпечення перевірки на КП АЛСН з кількістю вагонів n_i ($n_i = 10, 8, 6, 4$).

Коефіцієнти a_i є переведеними в десяткові дроби значеннями процентного вкладу електропотягів з різною кількістю вагонів n_i в процес експлуатації. При цьому має виконуватися співвідношення

$$\sum_{i=1}^4 a_i = 1. \quad (Д.8)$$

Виконуючи підрахунок за формулою (Д.7), враховуючи тотожність (Д.8), маючи на увазі, що для десятивагонних електропотягів простій технологічних ланок відсутній ($T_{np_сер_10} = 0$ хв), беручі до уваги дані із таблиці Д.2, отримаємо

$$T_{np_сер_прив1} = 0,09 \times 0 + 0,81 \times \frac{182 + 122}{2} + 0,07 \times \frac{184 + 124}{2} + 0,03 \times \frac{186 + 126}{2} = 0 + 123,12 + 10,78 + 4,68 = 138,58 \text{ хв} \approx 2,3 \text{ год} = 2 \text{ год} + 20 \text{ хв},$$

$$0,09 + 0,81 + 0,07 + 0,03 = 1.$$

Під параметром $T_{np_сер_прив1}$ розуміється приведені значення середнього простою виробничих ланок РПЧ-1 для попередньої технології ТО та ПР пристроїв АЛСН на КП.

Отже, при попередній технології ТО та ПР пристроїв АЛСН на КП (за умови її добросовісного виконання) приведений час простою основних технологічних ланок становить 2 години 20 хвилин.

Для визначення скорочення простою при переукладанні випробувальних шлейфів на КП необхідно підрахувати значення $T_{np_сер_прив2}$ простою, що спостерігається в умовах, коли восьмивагонні електротяги не потребують проміжного переміщення повздовж технологічних каналів. Цей параметр також підраховується за формулою (Д.7) але з урахуванням, що простій для восьмивагонних електротягів буде відсутній, так само, як і для десятивагонних електротягів ($T_{np_сер_8} = T_{np_сер_10} = 0$ хв)

$$T_{np_сер_прив2} = 0,09 \times 0 + 0,81 \times 0 + 0,07 \times \frac{184 + 124}{2} + 0,03 \times \frac{186 + 126}{2} =$$

$$= 0 + 0 + 10,78 + 4,68 = 15,46 \text{ хв} \approx 0,26 \text{ год} \approx 0 \text{ год} + 16 \text{ хв}.$$

Досягнуте абсолютне скорочення простою $\Delta T_{np_сер_прив}$ за рахунок модернізації способу прокладання випробувальних шлейфів визначається різницею між відповідними простоями до і після модернізації випробувальних ділянок КП АЛСН

$$\Delta T_{np_сер_прив} = T_{np_сер_прив1} - T_{np_сер_прив2}. \quad (\text{Д.9})$$

Відносне скорочення простою в роботі основних виробничих ланок РПЧ-1 через забезпечення роботи КП АЛСН $\delta T_{np_сер_прив}$ визначається як процентне відношення абсолютного скорочення простою до простою при попередній технології ТО та ПР пристроїв АЛСН на КП

$$\begin{aligned} \delta T_{np_cep_priv} &= \frac{\Delta T_{np_cep_priv}}{T_{np_cep_priv1}} \times 100\% = \frac{T_{np_cep_priv1} - T_{np_cep_priv2}}{T_{np_cep_priv1}} \times 100\% = \\ &= \left(1 - \frac{T_{np_cep_priv2}}{T_{np_cep_priv1}} \right) \times 100\%. \end{aligned} \quad (Д.10)$$

Виконуючи підрахунки за формулами (Д.9) і (Д.10) отримуємо наступні значення абсолютного та відносного скорочення роботи ланок РПЧ-1

$$\Delta T_{np_cep_priv} = 138,58 - 15,46 = 123,06 \text{ хв} \approx 2 \text{ год} + 00 \text{ хв},$$

$$\delta T_{np_cep_priv} = \frac{123,06}{138,58} \times 100\% \approx 88,8\%.$$

Наглядно досягнуте скорочення простою ілюструється стовпчиковою діаграмою на рисунку Д.4. Відповідно до консультацій із фахівцями лінійних підрозділів служб НРП, Т та Ш досягнутий результат є доволі суттєвим, оскільки він дозволить реалізувати повноцінний процес ТО та ПР пристроїв АЛСН на бортах електрорухомого МВРС з мінімальною корекцією базового технологічного циклу роботи депо, вносячи вимушений простій у роботі його основних ланок всього в 16 хвилин на зміну.

Отже, є сенс здійснювати подальші проектно-вишукувальні роботи із технічного забезпечення функціонування такого шлейфу, а подальша програмно-апаратна модернізація обладнання КП АЛСН має дозволити здійснювати оперативну реконфігурацію випробувальної ділянки АЛСН на базі графо-функціонального моделювання.

Окремою складовою модернізації випробувальних ділянок АЛСН слід передбачити впровадження сучасних інформаційних технологій, які б забезпечували дистанційне керування процесом перевірки пристроїв АЛСН на ділянках, а також реєстрацію їх результатів (хоча б часткову). Відповідна структура модернізованої ділянки, забезпечена засобами інформатизації, автоматизації та телекерування, наведена на рисунку Д.4.

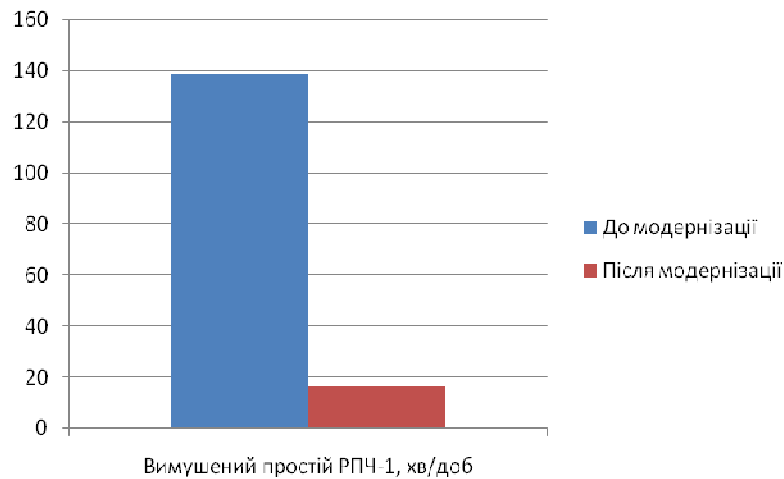


Рисунок Д.4 – Результат модернізації прокладання випробувальних шлейфів КП АЛСН у частині скорочення простою в роботі виробничих ланок РПЧ-1

Додаткова інформатизація забезпечується модулями виведення, що підключені паралельно ряду кнопок і рукояток пульт-штатива РШ, і модулями введення дискретної та аналогової інформації, що підключаються в електричні кола РШ для контролю його дискретних і неперервних параметрів – стану реле, кодів, що подаються у шлейф, контрольної напруги на елементах, струму в шлейфі тощо.

