

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАЖАК ОЛЬГА ВАЛЕРІЇВНА

УДК 656.6.052

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛІ І МЕТОДИ ОЦІНКИ БЕЗВІДМОВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ
ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ**

Спеціальність: 271 Морський та внутрішній водний транспорт

Галузь знань: 27 Транспорт

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. Бажак

Науковий керівник: Бойко Світлана Олексіївна
доктор філософії (PhD)

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Бажак О.В. Моделі і методи оцінки безвідмовності обладнання засобів водного транспорту в умовах експлуатації за технічним станом. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 271 – Морський та внутрішній водний транспорт. – Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, 2024.

Дослідження показують, що рівень безаварійного судноводіння, показники якості та ефективності перевезень пасажирів та вантажів продовжують покращуватися, але актуальним є завдання вирішення низки проблем в цієї галузі. Особлива увага приділяється саме заходам забезпечення заданого рівня надійності технічних засобів при експлуатації за технічним станом.

Сучасний етап експлуатації обладнання засобів водного транспорту характеризується тим, що практично у багатьох суден вироблені призначені ресурси або завершені призначені терміни служби його обладнання. Відповідно до діючої регламентованої стратегією технічної експлуатації і ремонту використання такого обладнання за призначенням повинно бути припинено, після чого відповідні засоби повинні направлятися в ремонт або на списання та утилізацію. Для проведення капітальних ремонтів сучасного обладнання засобів водного транспорту потрібні значні фінансові, матеріальні та інші ресурси, тому актуальні дослідження в напрямку обґрунтування продовження призначених ресурсів (термінів служби).

До теперішнього часу завдання продовження призначених ресурсів (термінів служби) обладнання засобів водного транспорту (ЗРМТ) вирішувалася наступним чином. Певна кількість перших серійно виготовлених виробів переводяться на лідерну експлуатацію. При цьому з метою гарантованого виключення переходів обладнання засобів водного транспорту до закінчення призначених ресурсів (термінів служби) в граничний стан встановлювалися занижені значення величин призначених

ресурсів (термінів служби). Експлуатація усіх обладнання ЗРМТ наступних років випуску здійснювалася відповідно до встановленої за результатами лідерної експлуатації періодичністю ремонтів, тобто ремонти обладнання засобів водного транспорту проводилися після досягнення ними призначених ресурсів (термінів служби) незалежно від їх фактичного технічного стану та рівня надійності, що призводило до недовикористання ресурсів окремих складових частин, зумовленого їх передчасної заміною при ремонтах, нераціонального витрачання фінансових і інших ресурсів.

Таким чином, актуальним є наукове завдання удосконалення моделей та методів оцінки безвідмовності обладнання засобів водного транспорту при експлуатації за технічним станом під час вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби).

Наукова новизна отриманих результатів.

– удосконалено метод оцінки показників безвідмовності обладнання ЗРМТ, який на відміну від існуючих враховує те, що на зразках обладнання ЗРМТ послідовно виконуються відповідні етапи підконтрольної експлуатації та базується на комплексному використанні взаємопов'язаних часткових методів: методу обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на надійність; методу планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність; методу розрахунково-експериментальної оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби) обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом з використанням результатів підконтрольної і лідерної експлуатації і випробувань на надійність. Використання методу дозволяє покращити достовірність оцінки залишкового ресурсу при експлуатації за технічним станом з метою індивідуального вирішення завдань продовження призначених ресурсів обладнання;

– удосконалено метод обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом на надійність, який на відміну від відомих, розроблених

для дослідних або виготовлених зразків обладнання ЗРМТ, передбачає вирішення комплексу завдань:

- уточнено номенклатури показників надійності зразків обладнання ЗРМТ і обґрунтування гранично допустимих значень їх показників безвідмовності;
- обґрунтування стратегій випробувань зразків обладнання ЗРМТ по кожному з показників надійності, що контролюються (оцінюються);
- обґрунтування вимог до точності і достовірності результатів випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність;
- удосконалено математичні моделі випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність, які призначені для визначення ймовірності влучення з початку координат в будь-яку досяжну точку з урахуванням форм областей відповідності і невідповідності контрольованих показників безвідмовності встановленим вимогам; співвідношення для визначення величин ризику споживача; середній тривалості випробувань. Розроблені математичні моделі узагальнюють відомі моделі випробувань технічних об'єктів за показником надійності типу “ймовірність” і “наробіток”, та на відміну моделей послідовних випробувань без урахування апіорної інформації і моделей одноступеневих випробувань з використанням байесовського підходу до обліку апіорної інформації, описують процес замкнутих випробувань будь-якого типу на безвідмовність з використанням байесовського підходу до обліку апіорної інформації про величину показників безвідмовності, накопичену за даними підконтрольної експлуатації зразків обладнання ЗРМТ. Дані моделі використовуються при обґрунтуванні параметрів планів випробувань обладнання ЗРМТ з метою ухвалення рішень про відповідність (невідповідність) величин показників безвідмовності встановленим вимогам із заданою достовірністю, а у разі ухвалення рішення про відповідність – кількісної оцінки його величини із заданою точністю. Точкові оцінки показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ і їх дисперсії, розраховані за результатами випробувань на

безвідмовність, використовуються для побудови регресійної моделі зміни цих показників безвідмовності і обчислення оцінок показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ.

Практичне значення одержаних результатів в тому, що їх реалізація доцільна при вирішенні завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) як окремого обладнання, так і судна в цілому. Застосування запропонованих моделей і методів дозволяє підвищити достовірність визначення нових призначених ресурсів (термінів служби) до 25 %. При цьому, за результатами математичного моделювання, можливе підвищення ймовірності виконання безвідмовного судноводіння до 15 % за рахунок впровадження на практиці.

Результати дисертаційних досліджень реалізовані у судноплавній компанії «Odessa marine agency Odemara LTD» (акт впровадження від 04.03.2024 р.), а також в навчальному процесі Державного університету інфраструктури та технологій, факультету експлуатації технічних система на водному транспорті на кафедрі суднових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації при викладанні дисциплін «Суднові системи та пристрої» і «Технічне обслуговування та ремонт суднових технічних засобів» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт (акт впровадження від 28.02.2024 р. № 186/01-11).

Наведені нові науково-обґрунтовані практичні рекомендації щодо визначення нових призначених ресурсів (термінів служби) як окремого обладнання, так і судна в цілому дозволяють розглянути можливість використання даних підходів у інших системах транспортних засобів, а також значно покращити систему технічної експлуатації судна за рахунок планування та своєчасного проведення відповідних заходів.

Ключові слова: надійність, безвідмовність, відмова, технічний стан, засіб водного транспорту, призначений ресурс, суднове обладнання, річковий транспорт, морський транспорт, шлях судна, точність, навігаційне

забезпечення, безпека судноводіння, навігаційна інформація, судноводіння, безпека мореплавства, безпека судноплавства, навігація суден, безпека навігації, суднові операції, технічні засоби, готовність, безвідмовна робота, технічне обслуговування, суднові технічні засоби, вантажні судна, система автоматизованого проектування, безпека судноводіння, система навігації суден

ABSTRACT

Bazhak O.V. Models and methods for assessing the reliability of water transport equipment under condition-based maintenance. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 271 Maritime and Inland Water Transport. - State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, 2024.

Studies show that the level of accident-free navigation, quality and efficiency of passenger and freight transport continue to improve, but the task of solving a number of problems in this area is urgent. Particular attention is paid to measures to ensure a given level of reliability of technical means during operation according to the technical condition.

The current stage of operation of river and sea transport equipment is characterized by the fact that almost many vessels have produced the assigned resources or completed the service life of its equipment. In accordance with the current strategy of technical operation and repair, the use of such equipment for its intended purpose should be discontinued, after which the appropriate funds should be sent for repair or write-off and disposal. Significant financial, material and other resources are required for carrying out capital repairs of modern equipment of river and sea transport means, therefore actual researches in the direction of substantiation of prolongation of the appointed resources (service life).

To date, the task of extending the assigned resources (service life) of river and sea transport equipment (R&STE) has been solved as follows. A certain number of the first mass-produced products are transferred to leading operation. In this case, in order to ensure the exclusion of transitions of equipment of river and sea transport to the end of the assigned resources (service life) in the limit state set understated values of the assigned resources (service life). The operation of all equipment R&STE subsequent years was carried out in accordance with the results of the leading operation of the frequency of repairs, ie repairs of river and sea transport equipment were carried out after reaching their assigned resources

(service life), regardless of their actual technical condition and reliability, which led to underutilization. resources of individual components due to their premature replacement during repairs, irrational spending of financial and other resources.

Thus, the scientific task of improving the models and methods of assessing the reliability of equipment of river and sea transport during operation according to the technical condition during the solution of the tasks of extension of the assigned resources (service life) is relevant.

Scientific novelty of the obtained results is that:

the method of estimating the failure rates of R&STE equipment has been improved; the method of planning tests of samples of equipment R&STE for failure-free; method of calculation and experimental evaluation of the indicators of the residual life (service life) of the equipment R&STE during operation according to the technical condition using the results of controlled and leader operation and reliability tests. Use of a method allows to improve reliability of an estimation of a residual resource at operation on a technical condition for the purpose of the individual decision of problems of continuation of the appointed resources of the equipment;

the method of substantiation of initial characteristics for planning of tests of samples of R&STE equipment at operation on a technical condition on reliability which unlike known, developed for experimental or made samples of the R&STE equipment, provides the decision of a complex of tasks is improved:

- clarification of the nomenclature of indicators of reliability of samples of R&STE equipment and substantiation of maximum admissible values of their indicators of reliability;

- substantiation of testing strategies for samples of R&STE equipment for each of the monitored (evaluated) reliability indicators;

- substantiation of requirements to accuracy and reliability of results of tests of samples of the R&STE equipment on faultlessness;

improved mathematical models of tests of samples of equipment R&STE for failure-free, which are designed to determine the probability of hitting from the

origin at any achievable point, taking into account the forms of areas of compliance and non-compliance of controlled indicators of failure to the established requirements; ratio to determine the magnitude of consumer risk; the average duration of the tests. The developed mathematical models generalize the known models of tests of technical objects on the indicator of reliability of type "probability" and "operating time", and unlike models of consecutive tests without taking into account a priori information and models of one-stage tests using Bayesian approach to accounting of a priori information. any type of reliability using the Bayesian approach to accounting for a priori information on the value of failure indicators, accumulated according to the controlled operation of samples of equipment R&STE. These models are used to justify the parameters of test plans for equipment R&STE in order to decide on compliance (non-compliance) of the values of failure indicators to the established requirements with a given reliability, and in case of a decision on compliance - quantification of its value with a given accuracy. Point estimates of failure rates of samples of equipment and their variances, calculated from the results of failure tests, are used to build a regression model of change of these indicators of failure and calculation of estimates of residual life (service life) of samples of equipment.

The practical significance of the obtained results is that their implementation is expedient in solving the tasks of extending the assigned resources (service life) of both individual equipment and the vessel as a whole. The application of the proposed models and methods allows to increase the reliability of the definition of new assigned resources (service life) to 25%. At the same time, according to the results of mathematical modeling, it is possible to increase the probability of failure-free navigation to 15% due to the implementation in practice.

The results of dissertation research are implemented at Odessa marine agency Odemara LTD (act dated 04.03.2024); as well as in the educational process of the State University of Infrastructure and Technologies, Faculty of Operation of Technical Systems in Water Transport, Department of Ship Power Plants, Auxiliary Mechanisms of Ships and Their Operation in teaching the disciplines

"Ship Systems and Devices" and «Maintenance and Repair of Ship Technical Facilities» for applicants of the first (bachelor's) level of higher education in the specialty 271 Maritime and Inland Water Transport (implementation act dated 28.02.2024 № 186/01-11).

The new scientifically substantiated practical recommendations for determining the new assigned resources (service life) of both individual equipment and the vessel as a whole allow to consider the possibility of using these approaches in other vehicle systems, as well as significantly improve the technical operation of the vessel through planning and timely carrying out appropriate measures.

Key words: reliability, reliability, failure, technical condition, means of water transport, designated resource, ship equipment, river transport, sea transport, ship's path, accuracy, navigation support, safety of navigation, navigation information, navigation, safety of navigation, safety of navigation, navigation of ships, navigation safety, ship operations, technical equipment, readiness, fail-safe operation, maintenance, ship technical equipment, cargo ships, automated design system, navigation safety, ship navigation system.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Список публікацій здобувача за темою дисертації:

1. Бажак О.В., Сьомін О.А., Генералова І.Г., Коломієць О.М. Аналіз математичного апарату прогнозування технічного стану обладнання засобів водного транспорту. *Водний транспорт*. 3(31). 2020. С.46–55.
<https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.05>
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/138>
2. Бажак О.В., Трофименко І.В., Бойко А.Д. Синтез моделі та алгоритмів процесу керування рухом судна. *Водний транспорт*. 1(32). 2021. С.29–35. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.1.32.04>
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/154>
3. Бажак О.В., Тихонов І.В., Богом'я В.І., Пліта Л.Л. Метод підвищення безпеки судноводіння. *Водний транспорт*. 2(33). 2021. С.144–152.
<https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.16>
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/181>
4. Бажак О.В. Удосконалення методу оцінки показників надійності обладнання засобів водного транспорту. *Водний транспорт*. 3(34). 2021. С.148–159. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.17>
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/199>
5. Бажак О.В., Богом'я В.І. Методика планування випробувань зразків обладнання засобів водного транспорту на безвідмовність. *Водний транспорт*. 1(35). 2022. С.25–32. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.03> <https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/205> 1,0
6. Бажак О.В., Якусевич Ю.Г., Дорофєєва З.Я., Бойко С.О., Дослідження шляхів ефективного використання систем автоматизованого проектування в галузі суднобудування. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. № 34 (73). С. 94–99.
https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2023/2_2023/part_2/17.pdf
doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/17

Наукові праці, в яких опубліковані додаткові наукові результати дисертації:

7. Бажак О.В. Напрями впровадження системи технічної експлуатації за станом (розділ у колективної монографії). Математичний апарат прогнозування довговічності обладнання засобів водного транспорту в умовах експлуатації за технічним станом: колективна монографія / за загальною редакцією О.А. Дакі. Державний університет інфраструктури та технологій, 2021. С.56–62.

8. Бажак О.В., Найдьонов І.В. Розроблення методів поліпшення екологічних показників засобів річкового транспорту в умовах експлуатації. *Slovak international scientific journal. Vol.1. No.49, 2021. pp.13-20.* <http://repository.vsau.org/getfile.php/27983.pdf>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Бажак О.В., Пліта Л.Л. Модель інтелектуальної системи керування судном. Тези доповідей одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції 8 – 9 квітня 2021 року Том 1: секції 1, 2. *Баку – Харків – Київ – Жиліна. 2021. С.18.*

10. Бажак О. В., Найдьонов А. І.. Формалізація процесу відновлення устаткування засобів водного транспорту. Матеріали III Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету, квітень 2021. *Видавництво Іванченка І. С., 2021. С.28-32.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36574.15681>.

11. Богом'я В. І., Бажак О. В., Пліта Л. Л.. Вплив радіонавігаційних систем на безпеку судноводіння. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету, квітень 2022. *Видавництво Іванченка І. С., 2022. С.16-23.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15422.36166>

ЗМІСТ

ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1. ЗАДАЧА ВДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ І МЕТОДІВ ОЦІНКИ БЕЗВІДМОВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ЗРМТ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ	23
1.1. Аналіз надійності засобів водного транспорту в умовах експлуатації за технічним станом	23
1.2. Аналіз існуючого науково-методичного апарату оцінки показників надійності обладнання ЗРМТ для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) в умовах експлуатації за технічним станом	25
1.3. Постановка наукового завдання	38
Висновки до розділу 1	40
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДІВ ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПОЧАТКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ ВИПРОБУВАНЬ ОБЛАДНАННЯ ЗРМТ	42
2.1. Удосконалення методу оцінки показників надійності обладнання ЗРМТ	42
2.2. Метод обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань обладнання ЗРМТ на надійність	61
2.2.2. Уточнення номенклатури нормованих показників надійності зразків обладнання ЗРМТ і обґрунтування гранично допустимих значень їх показників безвідмовності.	71
2.2.3. Обґрунтування стратегій випробувань зразків обладнання ЗРМТ на надійність при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби).	78
2.2.4. Обґрунтування вимог до точності і достовірності контролю і оцінки показників безвідмовності обладнання ЗРМТ.	83
Виводи до розділу 2	99

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВИПРОБУВАНЬ ЗРАЗКІВ ОБЛАДНАННЯ ЗРМТ НА БЕЗВІДМОВІНІСТЬ.....	103
3.1. Основні положення і допущення, прийняті при розробці математичних моделей випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність на безвідмовність	103
3.2. Математичні моделі випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність по показнику “ймовірність безвідмовного включення”	113
3.3. Математичні моделі випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність за показником “середній наробіток на відмову”	122
Висновки до розділу 3	131
РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПЛАНУВАННЯ ВИПРОБУВАНЬ З УРАХУВАННЯМ НАКОПИЧЕНОЇ АПРІОРНОЇ ІНФОРМАЦІЇ	133
4.1. Імітаційна модель процесу контрольних випробувань технічних об’єктів на безвідмовність для перевірки відповідності спостережуваних ризиків запланованим	133
4.2. Методика планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність	135
Висновки до розділу 4	140
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	142
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	149
Додаток А	164
Додаток Б.....	166

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЗРМТ – засіб річкового та морського транспорту;

КТС – контроль технічного стану;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПЕ – підконтрольна експлуатація;

ПН – показники надійності;

ТЕ – технічна експлуатація;

ТО – технічне обслуговування;

ТС – технічний стан;

ТЕ і Р – технічна експлуатація і ремонт;

РЕЗ – радіоелектронний засіб.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. В сучасних умовах водний транспорт, як інфраструктурна галузь, має розвиватися швидкими темпами. Дослідження, яке виконане в межах даної дисертації показує, що рівень безаварійного судноводіння, показники якості та ефективності перевезень пасажирів та вантажів продовжують покращуватися, але актуальним є завдання вирішення низки проблем в цієї галузі. Особлива увага приділяється саме заходам забезпечення заданого рівня надійності технічних засобів при експлуатації за технічним станом.

Проблеми розвитку системи технічної експлуатації водного транспорту України розглядали та досліджували в своїх працях такі вчені: В.В. Панін, М.М. Цимбал, Б.В. Васильєв, Ю.Г. Дейнего, О.А. Оніщенко, С.І. Сербін, О.М. Тимощук, В.І. Богом'я, Д.І. Севаст'єєв, С.Р. Смирнов та інші.

Сучасний етап експлуатації обладнання засобів водного транспорту (ЗРМТ) характеризується тим, що практично у багатьох ЗРМТ вироблені призначені ресурси або завершені призначені терміни служби його обладнання. Відповідно до діючої регламентованої стратегією технічної експлуатації і ремонту (ТЕ і Р) використання такого обладнання ЗРМТ за призначенням повинно бути припинено, після чого відповідні засоби повинні направлятися в ремонт або на списання та утилізацію. Для проведення капітальних ремонтів сучасного обладнання ЗРМТ потрібні значні фінансові, матеріальні та інші ресурси. При цьому вартість ремонту сучасного обладнання ЗРМТ визначається, в тому числі, вартістю ремонту його радіоелектронних засобів (РЕЗ), які визначають надійність обладнання ЗРМТ в цілому.