Через інтерфейсну лінію зазначені модулі введення-виведення підключаються до автоматизованого робочого місця (АРМ) чергового електромеханіка КП АЛСН (ШНД), який за допомогою АРМ виконує дистанційні керування та контроль технічних пристроїв РШ. Модель для випробувань пристроїв АЛСН на КП, що передбачає використання наведеного інформаційного комплексу (зокрема АРМ ШНД), базується на формуванні функціонального графу випробувальної ділянки (рисунки Д.2, Д.5) G_{YF} .

У цьому графі функціонали вершин забезпечують відтворення статичних і динамічних характеристик випробувальних шлейфів у складі підділянок (ПД) та їх РШ згідно наведених вище взаємозалежностей (рисунок Д.6).

Враховуючи незначну розмірність графо-функціональної моделі випробувальної ділянки ($[V] = 9$, $[E] = 8$) та відповідну розмірність повної СФТМ 9×9 , немає сенсу використовувати ММПС для синтезу моделі для випробувань пристроїв АЛСН у депо.

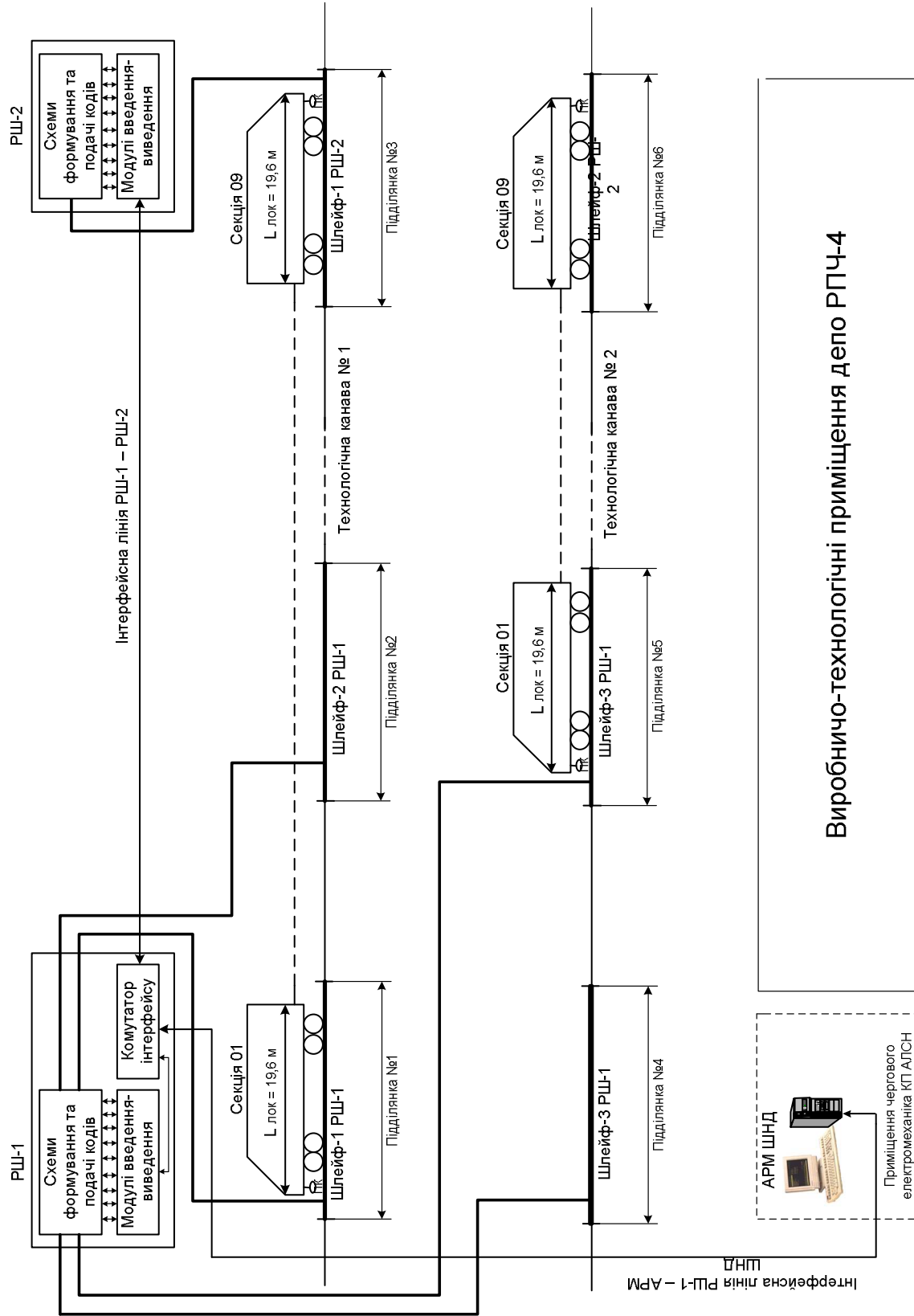


Рисунок Д.5 – Структурна схема інформаційно-керуючої мережі КП АЛСН депо РПЧ-1

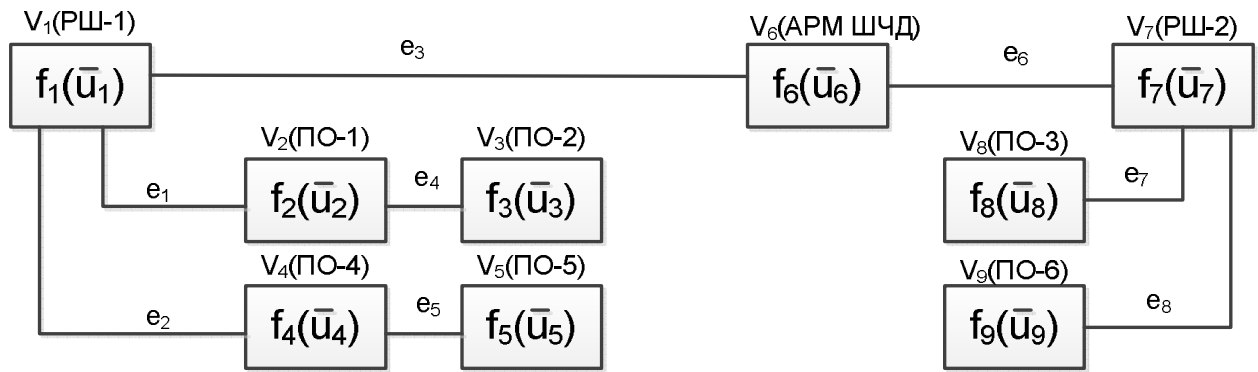


Рисунок Д.6 – Графо-функціональна модель випробувальної ділянки
КП АЛСН моторвагонного депо

Натомість достатньо сформулювати та використати для графу G_{YF} повної суцільної СФТМ

$$\begin{aligned}
 & \left| M_{СФТМ}^{КП_АЛСН} \right| = \\
 & = \begin{vmatrix}
 f_1(\bar{u}_1) & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & f_2(\bar{u}_2) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & f_3(\bar{u}_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & f_4(\bar{u}_4) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & f_5(\bar{u}_5) & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_6(\bar{u}_6) & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & f_7(\bar{u}_7) & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & f_8(\bar{u}_8) & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & f_9(\bar{u}_9)
 \end{vmatrix}.
 \end{aligned}$$

Вкладені функції вершин $f_i(u_i)$ визначаються окремо і зводяться до формувань логічних умов формування кодів АЛСН, визначення та конфігурація яких потребує окремого дослідження.

ДОДАТОК Е

Розрахунок економічної ефективності використання результатів дисертації на етапі експлуатації систем керування рухом поїздів

Методика розрахунку економічної ефективності заходів із впровадження методів і моделей контролю функціональних параметрів СКРП щодо підвищення їх експлуатаційної готовності базується на працях [60, 201].

Ефективність застосування результатів дисертації визначається ступенем зміни показників готовності пристроїв СКРП при впровадженні нових методів і моделей контролю їх функціональних параметрів.

Втрати у роботі технічного персоналу на усунення відмов є пропорційними до часу відновлення T_B . Розрахунок ефективності заходів щодо підвищення ремонтпридатності пристроїв, що забезпечують зменшення часу відновлення, відбувається на основі фактично отриманого або прогнозованого зменшення часу відновлення пристроїв [60, 201].

Відмови пристроїв СКРП знижують дільничну швидкість руху поїздів, пропускну та провізну спроможність ділянок залізниці. Визначення ефективності заходу вимагає знання збитку в поїзній роботі з урахуванням тривалості непродуктивного простою поїздів [60, 201].

Збитки у поїзній роботі при відмовах пристроїв СКРП містять складову, пов'язану з наданням додаткових технологічних вікон на операції, пов'язані з усуненням наслідків відмов, а також складову, пов'язану з ускладнення та збільшенням тривалості операцій із використання засобів СКРП у допоміжних режимах (що узагальнено розглянуті в розділі 1) [60, 201].

Для переведення збитку в поїзній роботі в грошовий вираз з довідкових даних по оцінці показників експлуатаційної роботи залізниці беруться середні наведені витрати на одну поїздо-годину простою вантажного $V_{ВанП}^{\Pi}$ та пасажирського $V_{ПасП}^{\Pi}$ поїзда, а також при одній зупинці вантажного $V_{ВанЗ}^{\Pi}$ і пасажирського $V_{ПасЗ}^{\Pi}$ поїзда. За отриманим даними обчислюється ціна простою пристроїв СКРП у поїзній роботі з наведених витрат [60, 201]

$$\mathcal{C}_{\text{ПП}} = B_{\text{ВанП}}^{\text{П}} \times T_{\text{Ван}} + B_{\text{ВанЗ}}^{\text{П}} \times N_{\text{Ван}} + B_{\text{ПасП}}^{\text{П}} \times T_{\text{Пас}} + B_{\text{ПасЗ}}^{\text{П}} \times N_{\text{Пас}}, \quad (\text{E.1})$$

де $T_{\text{Ван}}$ і $T_{\text{Пас}}$ – відповідно тривалість простою вантажних та пасажирських потягів за розрахунковий період;

$N_{\text{Ван}}$ і $N_{\text{Пас}}$ – відповідно кількість зупинок вантажних та пасажирських потягів за розрахунковий період.

Зменшення збитку в поїзній роботі при підвищенні експлуатаційної готовності СКРП за розрахунковий період становить [60, 201]

$$\Delta Z_{\text{П}} = \Delta \mathcal{C}_{\text{П}} = (\mathcal{C}_{\text{П1}} - \mathcal{C}_{\text{П2}}), \quad (\text{E.2})$$

де $\mathcal{C}_{\text{П1}}$, $\mathcal{C}_{\text{П2}}$ – складова ціни простою, обумовлена збитком у поїзній роботі відповідно до й після впровадження заходу.

У свою чергу підвищення експлуатаційної готовності СКРП відповідно до результатів досліджень, проведених у розділі 4, сприяє скороченню непродуктивного простою поїздів, у той час як кількість зупинок поїздів залежить від безвідмовності СКРП, яка в цій роботі не досліджувалася. Тому подальші розрахунки економічної ефективності проводяться з урахуванням таких умов та обмежень [60, 201]:

– безвідмовність пристроїв СКРП при запровадженні заходів із підвищення їх експлуатаційної готовності залишається незмінною;

– тривалість непродуктивного простою вантажних і пасажирських потягів, викликана відмовою пристроїв СКРП, приймається однаковою ($T_{\text{Ван}} = T_{\text{Пас}}$);

– інтенсивність руху поїздів на ділянці залізниці є такою, що міжпоїзний інтервал робить позаграфікові зупинки поїздів незалежними подіями (тобто наслідки відмови усуваються до часу проходження чергового поїзда).