До теперішнього часу завдання продовження призначених ресурсів (термінів служби) РЕЗ обладнання ЗРМТ вирішувалася наступним чином. Певна кількість перших серійно виготовлених виробів переводяться на лідерну експлуатацію. Під час наближення цих виробів до призначених

спочатку ресурсів (термінів служби) відповідно до Програми і планом робіт з продовження призначеного ресурсу (терміну служби), розробленими спільно замовником, розробником і виробником, проводилися відповідні роботи. За результатами виконання цих робіт приймалося спільне рішення про встановлення нових значень призначених ресурсів (термінів служби) обладнання ЗРМТ і його РЕЗ. В результаті поетапного вирішення завдання продовження призначених ресурсів (термінів служби) РЕЗ обладнання ЗРМТ, призначених на лідерну експлуатацію, встановлювалася певна сукупність міжремонтних призначених ресурсів (термінів служби). При цьому з метою гарантованого виключення переходів РЕЗ обладнання ЗРМТ до закінчення призначених ресурсів (термінів служби) в граничний стан встановлювалися занижені значення цих величин. Експлуатація усіх РЕЗ обладнання ЗРМТ наступних років випуску здійснювалася відповідно до встановленої за результатами лідерної експлуатації періодичністю ремонтів, тобто ремонти обладнання ЗРМТ проводилися після досягнення ними призначених ресурсів (термінів служби) незалежно від їх фактичного технічного стану та рівня надійності, що призводило до недовикористання ресурсів окремих складових частин, зумовленого їх передчасної заміною при ремонтах, нераціонального витрачання фінансових і інших ресурсів.

Тому актуальним є наукове завдання удосконалення моделей та методів оцінки безвідмовності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом під час вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби).

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

Дисертаційна робота виконана відповідно до Морської доктрини України на період до 2035 року, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 7 жовтня 2009 р. № 13074 та її нової редакції, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 18 грудня 2018 р.

Також дисертаційна робота виконана в інтересах науково-дослідних робіт «Моделі та методи прогнозування довговічності обладнання засобів

водного транспорту в умовах експлуатації за технічним станом» (0120U104335) та «Проблеми контролю стану та розвиток засобів діагностики технічних систем на водному транспорті» (0121U107887), які виконувалися у Державному університет інфраструктури та технологій, у якій авторка приймала участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження.

Мета дослідження – підвищення призначених ресурсів (термінів служби) за рахунок впровадження запропонованих моделей та методів оцінки безвідмовності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні **часткові завдання** дослідження:

- проаналізувати технічний стан засобів водного транспорту та визначити напрямки підвищення призначених ресурсів (термінів служби) обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом.;
- дослідити сучасні та перспективні методи оцінки безвідмовності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом;
- розробити моделі та методи оцінки безвідмовності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для визначення нових призначених ресурсів (термінів служби);
- розробити рекомендації щодо застосування запропонованих наукових результатів. Перевірити достовірність розроблених моделей та методів.

Об'єкт дослідження – процес продовження призначених ресурсів (термінів служби).

Предмет дослідження – моделі та методи оцінки безвідмовності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом під час вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби).

Методи досліджень. Для досягнення поставленої в роботі мети використано методи дослідження на основі системного підходу з застосуванням математичних моделей і методів дискретної математики,

математичної статистики, теорії ймовірностей, теорії надійності. Для виявлення наукового завдання використано системний підхід. Методика проведення експерименту та перевірки достовірності розроблених наукових положень реалізована на основі методів комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що в дисертаційній роботі:

удосконалено метод оцінки показників безвідмовності обладнання ЗРМТ, який на відміну від існуючих враховує те, що на зразках обладнання ЗРМТ послідовно виконуються відповідні етапи підконтрольної експлуатації та базується на комплексному використанні взаємопов'язаних часткових методів: методу обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на надійність; методу планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність; методу розрахунково-експериментальної оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби) обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом з використанням результатів підконтрольної і лідерної експлуатації і випробувань на надійність. Використання методу дозволяє покращити достовірність оцінки залишкового ресурсу при експлуатації за технічним станом з метою індивідуального вирішення завдань продовження призначених ресурсів обладнання;

удосконалено метод обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом на надійність, який на відміну від відомих, розроблених для дослідних або виготовлених зразків обладнання ЗРМТ, передбачає вирішення комплексу завдань:

- уточнення номенклатури показників надійності зразків обладнання ЗРМТ і обґрунтування гранично допустимих значень їх показників безвідмовності;
- обґрунтування стратегій випробувань зразків обладнання ЗРМТ по кожному з показників надійності, що контролюються (оцінюються);

– обґрунтування вимог до точності і достовірності результатів випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність;

удосконалено математичні моделі випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність, які призначені для визначення ймовірності влучення з початку координат в будь-яку досяжну точку з урахуванням форм областей відповідності і невідповідності контрольованих показників безвідмовності встановленим вимогам; співвідношення для визначення величин ризику споживача; середній тривалості випробувань. Розроблені математичні моделі узагальнюють відомі моделі випробувань технічних об'єктів за показником надійності типу “ймовірність” і “наробіток”, та на відміну моделей послідовних випробувань без урахування апіорної інформації і моделей одноступеневих випробувань з використанням байесовського підходу до обліку апіорної інформації, описують процес замкнутих випробувань будь-якого типу на безвідмовність з використанням байесовського підходу до обліку апіорної інформації про величину показників безвідмовності, накопичену за даними підконтрольної експлуатації зразків обладнання ЗРМТ. Дані моделі використовуються при обґрунтуванні параметрів планів випробувань обладнання ЗРМТ з метою ухвалення рішень про відповідність (невідповідність) величин показників безвідмовності встановленим вимогам із заданою достовірністю, а у разі ухвалення рішення про відповідність – кількісної оцінки його величини із заданою точністю. Точкові оцінки показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ і їх дисперсії, розраховані за результатами випробувань на безвідмовність, використовуються для побудови регресійної моделі зміни цих показників безвідмовності і обчислення оцінок показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення одержаних результатів в тому, що їх реалізація доцільна при вирішенні завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) як окремого обладнання, так і судна в цілому. Застосування запропонованих моделей і

методів дозволяє підвисити достовірність визначення нових призначених ресурсів (термінів служби) до 25 %. При цьому, за результатами математичного моделювання, можливе підвищення ймовірності виконання безвідмовного судноводіння до 15 % за рахунок впровадження на практиці.

Результати дисертаційних досліджень реалізовані у судноплавній компанії «Odessa marine agency Odemara LTD» (акт впровадження від 04.03.2024 р.), а також в навчальному процесі Державного університету інфраструктури та технологій, факультету експлуатації технічних система на водному транспорті на кафедрі суднових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації при викладанні дисциплін «Суднові системи та пристрої» і «Технічне обслуговування та ремонт суднових технічних засобів» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт (акт впровадження від 28.02.2024 р. № 186/01-11).

Наведені нові науково-обґрунтовані практичні рекомендації щодо визначення нових призначених ресурсів (термінів служби) як окремого обладнання, так і судна в цілому дозволяють розглянути можливість використання даних підходів у інших системах транспортних засобів, а також значно покращити систему технічної експлуатації судна за рахунок планування та своєчасного проведення відповідних заходів.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційних досліджень отримані автором особисто. В роботах, опублікованих у співавторстві, автору належить: у [1] наведено часткове завдання дослідження, проведений аналіз та наведено особливості розроблення методів поліпшення екологічних показників засобів річкового транспорту; у [2] наведено часткове завдання дослідження та обґрунтування актуальності прогнозування технічного стану обладнання суден; у [3] наведено актуальне наукове завдання дослідження та результати аналізу моделей та алгоритмів процесу керування рухом судна; у [4] визначені напрями впровадження системи технічної експлуатації за станом; у [5, 6, 11] проаналізовано методи

підвищення безпеці судноводіння, у тому числі за рахунок удосконалення моделей та методів оцінки безвідмовності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом під час вирішення завдань продовження термінів служби; у [7] наведено особливості удосконалення методу оцінювання показників надійності обладнання засобів водного транспорту; у [8] наведено методика планування випробувань зразків обладнання засобів водного транспорту на безвідмовність; у [9] наведено ергатичні аспекти підготовці моряків до особистої безпеки та боротьби за живучість судна; у [10] наведено алгоритм моделі інтелектуальної системи керування судном для підвищення безпеці судноводіння; у [12] проведено формалізація процесу відновлення устаткування засобів водного транспорту.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, які отримані у ході виконання дисертаційної роботи, доповідалися на одинадцятій міжнародній науково-технічній конференції 8 – 9 квітня 2021 р. (Баку – Харків – Київ – Жиліна), III та IV Міжнародній науково-практичній морській конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету, 2021, 2022 р.р., а також на засіданнях кафедри суднових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації ДУІТ.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи відображені у 1 наукових працях, серед них: 6 статей, опублікованих особисто та у співавторстві у збірниках наукових праць, що входять до переліку видань, фахових видань України, 1 розділ у колективної монографії, 3 доповідей матеріалів науково-технічній конференції.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація загальним обсягом 167 сторінок машинописного тексту складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел з 134 найменувань. Дисертація містить 28 рисунки. Ілюстрації, таблиці, перелік використаних джерел та додаток займають 12 сторінок тексту.

РОЗДІЛ 1

ЗАДАЧА ВДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ І МЕТОДІВ ОЦІНКИ БЕЗВІДМОВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ЗРМТ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ

1.1. Аналіз надійності засобів водного транспорту в умовах експлуатації за технічним станом

Офіційна інформація, яку надає Державна служба України з безпеки на транспорті за 2010 – 2021 роки дозволила оцінити аварійність на водному транспорті (рис.1.1) [7-9, 89, 95, 96].

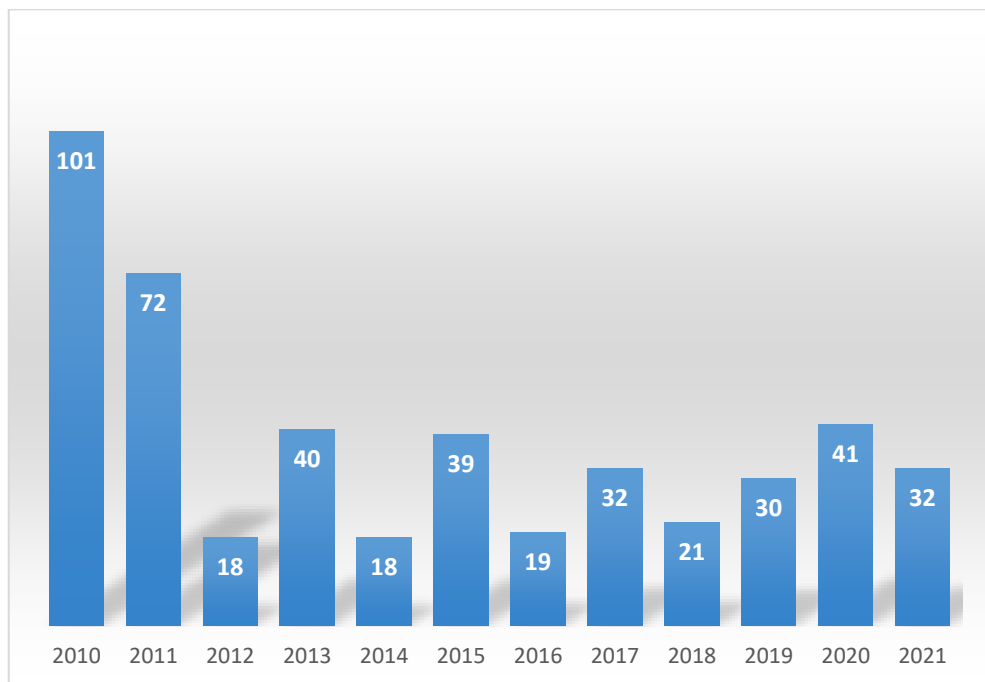


Рисунок 1.1 – Аварійність засобів водного транспорту в 2010-2021 роках

Наприклад, цитата зі Звіту Голови морської адміністрації України за 2020 рік [96]: «...Загальна кількість аварійних подій, що сталися протягом 2020 року, у порівнянні з 2019 роком збільшилась на 13 аварійних подій (+43%). При цьому слід зазначити, що кількість загиблих та зниклих безвісти

зменшилась на 12 осіб (-60%), а кількість травмованих зменшилась також на 12 осіб (-75%)».

Причини аварійних подій надані на рисунку 1.2 [96].

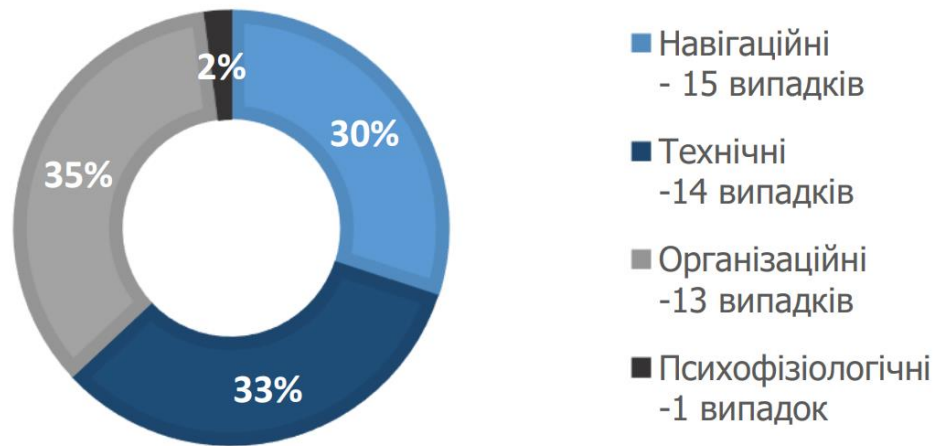


Рисунок 1.2 – Причина аварійності засобів водного транспорту

За статистикою у *процентному співвідношенні* аварійні події по видах транспорту розподіляються так, як показаний на рисунку 1.3 [96].



Рисунок 1.3 – Аварійні події за типом суден у 2020 році

За останні роки існує тенденція збільшення частки фактору „технічних причин”.

Таким чином, аналіз стану безпеки руху засобів морського та водного транспорту України дозволяє зробити висновок про те, що проблема забезпечення безаварійності на морському і річковому транспорті залишається актуальною. При вирішенні цього значна роль належить забезпеченню надійності, а саме, безвідмовності технічних засобів.

1.2. Аналіз існуючого науково-методичного апарату оцінки показників надійності обладнання ЗРМТ для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) в умовах експлуатації за технічним станом

Характерною особливістю стратегії ТЕ і Р за станом є те, що в процесі експлуатації здійснюється контроль граничного (технічного) стану конкретного об'єкту для своєчасного ухвалення рішень про необхідність проведення ремонту і його об'єм. При цьому здійснюється контроль і оцінка показників надійності обладнання ЗРМТ, зниження величини яких за межі встановлених норм є одним з ознак переходу цих об'єктів в граничний стан. До таких показників надійності відносяться: показники залишкового ресурсу (залишкового терміну служби), за величиною яких приймається рішення про доцільність індивідуального продовження призначених ресурсів (термінів служби) відповідних об'єктів; показники безвідмовності, результати контролю яких використовуються при ухваленні рішення про граничний стан об'єктів, що контролюються.

Проведемо аналіз відомих моделей і методів оцінки показників надійності - залишкового ресурсу (терміну служби) і показників безвідмовності для оцінки можливості їх застосування при вирішенні завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) обладнання ЗРМТ в умовах експлуатації за технічним станом.

Під залишковим ресурсом (терміном служби) розуміється величина сумарного наробітку (календарної тривалості експлуатації) об'єкту від

моменту ϕ контролю його технічного (граничного) стану до переходу в граничний стан при встановлених режимах і умовах експлуатації. Величина залишкового ресурсу (терміну служби) є випадковою величиною. В якості показників залишкового ресурсу (терміну служби) використовуються числові характеристики [1,2,22 та ін.]: середній залишковий ресурс $t_{\text{ост}}(\tau)$ (середній термін служби $T_{\text{ост}}(\tau)$); гамма-відсотковий залишковий ресурс $t_{\text{ост},\gamma}(\tau)$ (гамма-відсотковий термін служби $T_{\text{ост},\gamma}(\tau)$). Під середнім залишковим ресурсом $t_{\text{ост}}(\tau)$ (термін служби $T_{\text{ост}}(\tau)$) об'єкту розуміється математичне сподівання залишкового ресурсу (терміну служби) об'єкту. Відповідно до визначення величина середнього залишкового ресурсу $t_{\text{ост}}(\tau)$ об'єкту визначається за формулою [43,57]

$$t_{\text{ост}}(\tau) = \frac{1}{P(\tau)} \int_{\tau}^{\infty} P(x) dx, \quad (1.1)$$

де $P(x)$ - ймовірність безвідмовної роботи до ресурсної відмови протягом наробітку x .

Під гамма-відсотковим залишковим терміном служби $t_{\text{ост},\gamma}(\tau)$ (терміном служби $T_{\text{ост},\gamma}(\tau)$) об'єкту розуміється сумарний наробіток (календарна тривалість експлуатації), протягом якого об'єкт, що експлуатується у встановлених режимах і умовах експлуатації, не досягне граничного стану з ймовірністю γ , вираженою у відсотках. Величина гамма-відсоткового залишкового ресурсу визначається як корінь $t_{\text{ост},\gamma}(\tau)$ з рівняння [3,4]

$$\frac{P(t_{\text{ост},\gamma}(\tau))}{P(\tau)} = 0,01\gamma; \quad 0 < \gamma < 100\% . \quad (1.2)$$

Показники середній залишковий ресурс $t_{\text{ост}}(\tau)$ (середній термін

служби $T_{\text{ост}}(\tau)$) і гамма-відсотковий залишковий ресурс $t_{\text{ост},\gamma}(\tau)$ (гамма-відсотковий термін служби $T_{\text{ост},\gamma}(\tau)$) об'єкту є узагальненням показників довговічності ДСТУ - середній ресурс (середній термін служби) і гамма-відсотковий ресурс (гамма-відсотковий термін служби) об'єкту, отже

$$t_{\text{ост}}(0) = \int_0^{\infty} P(x) dx; \quad t_{\text{ост}}(\tau) = t_{\gamma}. \quad (1.3)$$

Відомі в науково-технічній літературі методи оцінки показників довговічності і, зокрема, показників залишкового ресурсу (терміну служби), можуть бути розділені на *параметричні* та *непараметричні*. При цьому параметричні методи [26,36,40-42,63,68,69,92,109,110-132] застосовують в припущенні, що вид функції розподілу наробітку (тривалість експлуатації) об'єктів до ресурсної відмови (граничного стану) відомий заздалегідь, а її параметри встановлюються за достатньо великим обсягом результатів експлуатації вибірок однорідних об'єктів. В той же час автори застосовують непараметричні методи в припущенні невідомого виду функції розподілу цього наробітку, проте для забезпечення прийнятної точності оцінок показників об'єм експлуатаційних спостережень однорідних об'єктів повинен бути ще більше. Ці обставини ускладнюють застосування вищезазначених методів для індивідуального вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби).

В основі робіт по оцінці показників довговічності зразків обладнання ЗРМТ у відповідних організаціях використовувалися розрахунково-експериментальні методи оцінки доремонтних і міжремонтних ресурсів (термінів служби), суть яких зводиться до наступного. За даними експлуатації лідерних виробів і тривалої підконтрольної експлуатації засобів вибірки однотипного обладнання ЗРМТ різних років випуску проводиться експериментальна оцінка щільності розподілу наробітку до відмов груп

однотипних комплектуючих елементів у вигляді суперпозиції трьох щільностей розподілу

$$f_i(t) = c_{i1}f_{i1}(t) + c_{i2}f_{i2}(t) + c_{i3}f_{i3}(t); i = \overline{1, N_{\text{к.э.}}}, \quad (1.4)$$

де c_{ij} – вагові коефіцієнти, що характеризують частку відмов групи однотипних комплектуючих елементів i -го типу з j -ої причини, при цьому

$$\sum_{j=1}^3 c_{ij} = 1;$$

$f_{ij}(t)$ – щільність розподілу наробітку до відмов групи однотипних комплектуючих елементів i -го типу під впливом виробничих дефектів ($f_{i1}(t)$), випадкових експлуатаційних навантажень ($f_{i2}(t)$) та старіння ($f_{i3}(t)$) відповідно;

$N_{\text{к.э.}}$ – кількість однотипних груп комплектуючих елементів.