Поєднуючи формули (E.1) і (E.2) з урахуванням встановлених умов і обмежень, формується вираз для визначення зменшення збитку в поїзній роботі

$$\Delta Z_{\text{П}} = (B_{\text{ВанП}} + B_{\text{ПасП}}) \times T_{\text{П}} \times k_{\text{П}}, \quad (\text{E.3})$$

де $T_{\text{П}}$ – тривалість непродуктивного простою пасажирських і вантажних потягів;

k_{II} – коефіцієнт, який визначає скорочення непродуктивного простою поїздів при запровадженні заходів із підвищення експлуатаційної готовності СКРП.

Підвищення експлуатаційної готовності пристроїв СКРП приводить до зменшення експлуатаційних витрат на усунення відмов. Основні складові цих витрат $C_{УВ}$: $C_{УВ}^3$ – зарплата працівників, експлуатаційного штату; $C_{УВ}^E$ – вартість елементів, що замінені при ремонті і $C_{УВ}^{TB}$ – транспортні витрати на доставку обслуговуючого персоналу й необхідного обладнання та приладів до місця відмови [60, 201].

Середня вартість елементів, що замінені при усуненні відмов, на скорочення числа або тривалості яких спрямоване застосування розроблених методів, визначається по фактичних витратах. Додаткові витрати по зарплаті залежать від середньої тривалості ремонту T_p , кількості виконавців, що виконують ремонтні роботи, і розмірів середньої годинної зарплати кожного виконавця $Зп$ [60, 201]

$$C_{Зп}^P = T_p (Зп_1 + Зп_2 + \dots + Зп_k). \quad (E.4)$$

У середній зарплаті виконавців ураховуються всі нарахування: районне виправлення до зарплати, середній відсоток нарахування премій, зарплата керівних, інженерно-технічних працівників і допоміжного персоналу тощо [60, 201].

Середня вартість транспортних витрат залежить від виду використовуваного транспорту й місця відмови. При орієнтовних розрахунках суму витрат на усунення відмов по зарплаті й транспортних витратах можна обчислювати по формулі [60, 201]

$$C_{УВ}^{Зп} + C_{УВ}^{TB} = \frac{K \times V_{ТО} \times T_p}{169}, \quad (E.5)$$

де $V_{ТО}$ – фактичні витрати підрозділу з ТО та ремонту на місяць на одну технічну одиницю оснащеності пристроями СКРП.

Якщо до усунення відмови залучаються працівники інших служб, враховуються і ці витрати [60, 201].

Зменшення витрат на усунення відмов $\Delta C_{УВ}$ в результаті впровадження заходу знаходять по відповідним формулам (Е.2) – (Е.5), де замість ціни відмови в поїзній роботі $C_{П}$ беруть знайдене значення витрат на усунення відмови $C_{УВ}$ [60, 201].

В загальному випадку впровадження засобів контролю функціональних параметрів може привести як до зменшення, так і до збільшення витрат на ТО пристроїв СКРП. Зміна річних трудовитрат на ТО пристроїв СКРП у частині змінних витрат по всім причетним до профілактичних витрат категоріям працівників визначається по відповідних нормах часу на виконання робіт ТО з урахуванням періодичного виконання робіт до й після впровадження заходу. При цьому знайдений по нормах оперативний час роботи ТО збільшується для перегінних пристроїв в 1,24 рази та для станційних пристроїв 1,226 рази, щоб урахувати час на обслуговування робочого місця, підготовчо-заклучні дії та регламентовані перерви [60, 201].

За отриманим значенням різниці трудовитрат $\Delta T_{ТО}$ по кожній категорії безпосередніх виконавців, що виконують профілактичні роботи, визначають зміну витрат по їхній середній зарплаті [60, 201]

$$\Delta C_{Зп}^{ТО} = \Delta T_{ТО1} \times Зп_1 + \Delta T_{ТО2} \times Зп_2 + \dots + \Delta T_{ТОm} \times Зп_m, \quad (E.6)$$

де m – число виконавців, у яких змінюються витрати часу на ТО пристроїв СКРП після впровадження засобів контролю функціональних параметрів.

Впровадження засобів контролю функціональних параметрів в загальному випадку може привести до зміни транспортних витрат $\Delta C_{ТВ}^{ТО}$ і витрат на запасні матеріали та обладнання $\Delta C_{ЗМП}^{ТО}$. Тоді повна зміна витрат на ТО становитиме [60, 201]

$$\Delta C^{ТО} = \Delta C_{Зп}^{ТО} + \Delta C_{ТВ}^{ТО} + \Delta C_{ЗМП}^{ТО}. \quad (E.7)$$

При розрахунках по формулі (Е.7) необхідно враховувати знаки додатків залежно від того, збільшуються або зменшуються витрати по відповідній статті

витрат. Економічну доцільність впровадження заходу в конкретних умовах ділянки залізниці можна визначити обчисленням середньорічного економічного ефекту [60, 201]

$$E = (\Delta C_{\Pi} + \Delta C_{\text{yB}} + \Delta C_{\text{TO}} - E_{\text{H}} \times K_{\text{B}}) \times O_{\text{B}}, \quad (\text{E.8})$$

де $E_{\text{H}} = 0,15$ – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень по новій техніці;

K_{B} – додаткові капітальні витрати на впровадження засобів контролю;

O_{B} – обсяг впровадження засобів контролю.

Значення ΔC_{TO} береться негативним, якщо із впровадженням заходу витрати на ТО пристроїв СКРП зростають [60, 201]. Відповідно до нормативів АТ «Укрзалізниця», визначених вказівкою від 16.05.2018 р. № ЦФЕ-14/538, середні збитки у поїзній роботі при різних видах тяги складають: $V_{\text{ВанП}}^{\Pi} = 963,78$ грн., $V_{\text{ПасП}}^{\Pi} = 3954,64$ грн., $V_{\text{ВанЗ}}^{\Pi} = 310,49$ грн., $V_{\text{ПасЗ}}^{\Pi} = 184,76$ грн.

Відповідно до результатів дослідження за розділом запровадження заходів із підвищення експлуатаційної готовності СКРП дозволяє скоротити непродуктивний простій поїздів до 16%. При середніх значеннях масштабності та складності технологічного об'єкту СКРП скорочення непродуктивного простою при цьому досягає 8%. Відповідно до цього коефіцієнт скорочення непродуктивного простою становитиме $k_{\Pi} = 0,08$.

Тоді при вихідному значенні річної тривалості непродуктивного простою $T_{\Pi} = 52$ год. (1 година непродуктивного простою на тиждень) відповідно до формули (E.3) значення ΔZ_{Π} становить 20460,63 грн.

При вихідних витратах дистанції сигналізації та зв'язку на одну технічну одиницю протягом місяця 8568,00 грн. по формулі (E.5) зменшення витрат на усунення відмов (на усунення відмов виїжджають 2 працівники, вартістю замінних при ремонті елементів зневажаємо, час відновлення з підрозділу 1.3 розділу 1) складатиме 308,25 грн.

Наведені трудові витрати в рік, розраховані за Інструкцією ЦШ/0060 і типовим нормам часу, зменшуються з впровадженням автоматизованих засобів

контролю функціональних параметрів, для ШНС, ШН, ШЦМ в середньому на 23,5% [60, 201]. В такому випадку зменшення витрат по основній зарплаті в рік по одній станції з обліком середнього поправочного коефіцієнта по температурній зоні й тарифних ставках становить 40880,97 грн. на рік.

Капітальні вкладення K_B для організації контролю функціональних параметрів СКРП складаються з придбання таких матеріалів: випробувального стенду в комплекті, фізичних макетів ОКК, операційної системи та спеціалізованого програмного забезпечення [60, 201].

Для обсягу впровадження на одну станцію з кількістю 25 стрілок (одна технічна одиниця) середньорічний економічний ефект без врахування ціни відмови пристроїв у поїзній роботі по формулі (Е.8) [60, 201] складатиме 47249,84 грн. При річних обсягах технічного переоснащення ЕЦ шляхом запровадження систем МПЦ на семи усереднених залізничних станціях (0,5% від їх загальної кількості, що відповідає стратегічним планам департаменту ЦШ) річний економічний ефект від запровадження запропонованого підходу до контролю функціональних параметрів СКРП становитиме 330748,88 грн.

ДОДАТОК Ж

Список публікацій здобувачки за темою дисертації та
відомості про апробацію результатів дисертації

Основні наукові праці:

Наукові праці у фахових виданнях України:

1. Каменєв О.Ю., Сіроклин І. М., Змій С. О., Щєбликіна О. В. Технологічна проблема регулювання пристроїв автоматичної локомотивної сигналізації моторвагонного рухомого складу. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. Вип. 168. С. 19 – 30.

2. Бойнік А.Б., Каменєв О.Ю., Змій С.О., Щєбликіна О.В., Гаєвський В.В. Дефектування технічного, технологічного та організаційного забезпечення контрольного пункту АЛСН моторвагонного депо. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті: науково-технічний журнал*. 2017. Вип. №13. С. 66 – 80.

3. Бойнік А.Б., Прилипко О.Ю., Каменєв О.Ю., Лазарєв О.В., Щєбликіна О.В. Вибір типу чутливого елемента для точкового колійного датчика. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. Вип. № 2. С. 31 – 39.

4. Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Щєбликіна О. В., Лазарєв О.В., Ушаков М.В. Модель диспетчерського керування взаємозалежними транспортними потоками на промисловому залізничному транспорті. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 182. С. 63 – 79.

5. Voinik, A., Prohonny, O., Kameniev, O. Lapko, A., Kuzmenko, D., Shcheblykina O. Development and investigation of methods of graphic-functional modeling of distributed systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 94. № 4 /4. 2018. P. 59-69. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.140636 (видання індексується у базі Scopus).

6. Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Щєбликіна О.В. Прогнозна динаміка впливу людського та технічного чинників на експлуатаційну надійність пристроїв залізничної автоматики. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2020. Вип. 40. С. 168 – 178.

7. Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Щєбликіна О.В. Математичні моделі верифікації ергатичних систем засобів залізничної автоматики. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. Вип. 4 (151). С. 7 – 14.

8. Щєбликіна О.В., Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Сагайдачний В.Г. Підвищення показників готовності та відновлення систем керування рухом поїздів на основі збільшення глибини контролю. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. Вип. № 2. С. 32 – 42.

Публікації у виданнях інших держав:

9. Kameniev O., Lapko A., Shcheblykina E. Improvement of technologies for the development of modern rail automation systems. *International journal for science, technics and innovations for the industry*. «MACHINES. TECHNOLOGIES. MATERIALS». Sofia, Bulgaria. 2017. Issue 11. P. 533 – 536.

Праці апробаційного характеру:

10. Бойнік А.Б., Змій С.О., Каменєв О.Ю., Щєбликіна О.В. Метод та результати моделювання операцій чергового по станції: тези X Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті», м. Дніпро (14 – 15 грудня 2016 р.). – Дніпро: ДНУЗТ ім. академіка В. Лазаряна. 2016. С. 26.

11. Каменєв О.Ю., Щєбликіна О.В. Удосконалення та формалізація процедур складання технічних завдань розробникам програмного забезпечення систем керування та регулювання руху поїздів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: матеріали доповідей 29-ї міжнародної науково-практичної конференції, м. Чорноморськ (27 – 29 вересня 2016 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. №4 (Додаток). С. 27 – 28.

12. Щєбликіна О.В., Анічін В.В. Використання мобільного додатку автоматизованого робочого місця електромеханіка. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: матеріали доповідей 29-ї міжнародної науково-практичної конференції, м. Чорноморськ (27 – 29 вересня 2016 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. №4 (Додаток). С. 51.

13. Бойнік А.Б., Кустов В.Ф., Щєбликіна О.В., Каменєв О.Ю. Развитие научных основ и практических подходов к обеспечению и доказательству

безпеки систем залізничного транспорту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: матеріали доповідей 30-ї міжнародної науково-практичної конференції, м. Одеса (20 – 23 вересня 2017 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2017. Вип. №4 (Додаток). С. 71 – 73.

14. Бойник А.Б., Щєблыкина Е.В. Проведение испытаний автоматизированной системы микропроцессорной централизации стрелок и сигналов на функциональную безопасность и безотказность на имитационных моделях. *Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті*: тези VIII міжнародної науково-практичної конференції, м. Чернівці (01 – 03 лютого 2017 р.). – Дніпро: ДНУЗТ ім. академіка В. Лазаряна, 2017. С. 17 – 18.