Відмови, які обумовлені виробничими дефектами, запропоновано описувати з використанням розподілу Вейбулла або експоненціальним з параметром λ_{i1} . Відмови, обумовлені старінням, – нормальним розподілом з математичним сподіванням μ_{i3} і середньоквадратичним відхиленням σ_{i3} або розподілом Вейбулла, а відмови, обумовлені дією випадкових експлуатаційних навантажень – експоненціальним розподілом з параметром λ_{i2} . Отже, побудована таким чином щільність розподілу наробітків комплектуючих елементів до відмов є усередненою за всією безліччю однотипних комплектуючих елементів в кожному функціональному вузлу, системі та за вибіркою однотипних виробів.

Наступним кроком, з урахуванням структурної схеми надійності зразків обладнання ЗРМТ за відомою щільністю розподілу наробітків до відмов груп однорідних комплектуючих елементів (1.4), розраховуються залежності параметрів потоків відмов $\omega_i(t)$ цих груп від сумарного наробітку і визначається залежність нестационарного коефіцієнта оперативної готовності

$$K_{or}(t, t_p) = \left[1 + \sum_{i=1}^{N_{K.э.}} T_{Bi} \omega_i(t) \right]^{-1} \times \exp \left[-t_p \sum_{i=1}^{N_{K.э.}} \omega_i(t) \right], \quad (1.5)$$

де T_{Bi} – середній час відновлення i - ой групи однорідних комплектуючих елементів;

t_p – тривалість роботи;

t – сумарний наробіток зразків обладнання ЗРМТ.

За відомою гранично допустимою величиною $K_{ог.нд}$ і отриманій залежності $K_{ог}(t, t_p)$ визначаються показники довговічності зразків обладнання ЗРМТ як вирішення нерівності $K_{ог}(t, t_p) \geq K_{ог.нд}$. Для приведення коефіцієнта $K_{ог}$ до календарних одиниць часу використовується формула [43,94]:

$$K_{or}(t_K, t_{б.р.}) = \left[1 + \frac{1}{K_{Вик}} \sum_{i=1}^{N_{K.э.}} T_{Bi} \omega_i(t_K) \right]^{-1} \times \exp \left[-\frac{t_{б.р.}}{K_{Вик}} \sum_{i=1}^{N_{K.э.}} \omega_i(t_K) \right], \quad (1.6)$$

де $K_{Вик}$ – коефіцієнт використання апаратури зразків обладнання ЗРМТ під електричним навантаженням (для обладнання ЗРМТ $K_{Вик} \sim 0,08, 0,12$);

t_K – календарна тривалість експлуатації.

Крім того, співвідношення (1.4 – 1.6) отримані в припущенні, що всі комплектуючі елементи різних функціональних систем зразків обладнання ЗРМТ знаходяться однаковий час під навантаженням, а відоме співвідношення для визначення нестационарного коефіцієнта оперативної готовності замінено наближеним для стаціонарного коефіцієнта оперативної готовності. Отримані таким чином величини оцінок показників довговічності зразків обладнання ЗРМТ є наближеними і усередненими за великою

вибіркою комплексів і можуть бути використані для визначення призначених ресурсів (термінів служби) для всього парку зразків обладнання ЗРМТ. При цьому похибки оцінок показників довговічності не визначаються і не враховуються.

Інший варіант рішення задачі уточнення призначених ресурсів (термінів служби) зразків обладнання ЗРМТ запропонований в [58,75]. Суть його полягає в наступному:

а) для вибірки зразків обладнання ЗРМТ, що досягли граничного стану, формується впорядкований варіаційний ряд: $T_1 < T_2 < \dots < T_i < \dots < T_{N_{вб}}$, де T_i термін служби i -го зразка; $N_{вб}$ - об'єм вибіркової сукупності;

б) визначається їх емпірична функція розподілу $F_E(t)$ і залежність $P_E(t)$ "ймовірності збереження неграничного стану зразка обладнання ЗРМТ" протягом часу t його експлуатації $P_E(t) = 1 - F_E(t)$;

в) за знайденою функцією розподілу тривалості експлуатації зразка обладнання ЗРМТ до ресурсної відмови $F_E(t)$ для зразка обладнання ЗРМТ знаходиться гамма -відсотковий термін служби за співвідношенням

г) розраховується одnobічний довірчий інтервал "ймовірності збереження неграничного стану зразка обладнання ЗРМТ" шляхом вирішення рівняння Клоппера-Пірсона

$$1 - \alpha = \sum_{K=0}^{\eta(t)} C_{N_{вб}}^K \times \left(P_H(\alpha, t) \right)^{N_{вб} - K} \times \left(1 - P_H(\alpha, t) \right)^K,$$

де $\eta(t) = F_{\alpha}(t) \cdot N_{вб}$;

α - величина довірчої ймовірності для заданої тривалості експлуатації t ;

д) визначається уточнений призначений термін служби $T_{сл.ну}$ зразка обладнання ЗРМТ за співвідношенням

$$T_{\text{сл.ну}} = \max \{t \mid P_i(\alpha, t) \geq \gamma\}, \text{ якщо } T_{\text{сл.ну}} - \tau \geq T_d;$$

де τ – первинний призначений термін служби зразка обладнання;

T_d – мінімальна практично значуща величина продовження призначеного терміну служби.

Недоліками цієї методики є те, що не встановлені механізм і точність визначення моментів виникнення ресурсних відмов вибірки зразків обладнання ЗРМТ; для вирішення завдання оцінки показників довговічності обладнання ЗРМТ з побудовою емпіричної функції розподілу тривалості експлуатації (наробітку) зразків обладнання ЗРМТ до ресурсних відмов потрібний достатньо великий об'єм статистичних даних про зразки обладнання ЗРМТ, що перейшли в граничний стан, що, у свою чергу, вимагає тривалої експлуатації обладнання ЗРМТ для збору такої статистики; результати рішення задачі уточнення термінів служби зразків обладнання ЗРМТ є усередненими за великою вибіркою відповідних виробів.

На практиці застосування параметричних методів стосовно зразків обладнання ЗРМТ дуже обмежене, оскільки вид функції розподілу наробітку (тривалість експлуатації) об'єктів до ресурсної відмови (граничного стану), як правило, невідомий, а інформації, з використанням якої його можна було б встановити, недостатньо і, крім того, ця функція розподілу є характеристикою надійності парку зразків обладнання і не може бути ефективно використана при індивідуальному вирішенні завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби).

У [41-42,109] запропоновано рішення задачі індивідуального прогнозування технічного стану і подальшої оцінки показників безвідмовності рідка контрольованих технічних виробів з урахуванням режимів і умов їх експлуатації, яка на відміну від інших володіє наступними особливостями: велика вибірка рідка контрольованих виробів; неможливість локалізації моментів виникнення відмов. Для її вирішення розроблена модель надійності рідка контрольованих технічних виробів у вигляді множинної

регресійної залежності:

$$\lambda(\varepsilon, t) = \sum_{i=0}^d b_i(\varepsilon) t^i, \quad (1.7)$$

де $\lambda(\varepsilon, t)$ - інтенсивність відмов;

t - тривалість експлуатації або “вік” виробу;

d - ступінь апроксимуючого полінома;

$b_i(\varepsilon)$ - багатofакторний регресійний поліном вигляду

$$\begin{aligned} b_i(\varepsilon) = & b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \times f_i + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 > i_1}^n b_{i_1 i_2} \times f_{i_1} \times f_{i_2} + \dots + \\ & + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 > i_1}^n \dots \sum_{i_d > i_{d-1}}^n b_{i_1, i_2, \dots, i_d} \times f_{i_1} \times f_{i_2} \times \dots \times f_{i_d}, \end{aligned}$$

де (f_1, f_2, \dots, f_n) - набір чисельних значень чинників, задаючих режим експлуатації ε ;

b_{i_1, i_2, \dots, i_d} - коефіцієнт, що характеризує ступінь впливу на інтенсивність відмов взаємодії чинників.

В якості чинників в регресійній моделі надійності визначені: середнє число вмикань-вимикань за даний період експлуатації; середній наробіток під струмом протягом даного періоду експлуатації; середній час знаходження в різних режимах зберігання; середня дальність транспортування і інші. Для оцінки параметрів регресійної моделі надійності (1.7) в [29,37,38] запропонована сумісна обробка даних результатів контролів технічного стану всіх технічних виробів, з урахуванням їх режимів і умов експлуатації. При цьому встановлюється поліноміальна багатofакторна модель безвідмовності виробів конкретного типу. Далі, для індивідуальних режимів експлуатації конкретних виробів і відомої моделі вирішується завдання індивідуального прогнозування технічного стану конкретних зразків.

Даний підхід може бути застосований для вирішення завдання оцінки показників довговічності і продовження призначених ресурсів (термінів служби) окремих функціональних вузлів, складових частин зразків обладнання ЗРМТ, відповідних вищезазначеним особливостям. Проте при вирішенні аналогічної задачі для зразків обладнання ЗРМТ застосування даного підходу недоцільне, оскільки модель надійності будується для інтенсивності відмов, тобто для невідновлювальних виробів, а досліджуваний об'єкт (зразок обладнання ЗРМТ) є відновлюваним; модель надійності будується для рідко контрольованих виробів, наприклад, радіостанцій, а зразки обладнання ЗРМТ контролюються часто (в порівнянні з швидкістю зміни безвідмовності відповідних зразків обладнання), тобто за результатами їх експлуатації є можливість побудови моделей зміни показників безвідмовності в області їх допустимих значень на етапах підконтрольної експлуатації і контролю граничного стану; для побудови багатофакторної регресійної моделі безвідмовності потрібні вибірки великого об'єму, а парк зразків обладнання ЗРМТ певного типу в Україні обмежений.

Таким чином, відомий науково-методичний апарат оцінки показників довговічності (показників залишкового ресурсу (терміну служби)) не можуть бути ефективно використані для індивідуального вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) зразків обладнання ЗРМТ, оскільки: розроблені, як правило, для використання регламентованих стратегій експлуатації і планового ремонту зразків обладнання ЗРМТ і застосовуються для парку відповідних однотипних зразків; недостатньо повно враховують індивідуальні особливості умов і режимів експлуатації конкретних зразків обладнання ЗРМТ і особливості відповідних зразків обладнання як об'єктів випробувань на надійність і об'єктів продовження призначених ресурсів (термінів служби).

Значне зниження витрат на ТЕ і Р обладнання ЗРМТ може бути досягнуте шляхом індивідуального рішення задачі уточнення призначених

ресурсів (термінів служби) конкретних зразків обладнання ЗРМТ (груп однорідних зразків обладнання, тобто однотипних зразків обладнання однакових років випуску та таких, що експлуатуються в однакових умовах і режимах експлуатації) з урахуванням їх фактичного технічного стану і надійності при переведенні їх на експлуатацію за технічним станом.

Це, у свою чергу, передбачає вирішення ряду завдань, таких як проведення контролю граничного стану обладнання ЗРМТ на місцях експлуатації, а, у разі ухвалення рішення про неграничний стан, оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби) обладнання ЗРМТ з урахуванням конкретних режимів і умов їх експлуатації, ступеню впливу цих режимів і умов експлуатації на стан зразків обладнання для обґрунтованого ухвалення рішення про можливість подальшої експлуатації (необхідності проведення відповідного ремонту, списання) і тощо. Для вирішення завдання оцінки цих показників необхідне застосування розрахунково-експериментальних методів, які передбачають розрахунок шуканих показників, у тому числі і показників залишкового ресурсу (терміну служби), за початковими даними, що визначаються експериментальними методами.

Експериментальні методи контролю і оцінки показників надійності та, зокрема, показників безвідмовності засновані на використанні статистичних даних, що отримуються при проведенні випробувань зразків обладнання ЗРМТ на надійність та (або) даних підконтрольної експлуатації. Характерною особливістю контролю показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ при вирішенні завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) під час експлуатації за технічним станом є те, що у разі його позитивного результату - "об'єкт в неграничному стані" - необхідна кількісна оцінка показника безвідмовності, що контролюється, із заданою точністю для подальшої оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби).

Основними вимогами до методів контролю і оцінки показників надійності є вимоги [75,90,91]: до економічності випробувань (мінімізація вартості або об'ємів випробувань); до точності і достовірності результатів

контролю та оцінки надійності; до чіткості і однозначності правил ухвалення рішень і тощо. Вимоги до точності і достовірності контролю надійності і економічності (мінімізації вартості) випробувань на надійність є суперечливими, що призводить до необхідності пошуку розумного компромісу. Як правило, при цьому до величини одних вимог задаються обмеження, а інші - оптимізуються відповідно до заданого критерію.

В теорії і практиці контролю показників надійності технічних виробів відомі наступні методичні підходи до планування випробувань на надійність [40,41,43,57,92,109 та ін.]: завдання в якості вихідних даних двох рівнів показників надійності (приймального R_α і бракування R_β) та двох ризиків - постачальника α і споживача β , тобто застосування так званого контролю за двома рівнями; завдання в якості вихідних даних одного рівня показника надійності (гранично допустимого або потрібного $R_{тр}$) та одного ризику - ризику споживача β , тобто застосування так званого контролю за одним рівнем.

Застосування дворівневого підходу на практиці зустрічає певні методичні труднощі, обумовлені відсутністю чітких методичних рекомендацій за завданням величин R_α , R_β , що, в свою чергу, обумовлено відсутністю встановленого взаємозв'язку між ними і гранично допустимим (необхідним) значенням показника надійності, на підставі якого приймається рішення про відповідність об'єкта випробувань встановленим вимогам. Рекомендовано [43] розміщувати інтервал $[R_\alpha, R_\beta]$ відносно значення $R_{тр}$, з урахуванням збитку при прийнятті помилкових рішень за результатами контролю. Так, якщо збиток споживача можливо порівняти зі збитком постачальника, інтервал $[R_\alpha, R_\beta]$ доцільно розміщувати таким чином, щоб значення оперативної характеристики плану контролю в цій точці було близьким до 0,5. Якщо ж величина збитку одного боку перевищує величину збитку іншої, інтервал $[R_\alpha, R_\beta]$ рекомендується зміщувати, наближаючи

відповідний рівень показника надійності до $R_{тр}$ практично до повного їх поєднання ($R_{\alpha} = R_{тр}$ або $R_{\beta} = R_{тр}$).

Вищенаведені обставини характеризують труднощі використання методів, що рекомендовані нормативно-технічною документацією [45,47,51] і інших розроблених методів контролю показників надійності за двома рівнями (одноступеневий, двоступеневий, багатоступеневий, послідовний, послідовний усічений, з використанням довірчих меж) [46,61] та їх модифікацій (потрійний послідовний, оптимальний узагальнений послідовний і інші) [71,109]. Різноманіття наведених методів контролю надійності обумовлене прагненням до зниження потрібних об'ємів випробувань при забезпеченні заданих вимог до достовірності контролю надійності.

Нормативними документами [50,49,77-88] передбачений контроль надійності об'єктів, заснований на завданні одного (потрібного) рівня ПН $R_{тр}$, і одного ризику - ризику споживача β . Недоліком контролю надійності за одним рівнем є підвищена (в порівнянні з контролем надійності за двома рівнями) можливість помилкового визнання об'єкту випробувань з прийнятним рівнем надійності як непридатного. Тому, при використанні контролю надійності за одним рівнем, рекомендується оцінювати спостережуваний ризик постачальника α для підтвердження правильності ухваленого рішення. При цьому відомі деякі варіанти методів контролю надійності за одним контрольним рівнем. Так, наведена в [43] одноступенева схема контрольних випробувань передбачає фіксацію їх об'єму до початку проведення і не допускає його зміну залежно від отримуваних проміжних результатів випробувань. Представлена в [58,94] двоступенева процедура контролю за одним рівнем вже передбачає зміну об'єму контрольних випробувань в процесі їх проведення залежно від отриманих проміжних результатів випробувань на першій ступені. Проте розгляд контролю показника надійності за одним рівнем цим і обмежується.

До недоліків вищерозглянутих методів контролю безвідмовності, що ускладнюють їх використання для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) зразків обладнання ЗРМТ, відносяться: використання методів із заздалегідь фіксованим об'ємом вибірки при випробуваннях обладнання ЗРМТ на безвідмовність недоцільно, оскільки не передбачається коректування об'ємів випробувань в процесі їх проведення в залежності від проміжних результатів; відомі процедури планування послідовних контрольних випробувань і їх модифікації розглянуті, як правило, для контролю надійності за двома рівнями, не враховують апіорну інформацію про величину контрольованого показника безвідмовності і не передбачають, у разі позитивного результату контролю, його подальшу оцінку із заданою точністю.

Результати проведеного аналізу свідчать про необхідність удосконалення математичних моделей випробувань на безвідмовність з урахуванням вищенаведених особливостей. Перспективними з погляду мінімізації вартості (тривалості) випробувань на безвідмовність при експлуатації зразків за технічним станом представляються послідовні методи контролю надійності і їх модифікації [54,62,64,110-132]. Також доцільна розробка математичних моделей, що описують процес випробувань на безвідмовність, з урахуванням апіорної інформації про результати експлуатації зразків обладнання ЗРМТ.

Уточнення в процесі тривалої експлуатації вимог до показників ефективності обладнання ЗРМТ та, відповідно, до величини показників безвідмовності його засобів, необхідність зменшення ймовірності виникнення помилок при ухваленні рішень за наслідками випробувань на безвідмовність і, як наслідок, до підвищення достовірності ухвалення рішень на продовження призначеного ресурсу (терміну служби) обладнання ЗРМТ і його відповідних зразків, або про виведення їх в ремонт, свідчать про необхідність обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність.

Таким чином, застосування відомого науково-методичного апарату контролю і оцінки показників надійності при індивідуальному вирішенні завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом не ефективно, оскільки ними передбачається роздільне вирішення завдань контролю і оцінки показників надійності технічних виробів, що пов'язане із значними сумарними витратами на організацію випробувань обладнання ЗРМТ окремо на безвідмовність і на довговічність, недостатньо повним обліком апріорної інформації про величини показників надійності, значним витрачанням ресурсу об'єктів випробувань, а також унаслідок труднощів виділення декількох однорідних зразків обладнання ЗРМТ в якості об'єктів для випробувань на довговічність унаслідок істотних відмінностей в умовах і режимах їх попередньої експлуатації.

1.3. Постановка наукового завдання

Вищенаведені обставини призводять до необхідності взаємопов'язаного вирішення сукупності завдань контролю і оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ на основі сумісної обробки результатів підконтрольної експлуатації і випробувань на безвідмовність. Так, проведенню контролю і оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ повинне передувати планування їх випробувань, для здійснення якого, у свою чергу, необхідно обґрунтовувати відповідні початкові характеристики. Сукупність накопичених оцінок показників безвідмовності може бути використана при побудові залежностей зміни величин показників безвідмовності в процесі експлуатації для їх прогнозування на майбутньому інтервалі експлуатації і, відповідно, оцінювання показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ.

Вищевикладене свідчить про актуальність сформульованого наукового

завдання дисертації, яке полягає в удосконаленні моделей та методів оцінки безвідмовності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом під час вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби).

Рішення цього завдання зводиться до вирішення наступних взаємозв'язаних часткових завдань.

1. Аналіз зразків обладнання ЗРМТ як об'єктів випробувань на надійність, науково-методичного апарату контролю і оцінки їх показників надійності.

2. Удосконалення методу оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) в умовах експлуатації за технічним станом.

3. Удосконалення методу обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на надійність з уточненням номенклатури і обґрунтуванням величин нормованих показників надійності, стратегій випробувань і вимог до якості їх результатів.

4. Розробка математичних моделей випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність та удосконалення методу планування їх випробувань з урахуванням накопиченої апріорної інформації.

5. Удосконалення методу розрахунково-експериментальної оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ за результатами підконтрольної і лідерної експлуатації і випробувань на надійність, методу оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) в умовах експлуатації за технічним станом.

Послідовність сформульованих завдань визначає структуру і зміст дисертаційної роботи.