15. Бойник А.Б., Кустов В.Ф., Каменев О.Ю., Змій С.О., Щєблыкина О.В. Особливості мікропроцесорного керування переїзною сигналізацією. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*: тези доповідей 79-ї міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті», м. Харків (25 – 27 квітня 2017 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2017. Вип. 169 (Додаток). С. 4 – 6.

16. Каменев О.Ю., Лапко А.О., Щєблыкина О.В. Верифікація програмних засобів, реалізованих мовою релейно-контактної логіки. *Free and open source software*: матеріали X ювілейної міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків (20 – 22 листопада 2018 р.). – Харків: ХНУБА, 2018. С. 68.

17. Мойсеєнко В.І., Каменев О.Ю., Гаєвський В.В., Щєблыкина О.В. Розвиток засобів технічної діагностики інформаційно-керуючих систем на залізничному транспорті. *Прикладні науково-технічні дослідження*: матеріали II міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ (3 – 5 квітня 2018 р.). – Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2018. С. 168.

18. Каменев О.Ю., Щєблыкина О.В. Вдосконалення процедур синтезу випробувальних моделей залізничної автоматики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: тези стендових доповідей та виступів 31-ї міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків (24 – 26 жовтня 2018 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. №4 (Додаток). С. 64 – 65.

19. Щебликіна О.В., Кузьменко Д. М. Доказ безпечності мікропроцесорної системи напівавтоматичного блокування з радіоканалом. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: тези стендових доповідей та виступів 31-ї міжнародної науково-практичної конференції*, м. Харків (24 – 26 жовтня 2018 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. №4 (Додаток). С. 66.

20. Лапко А.О., Каменєв О.Ю., Щебликіна О.В., Сагайдачний В.Г., Панасенко М.О., Кладко А.С. Аналіз способів моделювання розподілених систем. *«ТАК» Телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології: збірка доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених*, м. Покровськ (30 листопада 2018 р.). – Покровськ: ДВНЗ «ДонНТУ», 2018. С. 151 – 153.

21. Щебликіна О.В., Каменєв О.Ю., Лапко А.О. Автоматизація проектування об'єктів специфічного призначення. *Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали III міжнародної науково-практичної конференції*, м. Івано-Франківськ (3 – 5 квітня 2019 р.). – Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2019. С. 45.

22. Каменєв О.Ю., Лапко А.О., Щебликіна О.В. Система тунельної ідентифікації небезпечних об'єктів. *Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали III міжнародної науково-практичної конференції*, м. Івано-Франківськ (3 – 5 квітня 2019 р.). – Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2019. С. 209.

23. Щеблыкина Е.В., Ушаков М.В. Повышение надежности эксплуатации эргатических систем управления путем применения технологии терминального доступа. *Проблемы безопасности на транспорте: материалы IX международной научно-практической конференции*, г. Гомель, Республика Беларусь (28 – 29 ноября 2019 г.). Часть 1. – Гомель: БелГУТ, 2019. С. 257 – 259.

24. Kameniev O., Lapko A., Shcheblykina E. Improvement of technologies for the development of modern rail automation systems. *Industry 4.0: Proceedings II International Scientific Conference*, Borovets, Bulgaria (13–16 december 2017). – Sofia, Bulgaria: Scientific technical union of mechanical engineering “Industry-4.0”, 2017, Vol. 1/1. P. 107 – 110.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

25. Пат. на корисну модель 122882, Україна, МПК G01S 17/42 (2006.01)
Канал вимірювання радіальної швидкості літальних апаратів з можливістю розпізнавання літальних апаратів для мобільної однопунктної системи зовнішньо-траєкторних вимірювань. О.В.Коломійцев, І.І. Сачук, О.О. Зверев, О.П. Нарезній, В.О. Павлій, І.В.Помогаєв, А.А. Прилипко, Ю.П. Рондін, М.Л.Троцько, О.В. Щебликіна. Заявка u201709114 від 14.09.2017; опубл. 25.01.2018, бюл. № 2.

26. Пат. на корисну модель 122883, Україна, МПК G01S 17/42 (2006.01)
Канал вимірювання кутових швидкостей літальних апаратів з можливістю розпізнавання літальних апаратів для мобільної однопунктної системи зовнішньотраєкторних вимірювань. О.В. Коломійцев, І.І. Сачук, О.О. Зверев, Д.В. Молчанов, О. П. Нарезній, В.О. Павлій, А. А. Прилипко, Ю. П. Рондін, М.Л.Троцько, О.В. Щебликіна. Заявка u201709115 від 14.09.2017; опубл. 25.01.2018, бюл. № 2.

27. Пат. на корисну модель 123393, Україна, МПК G01S 17/42 (2006.01)
Канал автоматичного супроводження літальних апаратів за напрямком з можливістю розпізнавання літальних апаратів для мобільної однопунктної системи зовнішньо-траєкторних вимірювань. О.В. Коломійцев, І.І. Сачук, С.В. Герасимов, О.О. Зверев, Д.В. Молчанов, О. П. Нарезній, В.О. Павлій, Ю.П. Рондін, М.Л.Троцько, О.В. Щебликіна. Заявка u201709107 від 14.09.2017; опубл. 26.02.2018, бюл. № 4.

Відомості про апробацію результатів дисертації:

1. ІХ міжнародна науково-практична конференція «Проблеми безпеки на транспорті» (м. Гомель, Республіка Білорусь, 2019 р.) (заочна участь).

2. ІІІ міжнародна науково-практична конференція «Прикладні науково-технічні дослідження» (м. Івано-Франківськ, Україна, 2019 р.) (заочна участь).

3. Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених «ТАК: Телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології» (м. Покровськ, Україна, 2018 р.) (очна участь).

4. 31-ша міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (м. Харків, Україна, 2018 р.). (очна участь).

5. X ювілейна міжнародна науково-практична конференції «Free and open source software» (м. Харків, Україна, 2018 р.) (очна участь).

6. VI міжнародна науково-практична конференція «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті» (м. Чернівці, Україна, 2018 р.) (очна участь).

7. 30-та міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (м. Одеса, Україна, 2017 р.). (очна участь).

8. 29-та міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (м. Чорноморськ, Україна, 2016 р.). (очна участь).

9. II міжнародна наукова конференція «Industry-4.0» (сел. Боровець, Болгарія, 2017 р.) (заочна участь).

ДОДАТОК І

Матеріали впровадження результатів дисертаційної роботи

Фактичне впровадження результатів дисертаційного дослідження здійснено на базі таких підприємств, установ і організацій:

– структурний підрозділ «Служба сигналізації та зв'язку» регіональної філії «Південна залізниця» акціонерного товариства «Українська залізниця» (м. Харків) – під час експлуатації, технічного обслуговування та ремонту пристроїв МПЦ на залізничній станції «Головашівка»;

– ВАТ «МК «Запоріжсталь» (м. Запоріжжя) – під час експлуатації, технічного обслуговування та ремонту мікропроцесорних та релейно-мікропроцесорних систем керування рухом поїздів на об'єктах транспортної інфраструктури Управління залізничного транспорту комбінату (системи МПЦ станції «Вугільна», системи РМЦ станції «Рудна», мікропроцесорних систем контролю вільності ділянок колії методом рахунку осей на ряді залізничних станцій та перегонів);

– ТОВ «Вуглепромтранс» (м. Мирноград Донецької обл.) – під час експлуатації, технічного обслуговування та ремонту пристроїв МПЦ на залізничній станції «Транзитна» та пристроїв НАБ на залізничному перегоні «Транзитна – Шахтна»;

– ТОВ «Хартрон-Енерго» (м. Харків) – під час виробництва та сертифікації системи МПЦ для залізничної станції «Карпиші» регіональної філії «Південно-західна залізниця» акціонерного товариства «Українська залізниця»;

– Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків) – у освітньому процесі під час проведення теоретичних та практичних занять у навчальних групах слухачів курсів підвищення кваліфікації Інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів.

Копії актів впровадження, які підтверджують використання результатів дисертаційної роботи на практиці, наведені нижче.

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший заступник начальника
структурного підрозділу
«Служба сигналізації та зв'язку»
регіональної філії «Південна
залізниця» АТ «Укрзалізниця»
Д.Ю. Мальований
«02» 09 2020 р.

**АКТ**

про впровадження результатів дисертаційної роботи Щєбликіної Олени Вікторівни на тему
«Підвищення експлуатаційної готовності систем керування рухом поїздів на
основі контролю функціональних параметрів»

30 серпня 2020 р.

м. Харків

Комісія зі складу представників структурного підрозділу «Служба сигналізації та зв'язку» регіональної філії «Південна залізниця» акціонерного товариства «Українська залізниця» (служба Ш) та Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ) у складі:

голова комісії – начальник відділу СЦБ служби Ш Степура Лілія Миколаївна,
члени комісії

- інженер I категорії відділу СЦБ служби Ш Завгородній Дмитро Олегович,

- директор Центру навчально-практичної підготовки, професійної та дуальної освіти
УкрДУЗТ, доцент, к.т.н. Каменєв Олександр Юрійович,

- аспірантка кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів
УкрДУЗТ Щєбликіна Олена Вікторівна,

склала цей акт про те, що в процесі технічного обслуговування та ремонту мікропроцесорних пристроїв СЦБ на регіональній філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» використовуються такі наукові й прикладні результати дисертації Щєбликіної О.В.:

1. Методи, моделі та програмні засоби контролю функціональних параметрів, призначені для забезпечення експлуатаційної готовності систем керування рухом поїздів.

2. Результати прогнозування експлуатаційної надійності систем керування рухом поїздів для визначення та обґрунтування обсягів модернізації пристроїв сигналізації, централізації та блокування.

3. Моделі оцінки безпеки використання систем керування рухом поїздів для обґрунтування заходів, спрямованих на підвищення безпеки руху поїздів і виконання маневрової роботи.

Місце використання результатів дисертації: станція Головашівка.

Використання результатів дисертаційної роботи дозволяє скоротити непродуктивні простої руху поїздів на об'єктах впровадження.

Голова комісії

Члени комісії

Л.М. Степура

Д.О.Завгородній

О.Ю. Камєнєв

О.В. Щєбликіна

ЗАТВЕРДЖУЮ:Начальник Управління
залізничного транспорту
ПАТ «МК «Запоріжсталь»

Д.О. Ковган

«12» 310 2020 р.

**АКТ**

про впровадження результатів дисертаційної роботи Щєбликіної Олени Вікторівни на тему
«Підвищення експлуатаційної готовності систем керування рухом поїздів на
основі контролю функціональних параметрів»

31 серпня 2020 р.

м. Запоріжжя

Комісія зі складу представників ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» та
Українського державного університету залізничного транспорту у складі:

голова комісії – начальник служби СЦБ Управління залізничного транспорту (УЗТ) ПАТ
«МК «Запоріжсталь» Кіктенко Олексій Вікторович,

члени комісії

- майстер служби СЦБ УЗТ ПАТ «МК «Запоріжсталь» Кучеров Володимир
Олександрович,

- доцент Українського державного університету залізничного транспорту Каменев
Олександр Юрійович,

- аспірантка Українського державного університету залізничного транспорту Щєбликіна
Олена Вікторівна,

склала цей акт про те, що при експлуатації систем керування рухом поїздів Управління
залізничного транспорту ПАТ «МК «Запоріжсталь» фактично використовуються такі науково-
практичні результати дисертації Щєбликіної О.В.

1. Модель оцінки глибини контролю (тестового покриття) функціональних випробувань
у процесі вибору раціональних засобів технічного контролю мікропроцесорних систем
керування рухом поїздів.

2. Метод синтезу моделей для випробувань при конфігурації засобів технічного
контролю мікропроцесорних систем керування рухом поїздів.

3. Закономірності між параметрами глибини контролю та експлуатаційної готовності
систем керування рухом поїздів при виборі технічних засобів модернізації об'єктів промислово-
транспортної інфраструктури комбінату.

4. Прикладне програмне забезпечення (САПР) для синтезу моделей для випробувань при
перевірці залежностей мікропроцесорних систем керування рухом поїздів.

Результати дисертаційної роботи дозволяють підвищити показники експлуатаційної
готовності систем керування до 15%, показники відновлення до 5 разів та скоротити
непродуктивні простої в русі поїздів до 12%. Очікуваний річний економічний ефект від
впровадження результатів дисертації становить близько 350 тис. грн.

Голова комісії

А.В. Кіктенко

Члени комісії

В.О. Кучеров

О.Ю. Каменев

О.В. Щєбликіна

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор ТОВ «Вуглепромтранс»
М.В. ВИШНЕВСЬКИЙ

2020 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Щєбликіної Олени Вікторівни за темою дослідження «Підвищення експлуатаційної готовності систем керування рухом поїздів на основі контролю функціональних параметрів»

01 жовтня 2020 р.