Висновки до розділу 1

1. Дослідження стану безпеки руху засобів морського та водного транспорту України дозволяє зробити висновок про те, що проблема забезпечення безаварійності на морському і річковому транспорті залишається актуальною. При вирішенні цього значна роль належить забезпеченню надійності, а саме, безвідмовності технічних засобів у умовах експлуатації за технічним станом.

2. Аналіз показав те, що застосування відомого науково-методичного апарату контролю і оцінки показників надійності при індивідуальному вирішенні завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом не ефективно, оскільки ними передбачається роздільне вирішення завдань контролю і оцінки показників надійності технічних виробів, що пов'язане із значними сумарними витратами на організацію випробувань обладнання ЗРМТ окремо на безвідмовність і на довговічність, недостатньо повним обліком апріорної інформації про величини показників надійності, значним витрачанням ресурсу об'єктів випробувань, а також унаслідок труднощів виділення декількох однорідних зразків обладнання ЗРМТ в якості об'єктів для випробувань на довговічність унаслідок істотних відмінностей в умовах і режимах їх попередньої експлуатації.

3. Доведена актуальність сформульованого наукового завдання дисертації, яке полягає в удосконаленні моделей та методів оцінки безвідмовності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом під час вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби). Рішення цього завдання зводиться до вирішення наступних взаємозв'язаних завдань: удосконалення методу оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) в умовах експлуатації за технічним станом; удосконалення методу обґрунтування початкових характеристик для

планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на надійність з уточненням номенклатури і обґрунтуванням величин нормованих показників надійності, стратегій випробувань і вимог до якості їх результатів; розробка математичних моделей випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність та удосконалення методу планування їх випробувань з урахуванням накопиченої апріорної інформації; удосконалення методу розрахунково-експериментальної оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ за результатами підконтрольної і лідерної експлуатації і випробувань на надійність, методу оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) в умовах експлуатації за технічним станом.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПОЧАТКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ ВИПРОБУВАНЬ ОБЛАДНАННЯ ЗРМТ

Нижче, відповідно до особливостей зразків обладнання ЗРМТ, як об'єктів контролю і оцінки показників надійності, розробляються загальні положення удосконаленого методу оцінки їх показників надійності для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) і один з його часткових методів - метод обґрунтування (або визначення) початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на надійність. Обґрунтування та визначення початкових характеристик проводиться з уточненням номенклатури і обґрунтуванням гранично допустимих величин нормованих показників надійності, обґрунтуванням стратегій випробувань і вимог до якості їх результатів. Основні результати, викладені, в розділі опубліковані в [11-21].

2.1. Удосконалення методу оцінки показників надійності обладнання ЗРМТ

Для успішної реалізації економічно вигідної стратегії ТЕ і Р зразків обладнання ЗРМТ за станом виконуються заходи з індивідуального вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби), яке, як було показано в розділі 1, повинно бути реалізованим в рамках Програми робіт по продовженню призначених ресурсів (термінів служби) з проведенням підконтрольної експлуатації і контролів граничного стану. На рис.2.1 приведений варіант реалізації підконтрольної експлуатації і контролю граничного стану зразків обладнання ЗРМТ, що виконуються відповідно до даної Програми. При розробці (удосконаленні) методу оцінки

показників надійності необхідно враховувати, що на зразках обладнання ЗРМТ послідовно виконуються відповідні етапи підконтрольної експлуатації та контролів граничного стану.

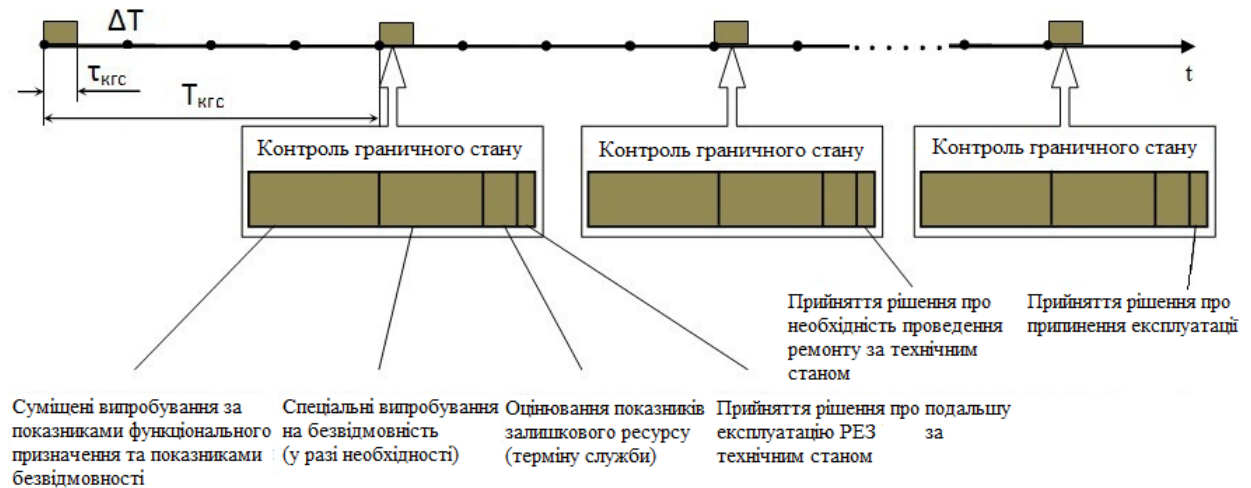


Рисунок 2.1 – Варіант реалізації підконтрольної експлуатації і контролю граничного стану зразків обладнання ЗРМТ

При цьому етапи підконтрольної експлуатації (рис.2.1) розподілені на інтервали фіксованої тривалості, а результати експлуатаційних спостережень за їх тривалість розглядаються як результати випробувань на безвідмовність. При проведенні контролів граничного стану передбачені [36,43,97-108] суміщені випробування за показниками функціонального призначення і показниками безвідмовності та, при необхідності, спеціальні випробування на безвідмовність, після закінчення яких, у разі ухвалення рішення про неграничний стан об'єкту, проводиться розрахунково-експериментальна оцінка показників залишкового ресурсу (терміну служби) з ухваленням рішення про подальшу експлуатацію зразків обладнання ЗРМТ з продовженням призначеного ресурсу (терміну служби) або, у разі ухвалення рішення про граничний стан, про припинення експлуатації, доцільності проведення ремонту встановленого виду або списання з утилізацією

встановленим порядком.

Для індивідуального вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) необхідно проводити експериментальну оцінку показників довговічності зразків обладнання ЗРМТ. У свою чергу, експериментальні дослідження з метою оцінки показників довговічності можна проводити: шляхом організації ресурсних випробувань; шляхом організації експлуатаційних спостережень або комбінованим методом, що використовує два вищеназвані напрями сумісно.

У розділі 1 показано, що на практиці процедура оцінки показників довговічності зразків обладнання ЗРМТ за результатами організації і проведення ресурсних випробувань або експлуатаційних спостережень важка через те, що відсутня статистика моментів переходів обладнання ЗРМТ і їх зразків в граничні стани і, як наслідок, відсутня вибірка значень ресурсів і термінів служби зразків обладнання ЗРМТ, що не дозволяє встановлювати закони розподілу цих випадкових величин; встановлення законів розподілу ресурсів і термінів служби зразків обладнання ЗРМТ розрахунково-експериментальним методом за відомими законами розподілу ресурсів і термінів служби комплектуючих виробів, визначеним за наслідками експлуатаційних спостережень, приводить до великих погрішностей унаслідок неможливості обліку умов і режимів експлуатації конкретних комплектуючих виробів у складі апаратури обладнання ЗРМТ, його зразків і їх складових частин і інших істотних допущень, прийнятих при розробці цього методу.

У зв'язку з цим оцінку показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ при мінімізації сумарних витрат на їх ТЕ і Р доцільно проводити комбінованим методом, використовуючи результати підконтрольної експлуатації і контролів граничного стану. При цьому в методі, що удосконалюється (або розробляється), необхідно передбачити вирішення наступних завдань: контролю і оцінки показників безвідмовності за результатами експлуатаційних спостережень за фіксовані інтервали

експлуатації і випробувань на безвідмовність, що проводяться в процесі контролю граничного стану; подальшої оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби).

З вищенаведеного і результатів аналізу зразків обладнання ЗРМТ як об'єктів випробувань на надійність, науково-методичного апарату контролю і оцінки їх показників надійності, проведеного в розділі 1, можливо зробити висновок, що в методі оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ, що розробляється (удосконалюється), необхідно передбачити вирішення наступної сукупності завдань: уточнення номенклатури нормованих показників надійності, що підлягають перевірці на відповідність встановленим вимогам при підконтрольній експлуатації і контролю граничного стану з метою ухвалення рішення про перебування у граничному (неграничному) стані обладнання ЗРМТ; обґрунтування вимог до величин контрольованих показників надійності зразків обладнання ЗРМТ і якості результатів експлуатаційних спостережень і випробувань на надійність; планування і проведення випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність з ухваленням рішення про відповідність (невідповідність) контрольованих показників безвідмовності встановленим вимогам; оцінювання показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ за результатами підконтрольної експлуатації і випробувань на надійність; ухвалення рішень про подальшу експлуатацію зразків обладнання ЗРМТ з продовженням призначених ресурсів (термінів служби) або про припинення їх експлуатації, доцільності проведення ремонту встановленого виду.

Вище перелічену сукупність завдань необхідно вирішувати в певній послідовності і взаємопов'язано. Так, проведенню контролю показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ повинне передувати планування відповідних випробувань з попереднім обґрунтуванням початкових характеристик. Контроль показників безвідмовності необхідно проводити в процесі підконтрольної експлуатації і контролю граничного стану. При

цьому, у разі ухвалення рішення про відповідність показників безвідмовності встановленим вимогам, доцільно додатково оцінювати величини показників безвідмовності. У подальшому за сукупністю накопичених статистичних даних про відмови зразків обладнання ЗРМТ і оцінок показників безвідмовності необхідно прогнозувати безвідмовність і оцінювати показники залишкового ресурсу (терміну служби) обладнання ЗРМТ, що, у свою чергу повинно бути враховано при обґрунтуванні параметрів планів випробувань на безвідмовність, що проводяться під час контролю граничного стану. Оскільки результати підконтрольної експлуатації і випробувань на безвідмовність повинні в подальшому спільно оброблятися з метою прогнозування безвідмовності і оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби), то методи контролю і оцінки показників безвідмовності, які використовуються при підконтрольній експлуатації і випробуваннях на безвідмовність та плани випробувань повинні бути взаємоузгодженими.

З вищенаведеного можливо зробити висновок, що в удосконаленому методі оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ необхідно врахувати наступні основні етапи:

- обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зі встановленням вимог до якості результатів експлуатаційних спостережень і випробувань;
- планування випробувань;
- проведення випробувань і отримання безпосередніх результатів;
- обробку результатів експлуатаційних спостережень і випробувань і ухвалення рішень.

Розглянемо детальніше зміст цих етапів.

Обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ включає: уточнення номенклатури показників надійності, що контролюються і оцінюються; техніко-економічне обґрунтування значень (норм) обраних показників надійності;

обґрунтування стратегій (типів планів) випробувань за кожним обраним показником надійності; обґрунтування вимог до якості результатів експлуатаційних спостережень і випробувань. У свою чергу, вимоги до показників якості результатів випробувань (експлуатаційних спостережень) встановлюються з обліком: можливості реалізувати запланований об'єм випробувань (експлуатаційних спостережень); величин втрат із-за недостатньої точності і достовірності результатів випробувань (експлуатаційних спостережень). Основними шляхами підвищення якості результатів випробувань (експлуатаційних спостережень) мають бути: розробка нових планів випробувань; використання апріорної інформації; оптимізація параметрів відомих і нових планів випробувань (експлуатаційних спостережень).

Організація випробувань на надійність залежить від великої кількості чинників, більшість з яких носить характер обмежень - технічних, економічних, інформаційних і інших. Це, у свою чергу, накладає відповідні обмеження на об'єм випробувань (експлуатаційних спостережень), що реалізуються. Оскільки випробування зразків обладнання ЗРМТ характеризуються високою вартістю і значною тривалістю, то для забезпечення необхідної якості результатів випробувань необхідно розробляти більш досконалі плани випробувань з використанням апріорної інформації і оптимізувати їх параметри.

Під плануванням випробувань розуміють [77-88] вибір плану випробувань і його параметрів, що забезпечують при заданих обмеженнях досягнення якнайкращого значення вибраного критерію оптимальності плану. Щоб спланувати випробування необхідно: на підставі певних “міркувань” вибрати тип плану випробувань (планування в широкому розумінні); для вибраного типу плану випробувань встановити його параметри (планування у вузькому розумінні). Відзначимо, що стратегія (тип плану) випробувань характеризується наступними чинниками: об'єм випробувань - кількість тих виробів, що піддаються випробуванням,

кількість дослідів або сумарний наробіток; зміст одиничного досвіду і ознака його закінчення; порядок проведення випробувань (з відновленням і (або) заміною зразків, що відмовили; без відновлення і (або) їх заміни); методи скорочення необхідного об'єму випробувань на підставі обліку апріорної інформації; ознаки (критерії) припинення випробувань; вирішальне правило - сукупність вказівок для висновку про надійність об'єкту за наслідками його випробувань. Тому при обґрунтуванні стратегії (типу плану) випробувань необхідно аналізувати сукупність вищенаведених чинників. Якісне обґрунтування стратегій (типів планів) випробувань приведене в підрозділі 2.2.

Хай мета випробувань на надійність “структурована” деякою цільовою функцією W , а π – є множина типів планів випробувань на надійність. Тоді вибір типу плану випробувань $\pi_i \in \pi$ зводиться до вирішення на множині обмежень $\Omega(\pi)$ наступного завдання

$$W(\pi) \rightarrow \text{extr} . \quad (2.1)$$

При цьому план π_i більш ефективний, ніж план π_j при заданих обмеженнях $\Omega(\pi)$ і цільовій функції $W(\pi)$, якщо $W(\pi_i) > W(\pi_j)$, за умови $W(\pi) \rightarrow \max$, або $W(\pi_i) < W(\pi_j)$, за умови $W(\pi) \rightarrow \min$. Якщо при заданих обмеженнях виконується умова $W(\pi_i) = W(\pi_j)$, то плани π_i і π_j є еквівалентними.

Вище було наведено, що метою проведення випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність є перевірка величин показників безвідмовності, що контролюються, на відповідність встановленим вимогам й, у разі позитивного результату, оцінювання цих показників із заданою точністю та (або) достовірністю. З урахуванням вимог до точності і достовірності контролю і оцінки показників надійності завдання (2.1) можна навести у вигляді $W(\pi) \rightarrow \text{extr}, \delta(\pi) \leq \delta_{\text{тр}}, \gamma(\pi) \geq \gamma_{\text{тр}}$, де $\delta_{\text{тр}}, \gamma_{\text{тр}}$ - задані

значення показників точності і достовірності при контролі (оцінці) показників надійності. Для скорочення множини π можуть бути використані рекомендації щодо вибору типів планів випробувань на надійність [43,57,110-132] і результати приведеного нижче аналізу.

Оскільки тривалість випробувань на надійність, як правило, велика, то для забезпечення реалізації запланованих об'ємів випробувань доцільно використовувати так звані суміщені випробування на надійність. При цьому, як правило, вибір плану випробувань на надійність обумовлений порядком проведення випробувань за показниками функціонального призначення. При необхідності передбачається проведення спеціальних випробувань на надійність. Обґрунтуванню початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ з контролю і оцінці їх показників надійності присвячений матеріал підрозділу 2.2.

Для знаходження параметрів плану випробувань вибраного типу необхідно використовувати відомі або, у разі їх відсутності, розробити нові співвідношення, що визначають взаємозв'язок характеристик точності і достовірності з результатами випробувань. Необхідність вдосконалення відомих математичних моделей випробувань на надійність для подальшого їх використання при обґрунтуванні параметрів планів випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність пов'язана з тим, що: відсутні математичні моделі процесів випробувань на надійність для сумісного вирішення завдань контролю і подальшої (при позитивних результатах контролю) оцінки показників безвідмовності об'єкту випробувань; відомі математичні моделі випробувань технічних об'єктів на надійність передбачають зниження витрат (часових, вартісних і інших) на проведення цих випробувань при виконанні вимог до точності і достовірності їх результатів, як правило, за рахунок переходу до багатоступеневої або послідовної схеми їх проведення без урахування апріорної інформації про величини показників надійності, або, при одноступеневої схемі проведення - за рахунок обліку апріорної інформації про величину показника надійності.

Тому доцільна розробка математичних моделей, що описують процес послідовних випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність з урахуванням апіорної інформації про величини показників безвідмовності, що контролюються, з подальшою оцінкою їх величини у разі позитивного результату контролю. Плани випробувань, усічені за тривалістю або кількістю відмов, допускають можливість значних відмінностей величин, які спостережуються, після закінчення проведення випробувань на надійність ризику постачальника і споживача від запланованих значень. Для забезпечення відповідності фактичних величин ризиків запланованим значенням розробляється імітаційна модель процесу випробувань на надійність. Вирішенню цих завдань присвячений розділ 3 дисертації.

Вирішення перерахованих вище завдань обґрунтування вимог до якості результатів випробувань на надійність, обґрунтування стратегій випробувань на надійність, обґрунтування параметрів планів випробувань і складання програми випробувань здійснюється, як правило, шляхом послідовних наближень з поверненням до вже пройдених етапів. При цьому рішення, що приймаються на першому етапі (обґрунтування вимог до точності і достовірності результатів випробувань), значно впливають на параметри планів випробувань, об'єм необхідних статистичних даних, величину витрат праці, часу, ресурсу об'єктів випробувань, загальну тривалість і вартість випробувань. Проте виявляються ці техніко-економічні характеристики лише на подальших етапах. Для обґрунтування вимог до точності і достовірності контролю і оцінки показників безвідмовності, в принципі, можна розробити підхід, що забезпечує однозначність і раціональність (оптимальність у певному значенні) рішень, що приймаються. Так, оптимальним можна рахувати рівень вимог, що мінімізує суму втрат від можливих помилок контролю і (або) оцінки показників надійності виробу і витрат на проведення випробувань. Якщо другий доданок можна визначити відносно просто, то перше визначити важко. Остаточний варіант значень вимог до точності і достовірності результатів випробувань, як правило, є компроміс між

прагненнями отримати результати порівняно високої якості і понизити витрати на підготовку і проведення випробувань.

У підрозділі 2.2 залежно від наявних початкових даних розглядаються різні варіанти обґрунтування вимог до точності і достовірності результатів випробувань на безвідмовність. У зв'язку з тим, що в процесі підконтрольної експлуатації передбачено неодноразове проведення контролів граничного стану (рис.2.1), то доцільно перед проведенням випробувань на безвідмовність уточнювати необхідні величини показників точності і достовірності їх результатів. Тому вирішення вищенаведених завдань пропонується проводити з використанням так званих “відкритих” процедур, що передбачають перегляд попередніх рішень про величини початкових характеристик і параметрів планів випробувань з урахуванням чергових отриманих результатів випробувань і підконтрольної експлуатації, що показано на блок-схемі удосконаленого методу оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ (рис.2.2).

Оскільки безвідмовність зразків обладнання ЗРМТ в процесі експлуатації змінюється, а вихід показників безвідмовності за межі встановлених вимог є одним з ознак переходу об'єктів в граничний стан, то оцінку показників залишкового ресурсу (терміну служби) обладнання ЗРМТ доцільно проводити з використанням залежностей зміни показників безвідмовності від параметрів, що характеризують ступінь їх зміни, наприклад, тривалість експлуатації, сумарний наробіток і тощо. Унаслідок того, що вигляд і кількість аргументів цих залежностей, як правило, невідомо, то потрібно їх встановлювати з використанням накопичених результатів експлуатаційних спостережень і випробувань на безвідмовність. Математичним апаратом, який може бути використаний для вирішення даного завдання, є методи множинного лінійного регресійного аналізу [46,60,66,67,73]. Виключення взаємозалежності аргументів (частину з них носять випадковий і неубиваючий характер зміни в часі) і облік нерівноточности оброблених результатів підконтрольної експлуатації і

випробувань на безвідмовність запропоновано здійснювати відповідно з використанням методів факторного аналізу і зважених методів оцінки невідомих коефіцієнтів регресійної моделі.

Побудовані моделі зміни показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ після перевірки їх якості запропоновано використовувати для прогнозування значень показників безвідмовності на майбутньому етапі експлуатації (рис.2.1) в припущенні, що умови і режими експлуатації на інтервалах спостереження і випередження істотно не розрізнятимуться. Оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби) обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом визначаються за відомими гранично допустимими значеннями показників безвідмовності і моделям зміни їх величин в процесі експлуатації.

Відповідно до вищенаведеного вирішення завдань контролю і оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для продовження їх призначених ресурсів (термінів служби) пропонується реалізовувати шляхом розробки (удосконалення) відповідного методу, до складу якого входять наступні часткові методи: метод обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на надійність; метод планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність; метод розрахунково-експериментальної оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби) обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом з використанням результатів підконтрольної і ліверної експлуатації і випробувань на надійність. Взаємозв'язок вищеназваних часткових методів і інших елементів в рамках удосконаленого методу показаний на рис.2.2.

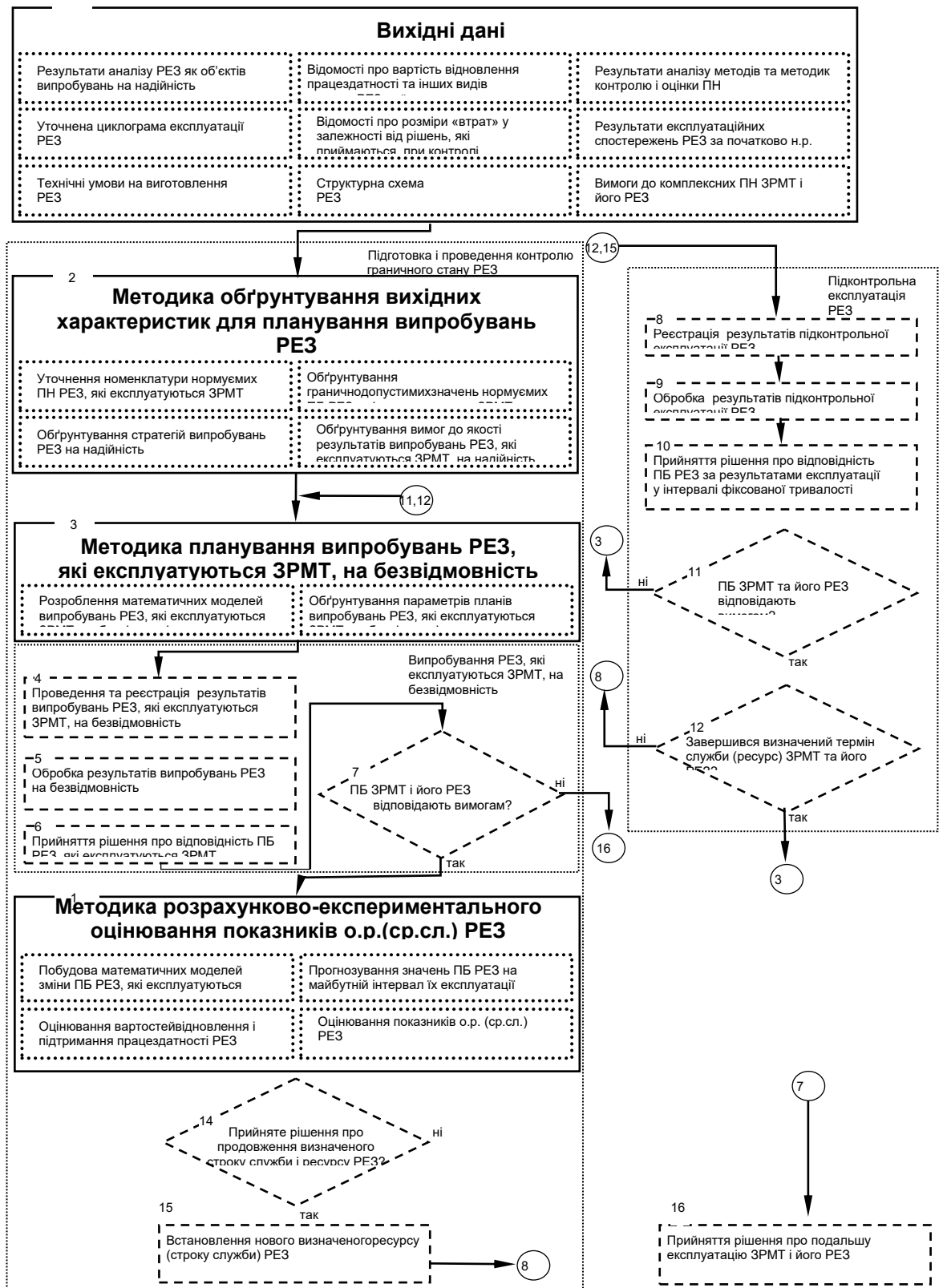


Рисунок 2.2 – Структурна схема методу контролю і оцінки показників надійності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом

Розроблений (удосконалений) метод заснований на наступних основних положеннях:

- при вирішенні завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) є (або можуть бути обчислені) кількісні оцінки показників безвідмовності обладнання ЗРМТ, відповідні різним інтервалам експлуатації фіксованої тривалості;

- на початок вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) уточнена типовий життєвий цикл обладнання ЗРМТ за результатами його експлуатації протягом первинного встановленого призначеного ресурсу (терміну служби). При цьому може бути потрібно уточнення номенклатури нормованих показників надійності зразків обладнання ЗРМТ, встановлених в технічних умовах на виготовлення нових виробів;

- надійність нових зразків обладнання ЗРМТ, а, отже, і вимоги до їх показників надійності, встановлюються розробником з певним “запасом”, який повинен забезпечувати ефективність використання обладнання за призначенням не нижче заданого показника в межах первинного встановленого призначеного ресурсу (терміну служби). Для зразків обладнання ЗРМТ, що експлуатуються за технічним станом на інтервалах продовження призначених ресурсів (термінів служби), вимоги до показників надійності повинні бути уточнені з урахуванням нових чинників;

- випробування зразків обладнання ЗРМТ на надійність проводяться для підтвердження відповідності показників безвідмовності об'єктів випробувань встановленим вимогам у відповідних реальним режимам експлуатації умовах. При цьому режими функціонування (тривалість перебування в увімкненому стані, періодичності вмикань і інше) виробів повинні задовольняти вимогам експлуатаційної документації, а інтенсивність експлуатації при випробуваннях на безвідмовність може бути вище, ніж при штатній експлуатації в сучасних умовах;

- режими функціонування зразків обладнання ЗРМТ в процесі підконтрольної експлуатації відповідають режимам функціонування при

штатній експлуатації виробів. При цьому результати підконтрольної експлуатації розглядаються як результати пасивного експерименту;

- контроль і оцінка показників безвідмовності проводяться за результатами експлуатації за відповідні інтервали фіксованої тривалості і результатами спеціальних випробувань з урахуванням апріорної інформації, накопиченої за передуючий випробуванням інтервал експлуатації;

- оцінка показників залишкового ресурсу (терміну служби) проводиться за результатами сумісної обробки результатів експлуатації і випробувань на надійність на досліджуваних інтервалах експлуатації;

- кожен з виділених вище основних етапів удосконаленого методу контролю і оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ вимагає вирішення певної сукупності завдань і, отже, розробки відповідних методів;

- необхідно забезпечити певну послідовність і взаємозв'язок вирішення сукупності завдань контролю і оцінки показників надійності, що приводить до необхідності введення в блок-схему удосконаленого методу так званих “зворотних зв'язків”, які дозволять адаптивне вирішувати конкретні завдання залежно від накопиченої інформації, що використовується в якості початкових даних.

Початковою інформацією, яка використовується при вирішенні вищевикладених завдань, є накопичені результати експлуатаційних спостережень і результати випробувань на надійність, організованих при контролі граничного стану.

Відповідно до блок-схеми удосконаленого методу контролю і оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом (рис.2.2), отримання і сумісна обробка результатів випробувань на надійність і експлуатаційних спостережень зразків обладнання ЗРМТ для вирішення завдань продовження їх призначених ресурсів (термінів служби) полягає в наступному:

- у моменти часу, передбачені Програмою робіт по продовженню призначених ресурсів (термінів служби) (рис.2.1), результати експлуатаційних спостережень і випробувань на надійність, накопичені за

інтервали експлуатації фіксованої тривалості, розглядаються як результати контрольних випробувань на безвідмовність;

- щодо тих же моментів часу, у разі ухвалення рішення про відповідність показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ встановленим вимогам, результати експлуатаційних спостережень і випробувань на надійність розглядаються як результати визначальних випробувань на безвідмовність;

- результати експлуатаційних спостережень і випробувань на безвідмовність, накопичені на сукупності інтервалів експлуатації фіксованої тривалості, розглядаються як початкові дані для оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби) і, після статистичної обробки, представлені у вигляді оцінок показників безвідмовності і середньоквадратичного відхилення (с.к.в.) цих оцінок, використовуються для побудови залежностей зміни величини показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ від тривалості експлуатації і інших чинників і подальшої оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби).

При розробці (удосконаленні) методу оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ, його часткових методів і моделей випробувань використовуються наступні припущення:

- зміною величини показників безвідмовності, що контролюються (оцінюються) за фіксовану тривалість інтервалу експлуатації або випробувань на безвідмовність можна нехтувати, оскільки ця тривалість несумірно мала в порівнянні з величиною призначеного ресурсу (терміну служби) об'єкту випробувань. При цьому відновлення безвідмовності обладнання ЗРМТ після відмов передбачаються мінімальними, тобто безвідмовність обладнання ЗРМТ в результаті відновлення працездатності при випробуваннях (або за інтервал експлуатації фіксованої тривалості) практично не змінюється;

- на сукупності інтервалів експлуатації фіксованої тривалості і випробувань на безвідмовність, передбачених Програмою робіт по продовженню призначених ресурсів (термінів служби), величини показників

безвідмовності, що контролюються (оцінюються) змінюються істотно, причому характер цієї зміни заздалегідь невідомий і повинен встановлюватися у вигляді моделей їх зміни залежно від тривалості експлуатації і інших чинників по накопичених значеннях оцінок показників безвідмовності.

Визначимо підхід до вибору методу контролю показників надійності і відповідного йому типу плану випробувань на надійність. Відзначимо, що при конкретних початкових даних можливі різні методи контролю показників надійності зразків обладнання ЗРМТ і, зокрема, методи, що рекомендуються нормативно-техніческими документами: одноступеневий, послідовний і інші. Ці методи передбачають завдання двох рівнів показника надійності, що контролюється - приймального, бракування та двох ризиків - постачальника і споживача. Застосування дворівневого контролю на практиці зустрічає певні організаційно-методичні труднощі, обумовлені тим, що не встановлені зв'язки між величинами рівнів приймального і бракування і необхідним значенням показників надійності та відсутні обґрунтовані рекомендації за їх завданням. Крім того, одночасно з посилюванням вимог до надійності об'єктів випробувань, до точності і достовірності контролю зростають потрібні об'єми контрольних вимірювань, що в сукупності призводить до необхідності пошуку розумного компромісу між суперечливими вимогами до характеристик контролю (точності і достовірності контролю з одного боку, економічності контролю - з іншою). Тому план контрольних вимірювань, що задовольняє вимогам до точності і достовірності результатів контролю надійності, повинен бути найбільш економічним серед всіх можливих. План контрольних вимірювань, що відповідає вищезгаданим вимогам, в [70] запропоновано називати "раціональним планом контрольних вимірювань на надійність".

Завдання розробки раціональних планів контрольних вимірювань у декілька іншій постановці сформульована в [74]. НТД рекомендує для використання найбільш розроблені методи контролю показників надійності (одноступеневий, двоступеневий, багатоступеневий, послідовний,

послідовний усічений, з використанням довірчих меж) і їх модифікації (потрійний послідовний, оптимальний узагальнений послідовний і інші) за двома рівнями. Перераховані методи контролю надійності направлені тільки на зниження потрібних об'ємів випробувань. Крім того, для забезпечення відтворюваності результатів контролю, пропонується у розробника і споживача застосовувати єдині методи, плани контролю і правила ухвалення рішень, що веде до великих витрат [10,26,43,73]. Це в сукупності не дозволяє вирішити проблему їх “раціональності” в повному об'ємі.

Іншим напрямом рішення задачі скорочення об'ємів контрольних вимірювань є розробка методів контрольних вимірювань за одним контрольним рівнем [43]. Розглянута в [69,92] одноступенева схема контрольних вимірювань передбачає фіксацію їх об'єму до початку проведення контрольних вимірювань без його зміни в процесі їх проведення залежно від отримуваних проміжних результатів випробувань. Розроблена в [109] двоступенева процедура контролю за одним рівнем є досконалішою, оскільки передбачає зміну об'єму контрольних вимірювань в процесі їх проведення залежно від отриманих проміжних результатів випробувань на першому ступені випробувань. Проте ці методи не передбачають задоволення вимог до відтворюваності результатів контролю, можливості планування контрольних вимірювань з подальшою оцінкою величини показників надійності із заданою точністю і достовірністю у разі ухвалення позитивного рішення за результатами контролю.

Можливий напрям рішення задачі розробки раціональних планів контрольних вимірювань зразків обладнання ЗРМТ полягає в сумісному застосуванні принципу розподілу пріоритетів (ПРП) і методу контрольних вимірювань на надійність за одним контрольним рівнем з подальшою (у разі позитивного результату контролю) оцінкою показників надійності, що враховує апріорну інформацію про величину цього показника.

Відомими методами контролю надійності не передбачена можливість планування раціональних (відповідно до вище зформульованого поняття) контрольних вимірювань. Ступінь “раціональності” цих методів контролю

надійності можна оцінити тільки з погляду мінімізації вартості (тривалості) проведення випробувань за вибраним методом контролю надійності за умови виконання вимог до точності і достовірності схвалюваних рішень. Так, відомі дворівневі методи контролю надійності можна розташувати в порядку зростання ступеню їх раціональності наступним чином: одноступеневі [28,30,59], багатоступеневі [43,68], послідовні [55,56,43], послідовні усічені [6,25,57], потрійний послідовний [57], оптимальний узагальнений послідовний [27,32,36], комбінований [36]. Серед однорівневих методів контролю двоступеневий контроль раціональніший, ніж одноступеневий [43].

Як відомо, в середньому найбільш економічним при проведенні контрольних випробувань на надійність є контроль надійності за послідовною схемою контрольних випробувань її модифікаціям, за умови, що забезпечена незалежність спостережень, що послідовно проводяться. Проте, слід зазначити, що відомі в науково-технічній літературі процедури послідовного контролю і їх модифікації розглянуті тільки для контролю показників надійності за двома рівнями.

Для свого вирішення задача розробки раціонального плану контрольних вимірювань на надійність вимагає сумісного дослідження можливості використання послідовної процедури контрольних вимірювань при контролі надійності за одним рівнем і розробки процедури планування об'ємів контрольних вимірювань з урахуванням апіорної інформації про величину показника, що забезпечує виконання вимог до достовірності і відтворюваності результатів контролю, а також, у разі ухвалення позитивного рішення за результатами контролю, отримання оцінки показника надійності, що контролюється, із заданою точністю і достовірністю.

Забезпечити відтворюваність результатів контролів надійності, що проводяться різними сторонами, дозволяє застосування ПРП. Крім того, застосування ПРП дозволяє зменшити вартість (тривалість) проведення повторних контролів надійності шляхом заміни єдиних методів і планів

дворівневого контролю надійності, що рекомендуються в НТД, які проводиться кожній із сторін, на один контроль надійності за одним рівнем, що проводиться однієї із сторін, або, при необхідності, на два контролю надійності за одним рівнем, що проводяться кожною стороною окремо за відповідними правилами [35,44,69]. При цьому ПРП передбачає вільний вибір однорівневих методів і планів контролю тією стороною, яка організовує і проводить контроль надійності.

З вищевикладеного виходить доцільність сумісного застосування ПРП і усіченого послідовного методу контролю надійності за одним рівнем, що враховує апріорну інформацію про величину показника, з багатоступінчатими лініями приймання і бракування, що реалізовує, при необхідності, можливість подальшої оцінки показника надійності, що контролюється, із заданою точністю і достовірністю у разі ухвалення позитивного рішення за результатами контролю, що і складає суть запропонованої процедури проведення раціональних контрольних випробувань.

Таким чином, розроблені загальні положення удосконаленого методу оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) включають:

- обґрунтування методу оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ і визначення взаємозв'язаної сукупності завдань, вирішення яких необхідне для індивідуального продовження призначених ресурсів (термінів служби);
- визначення переліку і послідовності етапів удосконаленого методу оцінки показників надійності;
- обґрунтування необхідності розробки сукупності часткових методів і моделей випробувань і визначення послідовності їх застосування;
- обґрунтування допущень, використовуваних при розробці часткових методів і моделей випробувань;
- уточнення поняття раціонального плану контрольних випробувань на

надійність на основі якісного аналізу методів цих випробувань.

При цьому сукупність часткових методів і моделей випробувань удосконаленого методу оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ включає метод обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань, математичні моделі випробувань на безвідмовність, метод розрахунково-експериментальної оцінки показників залишкових ресурсів (термінів служби) обладнання ЗРМТ з використанням результатів підконтрольної і лідерної експлуатації і випробувань на надійність.

Комплексність у вирішенні сукупності названих завдань дозволяє забезпечити зниження сумарних витрат на ТЕ і Р обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом за рахунок узгодженого (взаємозв'язаного) планування і проведення випробувань на безвідмовність і довговічність (в порівнянні з роздільним плануванням і проведенням цих випробувань); індивідуального призначення моментів і об'ємів проведення ремонтів, корегування інших параметрів ТЕ і Р: періодичності і об'ємів ТЕ, номенклатури і кількості елементів ЗП, складу експлуатаційного і ремонтного персоналу і тощо.

2.2. Метод обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань обладнання ЗРМТ на надійність

У державних і галузевих стандартах, що діють, і іншій нормативно-технічній документації, розробленій в різний час стосовно різних виробів цивільного та подвійного призначення, завдання обґрунтуванням початкових характеристик для планування випробувань на надійність не опрацьовані достатньо повно і чітко. Нижче наводяться основні положення методу і його нові елементи, характерні для зразків обладнання ЗРМТ, а саме: уточнення номенклатури нормованих показників надійності і обґрунтування граничне допустимих значень показників безвідмовності; обґрунтування стратегій випробувань на надійність на етапах підконтрольної експлуатації і випробувань на безвідмовність; обґрунтування вимог до точності і

достовірності результатів випробувань на безвідмовність.

2.2.1. Основні положення методу обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань обладнання ЗРМТ на надійність.

Метод, що викладається нижче, базується на систематизації і узагальненні нормативно-технічної документації [49,77-88], науково-технічної літератури [40,41,42,43,52,53,73 та ін.], результатів виконаних НДР по питаннях нормування, контролю і оцінки надійності технічних виробів, розроблених в даному підрозділі математичних моделях. Розроблені положення методу обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань обладнання ЗРМТ на надійність визначають набір початкових даних, область застосування, основні завдання і послідовність їх рішення, сукупність використовуваних моделей.

Початкові дані. Для застосування методу передбачаються відомими: уточний життєвий цикл обладнання ЗРМТ; ієрархічна структурна схема обладнання ЗРМТ, елементами якого є його зразки і їх складові частини; обмеження, що накладаються на величину коефіцієнта збереження ефективності обладнання ЗРМТ і (або) величини нестационарних повних коефіцієнтів оперативної готовності обладнання ЗРМТ; технічні умови на виготовлення обладнання ЗРМТ і його зразків. Крім того, в якості початкових даних використовуються зведення про вартість відновлення працездатності і ресурсів зразків обладнання ЗРМТ і їх складових частин, величинах втрат при ухваленні рішень за наслідками контролю (оцінки) показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ і тощо.