м. Мирноград

Комісія у складі:

голова комісії – в.о. головного інженера ТОВ «Вуглепромтранс» Смиків Андрій Вікторович;

члени комісії:

- начальник служби електропостачання, СЦБ та зв'язку Фалько Артем Миколайович;
- начальник служби охорони праці та безпеки руху Алакозова Інна Михайлівна;
- аспірантка УкрДУЗТ Щєбликіна Олена Вікторівна,

склала цей акт про те, що в технологічному процесі залізничних перевезень підприємства використовуються такі результати дисертаційної роботи Щєбликіної О.В.:

1. Методи та моделі контролю функціональних параметрів систем керування рухом поїздів при здійсненні заходів, спрямованих на забезпечення їх експлуатаційної готовності, безпосередньо на об'єктах експлуатації та в контрольно-випробувальному пункті (КВП).
2. Метод оцінки експлуатаційної готовності систем керування рухом поїздів при прогнозуванні технічного стану мікропроцесорної централізації стрілок та сигналів з метою визначення періодичності її технічного обслуговування.
3. САПР синтезу моделей для випробувань систем керування рухом поїздів при перевірці залежностей мікропроцесорної централізації стрілок та сигналів та контролі функціональних параметрів її компонентів у КВП.

Використання результатів дисертаційної роботи Щєбликіної О.В. дозволяє підвищити коефіцієнт експлуатаційної готовності систем керування рухом поїздів 10%, інтенсивність відновлення систем до 3-х разів та скоротити непродуктивні простої в русі поїздів і виконанні маневрової роботи до 15%.

Голова комісії

Члени комісії

Four handwritten signatures in blue ink, corresponding to the names listed on the right.

А.В. Смиків

А.М. Фалько

І.М. Алакозова

Олена ЩЕБЛИКІНА



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Щєбликіної Олени Вікторівни за темою дослідження: «Удосконалення методів та моделей функціональних випробувань систем керування рухом поїздів»

26 серпня 2020 р.

м. Харків

Комісія у складі: голова комісії – директор технічний НВП «ХАРТРОН-ЕНЕРГО» ТОВ Цимбал Анатолій Романович та члени комісії – провідний інженер Брезгунов Юрій Миколайович, аспірантка Українського державного Університету залізничного транспорту Щєбликіна Олена Вікторівна склали цей акт про фактичне впровадження у виробничо-технологічний процес підприємства таких результатів дисертаційної роботи Щєбликіної О.В.:

1. Метод модифікованих прямих сум (ММПС) – використовується при формуванні та реконфігурації моделей для випробувань мікропроцесорних систем електричної централізації.
2. Модель оцінки тестового покриття – використовується при виборі методу випробувань мікропроцесорної системи електричної централізації, зокрема – розмежуванні об'єктів керування та контролю за різними способами їх моделювання під час випробувань.

Використання результатів дисертаційної роботи Щєбликіної О.В. дозволяє скоротити людські й часові ресурси на проведення випробувань та збільшити обсяг функцій і технологічних ситуацій, які верифікуються при випробуваннях.

Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи Щєбликіної О.В. становить 200 тис. грн. у розрахунку на одну залізничну станцію середньої розмірності (22 стрілки).

Підстава для запровадження розробок у виробництво – договір № 23/2019 от 09 січня 2019г. «Разработка системы МПЦ-С для ст. «Карапыши».

Голова комісії

Цимбал А.Р.

Члени комісії

Брезгунов Ю.Н.

Щєбликіна О.В.

Затверджую!

Проректор Українського державного
університету залізничного транспорту
з науково-педагогічної роботи,
к.т.н., доцент

Артур КАГРАМАНЯН

« 30 » листопада 2020 р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Щебликіної Олени Вікторівни на тему «Підвищення експлуатаційної готовності систем
керування рухом поїздів на основі контролю функціональних параметрів» в освітньому процесі
Інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів
Українського державного університету залізничного транспорту

До основних результатів дисертаційної роботи Щебликіної О.В., що використовуються в освітньому процесі Інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів (ІППК) Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ), належать:

- методичний підхід до визначення експлуатаційної готовності систем керування рухом поїздів (СКРП), що базується на використанні моделі оцінки тестового покриття функціональних випробувань;
 - спосіб відтворення технологічних об'єктів у засобах контролю функціональних параметрів СКРП на основі графо-функціональних моделей;
 - метод аналітичної інтерпретації технологічних об'єктів СКРП, що забезпечує відтворення їх статичних і динамічних характеристик у процесі контролю функціональних параметрів;
 - закономірності, які встановлюють зв'язок між глибиною контролю функціональних параметрів СКРП, масштабністю і складністю технологічних об'єктів СКРП та їх експлуатаційною готовністю;
 - метод блочно-діагонального синтезу моделей для функціональних випробувань СКРП який базується на використанні вихідних блоків функціонально-топологічних матриць суміжності;
 - спосіб оцінки ефективності заходів із забезпечення експлуатаційної готовності СКРП за результатами функціональних випробувань, який базується на встановленому законі розподілу програмних помилок технічного персоналу;
 - підходи до оцінювання безпеки використання ергатичних СКРП, які враховують багатозначність допоміжних технологічних режимів функціонування системи та її інтерактивний характер взаємодії з експлуатаційним, технічним й інспекційним персоналом;
 - результати прогнозування впливу людського й технічного чинників на експлуатаційну надійність пристроїв і систем керування рухом поїздів;
 - САПР синтезу моделей для функціональних випробувань мікропроцесорних СКРП
- Зазначені розробки з 2018 року по теперішній час використовуються при проведенні занять у групах слухачів курсів підвищення кваліфікації ІППК, зокрема:
- керівного складу служб та дистанцій сигналізації та зв'язку регіональних філій АТ «Укрзалізниця» (начальників, їх заступників, головних інженерів);
 - інженерно-технічних працівників, керівників та провідних фахівців підрозділів господарства автоматики, телемеханіки та зв'язку на магістральному, промисловому залізничному транспорті та метрополітенах.

Заступник директора
ІППК УкрДУЗТ,
к.т.н., доцент

Вячеслав ЗАХАРЧЕНКО