Область застосування методу. Метод є складовою частиною удосконаленого методу оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) і призначена для обґрунтування початкових характеристик, які використовуються при

плануванні випробувань зразків обладнання ЗРМТ.

Етапи методу. У методі обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань обладнання ЗРМТ на надійність визначені основні етапи (рис. 2.3).

1. Збір і обробка початкових даних (блоки 1–7).
2. Уточнення номенклатури нормованих показників надійності зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) (блок 8).
3. Обґрунтування гранично допустимих значень показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ (блок 9).
4. Обґрунтування стратегій випробувань за кожним показником безвідмовності на етапах підконтрольної експлуатації і спеціально організовуваних випробувань (блок 10).
5. Вибір варіанту обґрунтування вимог до точності і достовірності контролю і оцінки показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ (блоки 11–14).
6. Обґрунтування вимог до точності і достовірності контролю і оцінки показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ за відповідним критерієм (блоки 15–19).
7. Збір і обробка апостеріорної інформації про результати підконтрольної експлуатації зразків обладнання ЗРМТ і проведених випробувань на надійність. Оцінка вартостей відновлення і підтримання працездатності обладнання ЗРМТ. Ухвалення рішення про необхідність корегування (уточнення) початкових даних за накопиченою інформацією (блок 20).

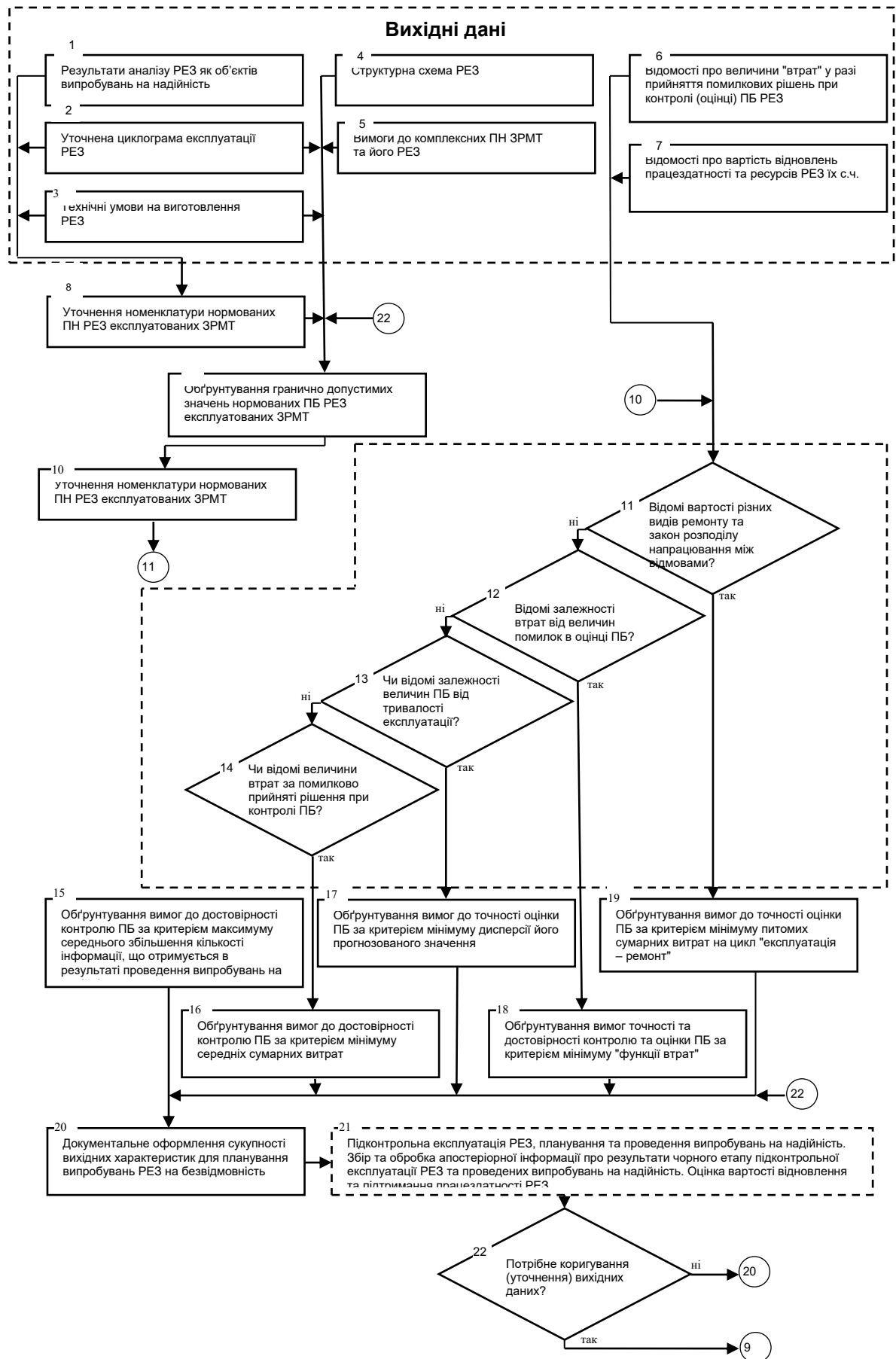


Рисунок 2.3 – Структурна схема методу обґрунтування вихідних характеристик для планування випробувань обладнання ЗРМТ на надійність

Вирішення завдань уточнення номенклатури нормованих показників надійності зразків обладнання ЗРМТ і обґрунтування гранично допустимих значень нормованих показників безвідмовності наведено в пункті 2.2.2, обґрунтування стратегій випробувань обладнання ЗРМТ на надійність наведено в пункті 2.2.3.

Розглянемо більш детально зміст і послідовність виконання робіт шостого етапу методу і їх сутність.

У загальному випадку обґрунтування вимог до точності і достовірності контролю і оцінки показників надійності технічних об'єктів може бути проведене різними методами залежно від потрібної кількості початкової інформації для планування випробувань. Серед всієї безлічі цих методів можна виділити дві групи методів, які базуються на двох принципово різних підходах. Перший підхід передбачає техніко-економічний аналіз результатів випробувань на надійність і вибір оптимальних (у економічному сенсі) значень відповідних показників точності і достовірності, другий, - інформаційну інтерпретацію результатів випробувань на надійність і вибір оптимальних (у інформаційному аспекті) значень показників точності і достовірності. Кожному з цих підходів може бути поставлена у відповідність своя цільова функція, наприклад: величина сумарних витрат, що мінімізується, на проведення випробувань і компенсацію втрат при помилкових рішеннях; максимізована величина середнього приросту кількості інформації, що отримується в результаті проведення випробувань.

Відомо [36,43], що підвищення точності і достовірності результатів випробувань вимагає збільшення об'ємів випробувань і, відповідно, збільшення витрат на їх проведення. Разом з тим, зменшуються втрати, пов'язані з можливими наслідками ухвалення помилкових рішень із-за недостатньої точності оцінки показників надійності, визначеної за результатами цих випробувань. Як видно, залежності вищеназваних величин від об'ємів випробувань носять протилежний характер, отже, можна знайти такі значення характеристик точності і достовірності, при яких сумарні

втрати будуть мінімальні. У розробленому методі варіант обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань на безвідмовність обирається залежно від об'єму наявних початкових даних. У таблиці 2.1 приведена початкова інформація, яка необхідна для застосування кожного з варіантів обґрунтування і повинна бути накопичена до моменту планування випробувань. При цьому вся сукупність таких варіантів може бути розділена на групи: варіанти обґрунтування вимог до достовірності контролю показників безвідмовності і варіанти обґрунтування вимог до точності оцінки показників безвідмовності.

Розглянемо особливості застосування кожного з варіантів обґрунтування вимог до точності і достовірності контролю і оцінки результатів випробувань засобів обладнання ЗРМТ на безвідмовність.

Варіант обґрунтування вимог до достовірності контролю показників безвідмовності за критерієм максимуму середнього приросту кількості інформації, що отримується в результаті проведення випробувань на безвідмовність, є найбільш універсальним. Разом з тим, універсальність цього варіанту є і його основним недоліком, оскільки при його застосуванні не враховуються витрати на експлуатацію об'єкту випробувань. Застосування варіанту обґрунтування вимог до достовірності контролю показників безвідмовності за критерієм мінімуму середніх сумарних витрат дозволяє мінімізувати середні сумарні витрати на проведення випробувань і подальшу експлуатацію (при ухваленні помилкового рішення про неграничний стан об'єкту випробувань), або на передчасний ремонт (при помилковому ухваленні рішення про граничний стан об'єкту випробувань) без урахування величин помилок при інтервальній оцінці показників безвідмовності. Застосування варіанту обґрунтування вимог до достовірності контролю показників безвідмовності за мінімумом “функції втрат” дозволить мінімізувати вищезгадані втрати, але вже з урахуванням конкретних величин помилок при інтервальній оцінці показників безвідмовності, що сприятиме коректнішому обґрунтуванню відповідних вимог.

Таблиця 2.1 – Початкова інформація, використовувана при виборі варіанту обґрунтування вимог до якості результатів випробувань обладнання ЗРМТ на безвідмовність

Початкова інформація	Варіант обґрунтування вимог до					
	достовірності контролю ПБ			точність оцінки ПБ		
	за критерієм максимуму приросту кількості інформації, що отримується в результаті проведення випробувань	за критерієм мінімуму середніх сумарних втрат	за критерієм мінімуму “функції втрат”	за критерієм мінімуму дисперсії прогнозованого значення показників безвідмовності	за критерієм мінімуму “функції втрат”	за критерієм мінімуму питомих сумарних витрат на цикл “експлуатація – ремонт”
Вимоги до величини ПБ	+	+	+	+	+	+
Математичні моделі випробувань за даним ПБ	+	+	+	–	+	+
Середні величини втрат, задані у вигляді “штрафів” за помилки при контролі ПБ	–	+	–	–	–	–
Закон розподілу оцінки ПБ	–	–	+	–	+	–
Залежність величини втрат від “неточності оцінювання”	–	–	+	–	+	–
Залежність зміни ПБ в процесі експлуатації	–	–	–	+	–	+
Вартості операцій технічного обслуговування, поточного і інших видів ремонту	–	–	–	–	–	+

Застосування варіанту обґрунтування вимог до точності оцінки показників безвідмовності за критерієм мінімуму дисперсії значення показника безвідмовності, що прогнозується, вимагає найменшої початкової інформації в порівнянні з останніми - повинні бути відомі залежності зміни показників безвідмовності об'єктів випробувань, що контролюються в процесі експлуатації. Можливий підхід до побудови таких залежностей розглянутий в дисертації. Недоліком цього варіанту є те, що він не враховує зміну витрат на експлуатацію об'єктів залежно від значень вимог, що задаються. Застосування варіанту обґрунтування вимог до точності оцінки показників безвідмовності за мінімумом “функції втрат” дозволить мінімізувати витрати на подальшу експлуатацію об'єкту випробувань, з урахуванням величин помилок при оцінці показників безвідмовності без програшу в точності оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби). Застосування варіанту обґрунтування вимог до точності оцінки показників безвідмовності за критерієм мінімуму середніх питомих витрат на цикл “експлуатація-ремонт” вимагає для свого застосування найбільшої кількості початкової інформації. Значення вимог, що задаються з його допомогою, враховують зміну сумарних витрат на експлуатацію об'єкту на майбутньому інтервалі експлуатації, підтримка працездатності на рівні не нижче заданого, проведення ремонту встановленого вигляду залежно від точності оцінювання показників безвідмовності і відносини середніх вартостей ремонту встановленого вигляду і поточного ремонту.

У міру накопичення і уточнення початкової інформації в методі передбачається можливість корегування (уточнення) початкових характеристик і переходу до іншого (більш інформативному) варіанту обґрунтування вимог до точності і достовірності результатів випробувань на безвідмовність.

Новизна методу. У розробленому (удосконаленому) методі обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань

зразків обладнання ЗРМТ на надійність, на відміну від відомих, розроблених для дослідних або виготовлених зразків обладнання ЗРМТ, вирішується комплекс завдань: уточнення номенклатури показників надійності обладнання ЗРМТ і обґрунтування гранично допустимих значень показників безвідмовності, обґрунтування стратегій випробувань зразків обладнання ЗРМТ за кожним показником надійності; обґрунтування вимог до точності і достовірності результатів випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність. Для реалізації цих завдань використовуються відомі і розроблені в даній роботі моделі випробувань і моделі зміни показників безвідмовності при експлуатації за технічним станом. Комплексність у вирішенні вищезазваних завдань дозволяє в подальшому знизити сумарні витрати на ТЕ і Р зразків обладнання ЗРМТ за рахунок узгодженого (взаємозв'язаного) обґрунтування вимог до величин показників надійності і якості результатів відповідних випробувань, що, у свою чергу, забезпечує коректність рішень, що приймаються за результатами підконтрольної експлуатації і результатами випробувань на надійність.

Процедура обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ є відкритою, тобто при необхідності передбачається перегляд попередніх рішень про величини відповідних вимог з урахуванням чергових отриманих результатів випробувань і підконтрольної експлуатації.

2.2.2. Уточнення номенклатури нормованих показників надійності зразків обладнання ЗРМТ і обґрунтування гранично допустимих значень їх показників безвідмовності.

Уточнення номенклатури нормованих показників надійності зразків обладнання ЗРМТ. Номенклатуру показників надійності зразків обладнання ЗРМТ, що контролюються (оцінюються), уточнення яких необхідно проводити при вирішенні завдань продовження призначених

ресурсів (термінів служби), можна умовно розподілити на групи:

- показники залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ, оцінки яких в подальшому повинні використовуватися при ухваленні рішень про доцільність (можливість) їх подальшої експлуатації;
- показники безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ, результати контролю яких в подальшому повинні використовуватися при ухваленні рішень про граничний (неграничний) їх стан, а набутих значень оцінок - при побудові регресійних залежностей зміни показників безвідмовності для оцінки величин показників залишкового ресурсу (терміну служби).

В якості показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ запропоновано використовувати середній залишковий ресурс (термін служби).

Уточнення номенклатури показників безвідмовності, що контролюються (оцінюються), для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) проводиться з обліком: уточненого типового життєвого циклу виробу; уточнених вимог до комплексних показників надійності обладнання ЗРМТ і його зразків; можливостей контролю цих показників в процесі експлуатації і при проведенні випробувань і, зокрема, механізмів реєстрації результатів експлуатації і форм їх обліку, прийнятих в експлуатаційній документації; критеріїв граничних станів; інших положень НТД [49,77-88].

Відповідно до вимог НТД, перелік показників безвідмовності, що контролюються (оцінюються), повинен полягати з числа приведених в [75,90,91], при цьому повинні бути відомі гранично допустимі значення цих показників і вимоги до точності їх оцінок, або спосіб обґрунтування цих значень. Крім того, повинні бути відомі методи контролю (оцінки) цих показників за даними експлуатаційних спостережень і випробувань на надійність в режимах, відповідних основним режимам використання обладнання ЗРМТ за призначенням. Разом з цим, допускається

використовувати показники, найменування і визначення яких не складають протиріччя зі стандартизованими термінами і конкретизують їх стосовно особливостей режимів і специфіки застосування зразків обладнання ЗРМТ.

У технічних умовах на виготовлення зразків обладнання ЗРМТ в якості нормованого показника безвідмовності заданий один показник “середній наробіток на відмову T_e ”, величина якого характеризує здатність виробу безперервно зберігати працездатний стан протягом деякого наробітку в сталих теплових і електричних режимах роботи. Стосовно конкретних зразків обладнання ЗРМТ за допомогою цього показника оцінюють величину ймовірності безвідмовної роботи обладнання ЗРМТ і його зразків за тривалість використання за призначенням за умови працездатності їх у момент його початку. Тому доцільно включити показник безвідмовності “середній наробіток на відмову T_e ” в якості показника безвідмовності ЗРМТ, величину якого необхідно контролювати (оцінювати) під час вирішення завдань продовження призначення ресурсів (термінів служби).

Своєчасність застосування ЗРМТ є одним з обов'язкових умов успішної діяльності відповідного структурного елементу інфраструктури водного господарства держави. Відомо, що час підготовки обладнання ЗРМТ в готовність до використання за призначенням після вмикання, має певні жорсткі нормативні обмеження. Проте, досвід тривалої експлуатації обладнання ЗРМТ показує на необхідність контролю тривалості виходу їх на режим після вмикання. Це обумовлено тим, що перехід будь-якого засобу з вимкненого стану в увімкнутий стан і навпаки супроводжується виникненням різного роду електричних і теплових перехідних процесів, вплив яких не повністю компенсуються заходами технічного обслуговування і поточного ремонту. Тому в ході вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) зразків обладнання ЗРМТ необхідно визначати здатність їх до збереження працездатного стану при вмиканнях і вимиканнях. В якості показника, що дозволяє кількісно оцінити цю

властивість, запропоновано використовувати показник безвідмовності “Ймовірність безвідмовного включення Рвкл” [43,109], під якою розуміється ймовірність того, що зразки обладнання ЗРМТ, що знаходилося в ввімкненому і працездатному стані, після вмикання і виходу на режим опиняться в працездатному стані. Цей показник характеризує безвідмовність обладнання ЗРМТ в перехідних режимах при переході з ввімкненого стану у включений. Рішення про працездатність обладнання ЗРМТ після вмикання ухвалюється за результатами контролю функціонування. При цьому розглядаються вмикання обладнання ЗРМТ з холодного стану, тобто такі вмикання, коли після попереднього ввімкнення пройшов час, достатній для закінчення перехідних теплових процесів.

Механізм реєстрації результатів експлуатації і форми їх обліку, прийняті в експлуатаційній документації зразків обладнання ЗРМТ (додатки до формулярів), дозволяють отримати (після відповідної обробки) наступну інформацію, що характеризує безвідмовність виробів: наробіток між відмовами; сумарний наробіток і сумарна кількість вмикань апаратури до моменту виявлення чергової відмови; причини виникнення відмови; результат контролю функціонування після кожного вмикання апаратури і інші. В результаті первинної обробки цієї інформації можуть бути сформовані вибірки значень наробітку між відмовами і кількості вмикань апаратури із вказівкою їх результатів, які, у свою чергу, дозволяють оцінювати величини показників, що характеризують безвідмовність апаратури обладнання ЗРМТ як в сталих теплових і електричних режимах роботи, так і при переходах з ввімкненого стану у включений і навпаки.

Вищевикладене свідчить про доцільність включення показника безвідмовності “Ймовірність безвідмовного включення Рвкл” в число нормованих показників надійності зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом в ході вирішення завдань продовження їх призначених ресурсів (термінів служби) для повнішої характеристики

безвідмовності обладнання ЗРМТ.

Таким чином, уточнена номенклатура нормованих показників надійності обладнання ЗРМТ: в якості показника залишкового ресурсу (терміну служби) запропонований середній залишковий ресурс (термін служби), а окрім того, що задається в технічних умовах на виготовлення обладнання ЗРМТ і його зразків показник безвідмовності “середній наробіток на відмову”, запропоновано додатково контролювати і оцінювати показник безвідмовності “ймовірність безвідмовного включення”.

Запропонована номенклатура нормованих показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ більш повно характеризує безвідмовність цих об'єктів в основних режимах застосування за призначенням, підвищує повноту і достовірність контролю безвідмовності, а, отже, і достовірність ухвалення рішень про граничний (неграничному) стан.

Обґрунтування гранично допустимих значень нормованих показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ. Вище було показано, що обґрунтування гранично допустимих значень показників надійності зразків обладнання ЗРМТ для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) за методом, що використовується при обґрунтуванні вимог до надійності нових зразків обладнання ЗРМТ не є неприйнятним, оскільки при цьому не враховуються результати вмикання апаратури, тривалість перебування у включеному стані до початку використання за призначенням і інше.

У [43] показано, що при обґрунтуванні вимог до показників безвідмовності обладнання ЗРМТ доцільно встановлювати такі величини цих показників, при яких в заданих умовах використання ЗРМТ за призначенням забезпечується значення комплексного показника надійності його обладнання не нижче потрібного і виконуються обмеження за діапазоном можливої зміни показників безвідмовності (наприклад, їх значення повинні забезпечувати здатність обладнання ЗРМТ до виконання заданих функцій, не

повинні бути жорсткіше встановлених в технічних умовах для нових зразків і так далі).

За наявності інформації про зміну показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ в процесі експлуатації і функціональної залежності зміни сумарних вартісних втрат від тривалості експлуатації, сумарного наробітку і тощо, обґрунтування гранично допустимих значень показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ запропоновано проводити шляхом:

- вирішення системи нерівностей, в результаті якого визначається інтервал значень кожного показника безвідмовності, якому повинна належати гранично допустима величина;
- рішення оптимізаційної задачі, в результаті якого визначаються конкретні величини гранично допустимих значень показників безвідмовності.

Оскільки другий варіант обґрунтування гранично допустимих значень показників безвідмовності обладнання ЗРМТ є загальним по відношенню до першого, розглянемо його суть, розкриваючи при цьому зміст першого варіанту.

З урахуванням вищевикладеного завдання обґрунтування гранично допустимих величин показників безвідмовності, що контролюються, зразків обладнання ЗРМТ формуються таким чином: знайти такі значення показників безвідмовності, при яких величина питомих сумарних витрат $C_{уд}(T_{э}, T_{о.j}, P_{вкл.j})$ на закупівлю і експлуатацію обладнання ЗРМТ за календарну тривалість експлуатації мінімальна

$$C_{уд}(T_{э}, T_{о}, P_{вкл}) = \sum_j C_{уд}(T_{э}, T_{о.j}, P_{вкл.j}) \rightarrow \min, \quad (2.2)$$

а значення показників безвідмовності не виходять за межі, встановлені за результатами вирішення системи нерівностей

$$\begin{cases} K_{\text{эф}}(T_{o,j}, P_{\text{вкл},j}) \geq K_{\text{эф.тр}}, \\ T_{o.\text{min},j} \leq T_{o,j} \leq T_{o.\text{ту},j}, \\ P_{\text{вкл},\text{min},j} \leq P_{\text{вкл},j} \leq P_{\text{вкл},\text{ту},j}, \end{cases} \quad (2.3)$$

або

$$\begin{cases} K_{\text{огп},j}(P_{\text{вкл},j}, T_{o,j}, t_{\text{ож}}, t_{\text{бр}}) \geq K_{\text{огп.тр}}, \\ T_{o.\text{min},j} \leq T_{o,j} \leq T_{o.\text{ту},j}, \\ P_{\text{вкл},\text{min},j} \leq P_{\text{вкл},j} \leq P_{\text{вкл},\text{ту},j}, \end{cases} \quad (2.4)$$

де $C_{\text{уд}}(T_{\text{э}}, T_{o,j}, P_{\text{вкл},j})$ - вартість питомих сумарних витрат на покупку і експлуатацію елементу j -го рівня структурної схеми обладнання ЗРМТ;

$T_{o.\text{ту},j}$ - гранично допустимі значення показників безвідмовності елементу j -го рівня структурної схеми обладнання ЗРМТ, встановлені в ТУ на виготовлення нових виробів;

$T_{o.\text{min},j}$ - мінімальний для виконання “безвідмовного використання за призначенням” середній наробіток на відмову елементу j -го рівня структурної схеми обладнання ЗРМТ;

$P_{\text{вкл},\text{min},j}$ - мінімальне для виконання завдання підготовки обладнання ЗРМТ до використання за призначенням значення ймовірності безвідмовного включення елементу j -го рівня структурної схеми обладнання ЗРМТ.

Величина $T_{o.\text{min},j}$ визначається з умови гарантованого виконання за призначенням заданої тривалості $t_{\text{бр}}$ використання за призначенням без відмов

$$P(T_{o.\text{min},j}, t_{\text{бр}}) \geq P_{\text{пр.тр}}, \quad (2.5)$$

де $P_{\text{пр.тр}}$ - необхідне значення ймовірності виконання “безвідмовного використання за призначенням” обладнання ЗРМТ.

Детальніше розрахунок величин питомих сумарних витрат на покупку і експлуатацію обладнання ЗРМТ за календарну тривалість експлуатації і величин комплексних показників надійності з урахуванням уточненого життєвого циклу, ієрархічної структури обладнання ЗРМТ і значень показників надійності складових частин, що реалізуються розглянутий в додатку Б. Задача обґрунтування (2.2)–(2.4) гранично допустимих значень показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ є завданням нелінійного програмування, що обумовлене не лінійністю функціоналів в (2.2)-(2.5). Оскільки діапазони можливих значень величин $T_{o,j}$, $P_{вкл,j}$ достатньо вузькі, а необхідна точність забезпечується дискретним завданням значень показників безвідмовності, то задачу обґрунтування гранично допустимих значень ПБ доцільно вирішувати методом перебору на мережі параметрів.

2.2.3. Обґрунтування стратегій випробувань зразків обладнання ЗРМТ на надійність при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби).

При обґрунтуванні стратегій випробувань зразків обладнання ЗРМТ на надійність необхідно враховувати наступні чинники:

- кількість виробів, що піддаються випробуванням;
- порядок контролю функціонування в процесі випробувань - безперервно, періодично, тільки перед початком і після закінчення випробувань;
- зміст одиничного досвіду і ознака його закінчення;
- порядок відновлення (заміни) виробів, що відмовили, - не відновлюються і не замінюються, не відновлюються, але замінюються і відновлюються;
- порядок надходження виробів на випробування - одночасно або

неодночасно;

- критерій закінчення випробувань - за наробітком, за числом відмов, за

наробітком і числом відмов;

- результати підконтрольної експлуатації і випробувань на надійність повинні оброблятися спільно.

Нижче з урахуванням перерахованих чинників якісно обґрунтовані стратегії випробувань зразків обладнання ЗРМТ за кожним з нормованих показників безвідмовності, а також за показниками залишкового ресурсу (терміну служби).

Характерною особливістю контролю (оцінки) показників безвідмовності за результатами підконтрольної експлуатації обладнання ЗРМТ є те, що об'єм експлуатаційних спостережень до моменту його проведення зафіксований. Результати підконтрольної експлуатації обладнання ЗРМТ можна розглядати як результати випробувань на надійність за відповідним планом. Оскільки об'єм експлуатаційних спостережень не може бути скорегований в яку-небудь сторону, то для ухвалення рішення про відповідність (невідповідність) конкретного показника безвідмовності обладнання ЗРМТ встановленим вимогам необхідно використовувати статистичні методи контролю надійності із заздалегідь фіксованим об'ємом. До таких методів контролю надійності відносяться [43,46]: одноступеневий метод контролю надійності і метод контролю надійності за допомогою довірчих меж. Як було наведено в підрозділі 2.1, переважним є метод контролю, що дозволяє встановити відповідність (невідповідність) показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ вимогам за числом відмов, пов'язаних з величиною показника безвідмовності, що контролюється, тобто одноступеневий метод контролю надійності.

Контроль показників безвідмовності обладнання ЗРМТ за результатами

підконтрольної експлуатації із заданою достовірністю може бути здійснений при об'ємі випробувань (експлуатаційних спостережень) не нижче потрібного. При цьому мінімальним об'ємом випробувань, за наслідками якого із заданою достовірністю може бути ухвалене рішення про відповідність (невідповідності) показників безвідмовності обладнання ЗРМТ встановленим вимогам, є об'єм безвідмовних випробувань. У разі, коли фактичний об'єм експлуатаційних спостережень менше потрібного, ухвалюється рішення про доцільність контролю відповідного показника безвідмовності із заданою достовірністю і менш жорсткими вимогами до точності, або оцінюється достовірність ухвалення рішення про відповідність показника безвідмовності встановленим вимогам при заданій точності.

При проведенні контролю граничного стану для підтвердження вимог до безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ потрібні великі об'єми високовитратних випробувань, що, у свою чергу, приводить до необхідності мінімізації об'ємів цих випробувань (наприклад, за допомогою використання “економічних” методів контролю надійності, обліку результатів експлуатації за передуючий випробуванням період в якості апіорної інформації при їх плануванні і так далі).

При вирішенні завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) обладнання ЗРМТ втрати від ухвалення помилкового рішення про невідповідність показників безвідмовності обладнання ЗРМТ встановленим вимогам практично відповідають вартості передчасного припинення експлуатації і ремонту відповідного виду. Величина втрат від ухвалення помилкового рішення про відповідність показників безвідмовності обладнання ЗРМТ встановленим вимогам характеризується: фактичним рівнем безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ, що визначає величину додаткових витрат, обумовлених виникненням підвищеної кількості відмов і відновленням працездатності обладнання ЗРМТ на інтервалі продовження експлуатації; підвищенням ймовірності невиконання завдань зразками

обладнання ЗРМТ унаслідок зниження їх безвідмовності, величина втрат від яких може досягати величини, сумірної з вартістю відповідних нових зразків обладнання ЗРМТ.

З урахуванням викладеного вище і в підрозділі 2.1 при вирішенні завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) обладнання ЗРМТ пропонується розміщувати інтервал $[R_\alpha, R_\beta]$ таким чином, щоб рівень бракування показників надійності практично поєднувався з $R_{тр}$ (тобто $R_{тр} = R_\beta$).

Крім того, при завданні вимог до безвідмовності обладнання ЗРМТ, як правило, встановлений або може бути уточнений один гранично допустимий (потрібний) рівень показника безвідмовності, що контролюється. Тому рішення задачі контролю безвідмовності за двома рівнями приведе до необхідності сумісного обґрунтування чотирьох величин $R_{тр} = R_\beta, R_\alpha, \alpha$ і β . Це обумовлює необхідність застосування при плануванні випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) (за відсутності конкретних рекомендацій щодо обґрунтування значень R_α і α) методу контролю відповідних показників за одним рівнем бракування (гранично допустимому) $R_{тр} = R_\beta$ і ризику споживача β з подальшою оцінкою величини показників безвідмовності у разі позитивного результату контролю. Далі, в процесі подальшої експлуатації, може бути здійснений перехід до контролю безвідмовності за двома рівнями, за наявності розроблених рекомендацій щодо обґрунтування відповідних вимог до точності і достовірності цього контролю.

Відомо [3,31,35,41], що найбільш економічним при проведенні контрольних випробувань на надійність є послідовний метод контролю надійності або його модифікації [3, 35], за умови, що забезпечена

незалежність спостережень, що проводяться послідовно. Тому для вирішення завдання планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність доцільно досліджувати можливість сумісного використання послідовної процедури контрольних випробувань при контролі безвідмовності з подальшою оцінкою показника, що контролюється, у разі позитивного результату контролю і методів обліку апріорної інформації.

У підрозділі 2.1 обґрунтована доцільність оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби) обладнання ЗРМТ розрахунково-експериментальним методом за накопиченими в процесі експлуатації результатами експлуатаційних спостережень і результатами контролю граничного стану, які в сукупності можна розглядати як результати випробувань на довговічність. Характерними особливостями таких “випробувань” є те, що об’єкт випробувань один; в процесі проведення відновлюється працездатність (тобто проводяться тільки передбачені експлуатаційною документацією ТО і поточні ремонти, які не відновлюють ресурс); контроль граничного стану проводиться після закінчення призначеного ресурсу (терміну служби) у випадку, якщо ресурсна відмова не виникла до цього; оцінювання показників безвідмовності проводиться періодично в процесі підконтрольної експлуатації і при проведенні контролів граничного стану; умовами припинення є виникнення ресурсної відмови або результати оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби). Вважається, що ресурсна відмова виникає при виявленні відмови ресурсного елементу або при невідповідності вимогам хоч би одного показника безвідмовності зразка обладнання ЗРМТ.

Вищенаведене дозволяє розглядати такі “випробування на довговічність” в якості випробування за планом $[[1MS]]$ [31, 41, 90], де перший символ означає, що на випробування поставлений один об’єкт, символ М – об’єкт випробувань при виявленні відмов відновлюється, символ S – умова припинення випробувань, а подвійні квадратні дужки – контролі

безвідмовності об'єктів випробувань проводяться періодично в процесі експлуатації, а контролі функціонування проводяться відповідно до вимог експлуатаційної документації. Оскільки в загальному випадку послідовні випробування на надійність припиняються з ухваленням рішення про відповідність (невідповідність) показника, що контролюється, встановленим вимогам, то умовою припинення випробувань на довговічність є ухвалення рішення про невідповідність хоч би одного з показників безвідмовності об'єкту випробувань, що контролюються.

Таким чином, обґрунтовані стратегії випробувань за кожним нормованим показником надійності. При цьому стратегії випробувань за показником “ймовірність безвідмовного включення” на етапі підконтрольної експлуатації відповідають одноступеневої схемі випробувань на безвідмовність, а при випробуваннях на безвідмовність при контролях граничного стану – послідовній схемі випробувань на безвідмовність {NUS}. Аналогічно і для показника “середній наробіток на відмову” – стратегії [1MTп.э] і [1MS], відповідно. Стратегії випробувань за показниками залишкового ресурсу (терміну служби) обґрунтовані для етапу підконтрольної експлуатації і відповідають послідовній схемі випробувань на надійність [[1MS]]. У вищенаведених умовних позначеннях прийнято, що $N_э$ – сумарна кількість включень зразків обладнання ЗРМТ за період його підконтрольної експлуатації, dp – кількість невдалих включень з їх числа, $Tп.э$ – сумарний наробіток обладнання ЗРМТ за період підконтрольної експлуатації, N – максимальна (передбачена планом використання) сумарна кількість циклів “включено-вимкнено”, S – умова припинення випробувань.

2.2.4. Обґрунтування вимог до точності і достовірності контролю і оцінки показників безвідмовності обладнання ЗРМТ.

Обґрунтування вимог до точності і достовірності результатів випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність проводиться в

рамках шостого етапу методики. Вище (п.2.2.1) були розглянуті основні підходи, які використовуються при вирішенні даних завдань, сукупність варіантів обґрунтування вимог до точності і достовірності результатів випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність, умови і особливості їх застосування.

Нижче детальніше розглядається суть окремих варіантів обґрунтування вимог до точності і достовірності контролю і оцінки показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ при плануванні випробувань, які конкретизують положення відомих методів стосовно існуючого обладнання ЗРМТ або розробленого вперше. Варіанти обґрунтування вимог до точності і достовірності контролю і оцінки показників безвідмовності, які не зазнали істотних змін в порівнянні з відомими, в даній роботі не розглядаються, оскільки правила і порядок їх застосування досить детально описані в науково-технічній літературі. До таких варіантів відносяться наступні:

- варіант обґрунтування вимог до достовірності контролю показників безвідмовності за критерієм мінімуму середніх сумарних втрат [5, 12, 24];
- варіант обґрунтування вимог до точності оцінки показників безвідмовності за критерієм мінімуму дисперсії його прогнозованого значення [37, 38];
- варіант обґрунтування вимог до точності і достовірності контролю і оцінки показників безвідмовності за критерієм мінімуму “функції втрат” [7].

Обґрунтування вимог до достовірності контролю показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ за критерієм максимуму середнього приросту кількості інформації, що отримується в результаті проведення випробувань на безвідмовність. Основна ідея цього підходу до обґрунтування вимог до достовірності результатів випробувань на надійність [7, 89] полягає в тому, що в результаті проведення випробувань на надійність вдається зменшити невизначеність інтервальної оцінки показників безвідмовності, що може служити мірою ефективності випробувань. Під

кількістю інформації, що міститься в події y_k щодо події x_i , розуміється [7, 89] логарифм відношення апостеріорної ймовірності події x_i , тобто після того, як мала місце подія y_k , до апіорної вірогідності події x_i , тобто до того, як мала місце подія y_k

$$\inf(x_i, y_k) = \log \frac{P\left(\frac{x_i}{y_k}\right)}{P(x_i)}. \quad (2.6)$$

Якщо подія x_i є елементом системи подій X , а подія y_k – елементом системи подій Y , то в середньому на будь-яку реалізацію пари випадкових подій (x_i, y_k) доводиться кількість інформації $\inf(x_i, y_k)$ $\inf(x_i, y_k)$ дорівнює

$$\inf(X, Y) = \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^N P(x_i, y_k) \times \inf(x_i, y_k), \quad (2.7)$$

де $P(x_i, y_k)$ – ймовірність появи пари подій (x_i, y_k) .

Величина $\inf(X, Y)$ є середньою кількістю інформації в одній системі подій щодо іншої, відображаючи таким чином відповідність систем подій в цілому. Вважається, що система подій X є безліччю можливих рішень про значення показника безвідмовності, що контролюється (оцінюється) до проведення випробувань, а система подій Y – безліч можливих реалізацій оцінки (точковою або інтервальною) цього показника. Якщо в результаті проведення випробувань реалізується конкретна оцінка, то система подій Y містить єдину оцінку, яка вже не є випадковою. При цьому в якості отриманої інформації $\inf(x_i, y_k^*)$ необхідно розглядати кількість інформації щодо реалізації будь-якої пари подій, де y_k^* вже відомо.

Середня кількість отриманої інформації визначається виразом

$$\inf\left(\frac{X}{y_k^*}\right) = \sum_{i=1}^N P\left(\frac{x_i}{y_k^*}\right) \times \inf(x_i, y_k^*). \quad (2.8)$$

Саме ця величина середнього приросту кількості інформації $\text{INF}\left(\frac{X}{y_k^*}\right)$ і використовується в рамках варіанту обґрунтування початкових характеристик в якості міри ефективності випробувань обладнання ЗРМТ на безвідмовність. При контролі безвідмовності використовуються інтервальні оцінки показників безвідмовності, а це, у свою чергу, приводить до того, що система подій X містить дві події, що полягають відповідно в тому, що невідоме значення показників безвідмовності знаходиться в межах встановлених вимог, або поза ними. Відповідно до (2.6) і (2.8) середній приріст кількості отриманої інформації буде рівний

$$\text{INF} = \gamma_{\text{и}} \log \frac{\gamma_{\text{и}}}{\gamma_{\text{а}}} + (1 - \gamma_{\text{и}}) \log \frac{1 - \gamma_{\text{и}}}{1 - \gamma_{\text{а}}}, \quad (2.9)$$

де $\gamma_{\text{и}}$ і $\gamma_{\text{а}}$ – відповідно апостеріорна (після проведення випробувань на надійність) і апіорна (до проведення випробувань на надійність) ймовірність того, що невідоме значення показників безвідмовності належить області, обмеженій встановленими вимогами до його величини.

Справедливість цього співвідношення може бути наведена і безпосередньо таким чином. Кількість отриманої інформації, що невідоме значення показників безвідмовності належить області, обмеженій встановленими вимогами до його величини, що дорівнює $\log \frac{\gamma_{\text{и}}}{\gamma_{\text{а}}}$. Коли ухвалюється рішення про те, що невідоме значення показника безвідмовності належить області, обмеженій встановленими вимогами до його величини, то з ймовірністю $\gamma_{\text{и}}$ воно засноване на достовірній інформації $\log \frac{\gamma_{\text{и}}}{\gamma_{\text{а}}}$ і з ймовірністю $(1 - \gamma_{\text{и}})$ – на помилковій інформації $\log \frac{1 - \gamma_{\text{и}}}{1 - \gamma_{\text{а}}}$. Величина I , що є

середнім приростом кількості інформації після проведення випробувань на безвідмовність і ухвалення після їх закінчення рішення про відповідність показників безвідмовності встановленим вимогам, використовується як показник оптимальності інтервальних оцінок. Останнє визначається тим, що величина приросту інформації є мірою статистичного зв'язку між системою подій X і оцінкою y_k^* . Тоді, в якості критерію оптимізації при обґрунтуванні вимог до точності і достовірності результатів контролю і оцінки показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ можна прийняти максимум середнього приросту кількості інформації, отриманої в результаті проведення випробувань на безвідмовність.

У [7] з використанням цього підходу розглянуті питання обґрунтування вимог до достовірності контролю показників безвідмовності при плануванні одноступеневих випробувань (плани випробувань $[NUT]$, $[NU_r]$, $[NU(r, T)]$ і тощо). При цьому показано, що оптимальна величина ризику споживача, як правило, не повинна перевищувати 0,15, а вимоги до його величини, що рекомендуються, задані у ряді стандартів [31, 41] виявляються завищеними.

Гідністю інформаційного підходу до обґрунтування вимог до достовірності контролю показників безвідмовності для планування випробувань є його універсальність, оскільки для його застосування не потрібні дані про вартість ремонтів і технічних обслуговувань в процесі експлуатації, великі об'єми експлуатаційних спостережень, необхідні для визначення законів розподілу різних величин і показників і тощо.

Недоліком цього підходу є те, що необхідною умовою для його застосування є наявність розрахункових співвідношень, які дозволяють оцінити зміну довірчій ймовірності, залежно від об'ємів випробувань обладнання ЗРМТ на надійність; при обґрунтуванні початкових характеристик розглядається тільки процес проведення випробувань на безвідмовність, а вартісні характеристики випробувань і подальшої експлуатації обладнання ЗРМТ не враховуються. При застосуванні

інформаційного підходу такі заходи як обґрунтування вимог до достовірності контролю показників безвідмовності і обґрунтування параметрів планів відповідних випробувань неподільні, оскільки оптимальна величина $\gamma_{\text{и}}$ розраховується за заздалегідь відомими математичними моделями випробувань і жорстко пов'язана із значеннями параметрів планів випробувань, для яких вона розрахована.

Обґрунтування вимог до точності контролю і оцінки показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ за критерієм мінімуму середніх питомих витрат за цикл “експлуатація-ремонт”. Цей варіант обґрунтування вимог до точності результатів контролю і оцінки показників безвідмовності обладнання ЗРМТ розроблений спеціально для вирішення завдань продовження їх призначених ресурсів (термінів служби) [57, 67]. Суть його полягає в наступному. Одному із завдань, що вирішуються при продовженні призначених ресурсів (термінів служби) зразків обладнання ЗРМТ, є визначення оптимальної періодичності проведення контролів граничного стану обладнання ЗРМТ для виявлення їх потреб в ремонті. Рішення про проведення ремонту зразків обладнання ЗРМТ ухвалюється за результатами контролів граничного стану. Зрозуміло, що проведення контролю граничного стану обладнання ЗРМТ вимагає певних вартісних, трудових і часових витрат. Ефективність проведення контролю граничного стану значною мірою визначається його своєчасністю. За наявності відпрацьованої системи контролю за технічним станом зразків обладнання ЗРМТ, досконалої системи збору і обробки інформації про надійність момент проведення контролю граничного стану доцільно визначати за результатами прогнозування граничного стану. Як правило, при контролі граничного стану контролюються показники безвідмовності, вартість виконаних до моменту проведення контролю граничного стану, технічних обслуговувань і поточних ремонтів, оцінюється вартість майбутнього ремонту, і при необхідності, технічних обслуговувань і ремонтів на інтервалі експлуатації, що

продовжується. При цьому характеристики надійності і вартості експлуатації зразків обладнання ЗРМТ визначаються з певною точністю, що повинно враховуватися при визначенні моментів проведення контролів граничного стану. Тому в основі техніко-економічного підходу з використанням в якості цільової функції середніх питомих витрат на цикл “експлуатація-ремонт” лежить дослідження впливу точності визначення характеристик надійності і вартості експлуатації обладнання ЗРМТ на вибір моментів проведення його контролю граничного стану.

У науково-технічній літературі вирішення завдань визначення оптимальних періодичностей проведення контролів граничного стану і, тим більше, оцінки впливу на них точності визначення характеристик надійності і вартості експлуатації фактично не досліджені. Більший розвиток отримали завдання оптимізації періодичності проведення “повних відновлень” і “профілактичних обслуговувань” за критерієм максимуму коефіцієнта готовності або мінімуму середніх питомих витрат. При цьому характеристики надійності виробів вважаються імовірнісними визначеними (відомі функції розподілу і їх параметри), а характеристики вартості експлуатації – детермінованими. На практиці характеристики надійності обладнання ЗРМТ відомі частково (наприклад: відома функція розподілу, а її параметри невідомі; теоретична функція розподілу невідома, а її параметри задані неточно і тощо), а характеристики вартості мають значний розкид. У цих умовах завдання оптимізації періодичності “повних відновлень” можна вважати “імовірнісними невизначеними”. У ряді робіт [41,42 та ін.] аналізується вплив точності визначення тільки характеристик безвідмовності об'єктів, або тільки характеристик вартості технічних обслуговувань і ремонтів на момент проведення “повних відновлень”. Нижче викладено рішення задачі оцінки впливу точності характеристик безвідмовності і вартості експлуатації на величину питомих “експлуатаційних” витрат.

Відповідно до викладеним вище призначенням контролю граничного

стану вважатимемо, що у момент τ проводиться контроль граничного стану обладнання ЗРМТ, за результатами якого проводиться ремонт – негайно або після закінчення уточненого призначеного ресурсу (терміну служби) $r(\tau)$. Відмови, виявлені до моменту τ , усуваються поточним ремонтом. За величиною відновленого ресурсу обладнання ЗРМТ поточний ремонт розглядається як “малі відновлення”, а ремонт обладнання ЗРМТ, що проводиться за результатами контролю граничного стану, як “повне відновлення”. Середні витрати на проведення “повних відновлень” складають C_p , МВ “малих відновлень” – C_m , контролю граничного стану – $C_{кпс}$. При відомій залежності параметра потоку відмов $\varpi(t)$ зразків обладнання ЗРМТ від тривалості експлуатації середнє число “малих відновлень” МВ на інтервалі експлуатації $[0, \tau]$ складе [8] $\Lambda(\tau) = \int_0^{\tau} \varpi(t) dt$.

Тоді середні питомі витрати на цикл “експлуатація – ремонт” можна визначити за співвідношенням

$$R(\tau) = \frac{C_p + C_m \Lambda(\tau + r(\tau)) + C_{кпс}}{\tau + r(\tau)}. \quad (2.10)$$

Для спрощення викладення далі вважається, що контроль граничного стану обладнання ЗРМТ проводиться своєчасно (тобто перед настанням граничного стану), за результатами якого здійснюється ремонт. При цьому момент проведення контролю граничного стану практично співпадає з моментом проведення ремонту. В цьому випадку можна вважати, що $C_p + C_{кпс} = C_v$ і $r(\tau) = 0$. Тоді співвідношення (2.10) перетвориться до відомого в [29] вигляду

$$R(\tau) = \frac{C_v + C_m \Lambda(\tau)}{\tau}. \quad (2.11)$$

Вважається відомим вид залежності параметра потоку відмов від тривалості експлуатації, параметри якої статистично оцінюються за вибіркою експлуатаційних спостережень обмеженого об'єму, унаслідок чого вони мають обмежену точність. Величини вартостей “малих відновлень” і “повних відновлень” є середніми, що також може приводити до помилок при визначенні оптимального моменту τ для конкретного обладнання ЗРМТ. Оптимальний період τ_0 проведення контролю граничного стану зразків обладнання ЗРМТ і подальшого ремонту обчислюється за критерієм мінімуму функції $R(\tau)$. Відповідно до [29], оптимальний період τ_0 проведення “повних відновлень”, а при сформульованих вище допущеннях – контролів граничного стану зразків обладнання ЗРМТ, у разі представлення функції середніх питомих витрат на цикл “експлуатація- ремонт” у вигляді співвідношення (2.11) є вирішенням рівняння

$$\tau \varpi(\tau) - \Lambda(\tau) = \frac{C_v}{C_m}. \quad (2.12)$$

У разі монотонного зростання величини $\varpi(t)$ існує однозначне вирішення рівняння (2.12) τ_0 , при якому величина середніх питомих витрат мінімальна і рівна $R(\tau_0) = C_m \varpi(\tau_0)$.

Для обґрунтування вимог до точності оцінки показників безвідмовності необхідно досліджувати залежність відхилення величини функції $R(\tau)$ щодо оптимального значення $R(\tau_0)$ від величин відносних помилок характеристик безвідмовності і вартостей C_m, C_v . Рішення цієї задачі доцільно розбити на дві послідовно вирішувані підзадачі:

– дослідження стійкості функції середніх питомих витрат на цикл “експлуатація- ремонт” і визначення діапазону допустимого відхилення періоду τ в зоні значень, близьких до оптимальних. При цьому в якості

нормованої зміни цих витрат (в порівнянні з їх мінімальним значенням), в межах якої математичну модель можна вважати стійкою до зміни періоду τ , зазвичай приймається 2.5 % [39];

– дослідження чутливості функції питомих витрат “експлуатація-ремонт” до зміни її початкових параметрів і розробка рекомендацій по обґрунтуванню (для відомого діапазону допустимого відхилення періоду τ) точності визначення цих параметрів.

При цьому допустима величина цих помилок визначається навколо крапки, відповідної мінімуму середніх питомих витрат “експлуатація-ремонт”, за критерієм максимально допустимого відхилення цих витрат від оптимального значення. Розглянемо стисло суть цього варіанту обґрунтування початкових характеристик.

Відомо, що при мінімальному відновленні $\varpi(t) = \lambda(t)$ і за відомою залежністю інтенсивності відмов $\lambda(t)$ можливо знайти функцію розподілу наробітку зразків обладнання ЗРМТ між відмовами $F(t)$. Припустимо, що наробіток обладнання ЗРМТ між відмовами на продовжуваному інтервалу експлуатації буде підпорядкована розподілу Вейбулла, тобто [29,38,46]

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right), \quad t \geq 0, b > 1.$$

Тоді $\lambda(t) = b/a \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}$, $\Lambda(\tau) = \left(\frac{\tau}{a}\right)^b$, середній наробіток на відмову $T_0 = a\Gamma(1 + b^{-1})$ або $T_0 = aK_b$, де $K_b = \Gamma(1 + b^{-1})$ — значення гамма-функції. Рівняння (2.12) при цьому однозначно має рішення у вигляді $\tau_0 = a \left(\frac{C_v}{C_m(b-1)} \right)^{1/b}$.

Мінімальна величина середніх питомих витрат визначається як

$$R(\tau_0) = \frac{b}{a} C_m \left(\frac{C_v}{C_m(b-1)} \right)^{\frac{b-1}{b}}. \quad (2.13)$$

Введемо нову змінну y , під якою будемо розуміти відносні середні питомі витрати

$$y = \frac{R(\tau)}{C_m / T_0} = \frac{C_v}{C_m} \frac{T_0}{\tau} + K_b^b \left(\frac{\tau}{T_0} \right)^{b-1}. \quad (2.14)$$

Позначимо $x = \tau / T_0$ – відносний період між “повними відновленнями”, $C = C_v / C_m$ – відношення середніх вартостей відновлення (коефіцієнт вартості). З урахуванням введених позначень вираз (2.14) має вигляд

$$y = \frac{C}{x} + K_b^b x^{b-1}. \quad (2.15)$$

Диференціюючи вираз (2.15) по x і прирівнюючи похідну нулю визначимо співвідношення для оптимального відносного періоду x_0 і оптимального періоду τ_0 між моментами проведення контролів граничного стану (періодичності повних відновлень).

$$x_0 = K_b^{-1} \left(\frac{C}{b-1} \right)^{1/b}, \quad \tau_0 = T_0 x_0 = T_0 K_b^{-1} \left(\frac{C}{b-1} \right)^{1/b}. \quad (2.16)$$

Величина оптимальних відносних середніх питомих витрат y_0 визначається як

$$y_0 = \frac{R(\tau_0)}{C_m / T_0} = \frac{b}{a} \frac{C_m \left(\frac{C_v}{C_m (b-1)} \right)^{\frac{b-1}{b}}}{C_m / T_0} = b K_b^b x_0^{b-1}. \quad (2.17)$$

Для подальшого викладу введемо нові відносні величини:

$$\delta y = \frac{y - y_0}{y_0} = \frac{\Delta y}{y_0} - \text{відносна погрішність зміни відносних середніх питомих}$$

витрат; $x_\varepsilon = \frac{x}{x_0}$ – відносне відхилення періоду τ .

$$\text{Використовуючи вирази (2.15) і (2.17) напишемо } \delta y = \frac{C + K_b^b x^b}{x b K_b^b x_0^{b-1}} - 1 \text{ і, з}$$

урахуванням введеної величини, це співвідношення може бути записане у вигляді

$$\delta y = \frac{b - 1 + x_\varepsilon^b}{b x_\varepsilon} - 1. \quad (2.18)$$

Графіки залежності $\delta y = f(x_\varepsilon)$ при різних значеннях параметрів форми $b > 1$, наведені на рис.2.4. З рисунка видно (штрих пунктирна лінія), що при погрішностях відповідних витрат, наприклад 5% і $b=2$, припустиме відхилення моменту проведення контролю граничного стану знаходиться в межах від $x_{\varepsilon H} = 0,73$ до $x_{\varepsilon B} = 1,371$. У цьому діапазоні будь-який момент проведення контролю граничного стану обладнання ЗРМТ буде практично оптимальним з прийнятною для практики точністю розрахунків. З ростом параметру форми b розподілу Вейбулла або зменшення коефіцієнту варіації тривалості безвідмовної роботи стійкість функцій питомих витрат зменшується. Так, при $\delta y = 0,05$ дозволені наступні відносні відхилення моментів проведення контролів граничного стану обладнання ЗРМТ відносно його оптимальних значень: при $b=3$ $x_{\varepsilon H} = 0,794$, $x_{\varepsilon B} = 1,24$; при $b=4$ $x_{\varepsilon H} = 0,825$, $x_{\varepsilon B} = 1,188$ і тощо. Оптимальний період τ_0 і допустимі його відхилення τ_{0H} , τ_{0B} при цьому визначаються як $\tau_0 = T_0 x_0$, $\tau_{0H} = x_{\varepsilon H} \tau_0$, $\tau_{0B} = x_{\varepsilon B} \tau_0$.

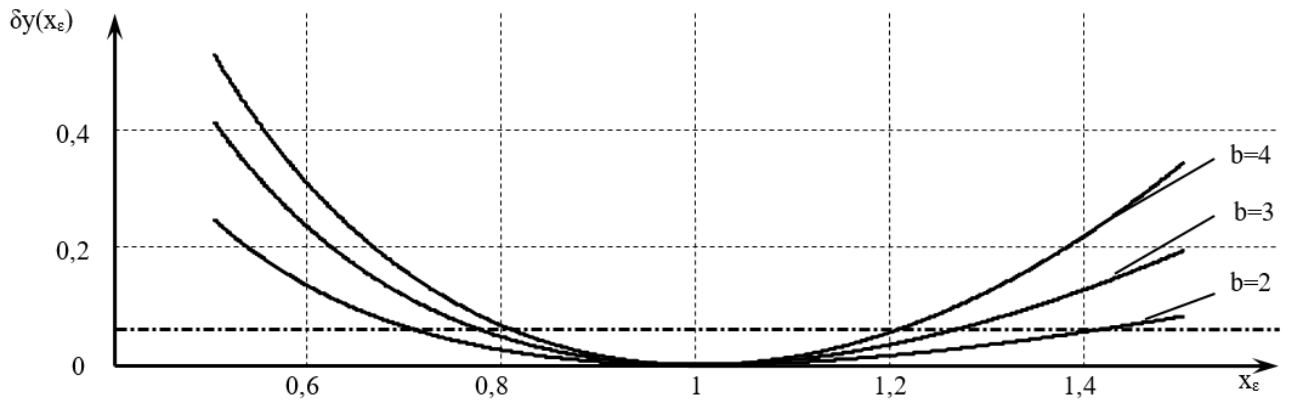


Рисунок 2.4 – Графіки залежності $\delta y = f(x_\varepsilon)$ при різних значеннях параметрів форми $b > 1$

Таким чином, отримане співвідношення (2.18) може бути використано для дослідження стійкості функцій середніх питомих витрат. Задаючи значення δy можна визначити відповідні допустимі відхилення оптимальної періодичності τ_0 . На практиці, в зв'язку з обмеженою точністю оцінки характеристик безвідмовності та вартості, визначення точних значень τ_0 важко виконати. Тому рішення другої підзадачі буде піддаватися дослідженню функції $\delta y = f(\delta C, \delta T_0)$ з визначеним результатом у вирішенні першої підзадачі діапазону допустимого відхилення моментів проведення контролю граничного стану $x_\varepsilon \in [x_{\varepsilon H}, x_{\varepsilon B}]$, де $\delta C = \Delta C / C$ - відносна помилка оцінки величини C ; а $\delta T_0 = \Delta T / T_0$ - відносна помилка оцінок величини T_0 (ΔC і ΔT - відповідні абсолютні погрішності). Для цього отримано вираження для абсолютної погрішності зміни величини y

$$\Delta y = y(C + \Delta C, T_0 + \Delta T) - y_0(C, T_0).$$

Значення функції y в околиці точки з координаторами (C, T_0) , тобто значення $y(C + \Delta C, T_0 + \Delta T)$, можуть бути розраховані з використанням цих функцій в ряд Тейлора n -го порядку. При вирішенні цієї задачі цілесообразно

обмежитися порядком $n=2$, так як $\frac{\partial^2 y}{\partial C^2} = 0$ і змішана похідна 3-го порядку також дорівнює нулю. Тоді можна записати

$$\Delta y = \frac{1}{x} \left[\frac{\Delta T}{T_0} \left[C + K_b^b (1-b) x^b \right] + \Delta C \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0} \right) + \frac{1}{2} b K_b^b (b-1) x^b \left(\frac{\Delta T}{T_0} \right)^2 \right]. \quad (2.19)$$

Використовуючи співвідношення (2.18) і (2.19) можна отримати вираз для визначення $\delta y(\delta C, \delta T_0)$. Опускаючи проміжні перетворення, напишемо підсумкове співвідношення

$$\delta y(\delta C, \delta T_0) = \frac{1}{x_\varepsilon} \times \frac{b-1}{b} \left[\delta T_0 (1 - x_\varepsilon^b) + \delta C (1 + \delta T_0) + \frac{1}{2} b x_\varepsilon^b (\delta T_0)^2 \right]. \quad (2.20)$$

Співвідношення (2.20) може бути використано для завдання вимог до точності визначення величин C і T_0 . Переймаючись значенням (при фіксованому значенні параметра b та $x_\varepsilon \in [x_{\varepsilon H}, x_{\varepsilon B}]$) можна визначити величини відносних помилок δT_0 і δC , які можуть бути прийняті в якості допустимої точності визначення відповідних вихідних даних. Графік залежності $\delta y(\delta C, \delta T_0)$ при фіксованих величинах x_ε і b показаний на рис.2.5. Межі області допустимих значень відносних помилок оцінки величин C і T_0 визначаються шляхом побудови перетинів отриманих поверхонь $\delta y(\delta C, \delta T_0)$ площинами, паралельними площині $\delta C = 0$ $\delta T_0 = 0$, аплікати яких відповідають заданим вимогам до величини відносної похибки зміни відносних середніх питомих витрат, тобто $\delta y_i - \delta y$.

Таким чином, процедура завдання вимог до величинам C і T_0 при відомій величині параметра b передбачає виконання наступних операцій.

Для заданої величини $|\delta y|$ і відомого значення b , визначаються допустимі значення $x_{\text{ен}}$ і $x_{\text{ев}}$. Для кожного з цих значень здійснюється побудова залежності $\delta y(\delta C, \delta T_0)$ і виділення областей значень δC і δT_0 , що задовольняють вимогам до δy .

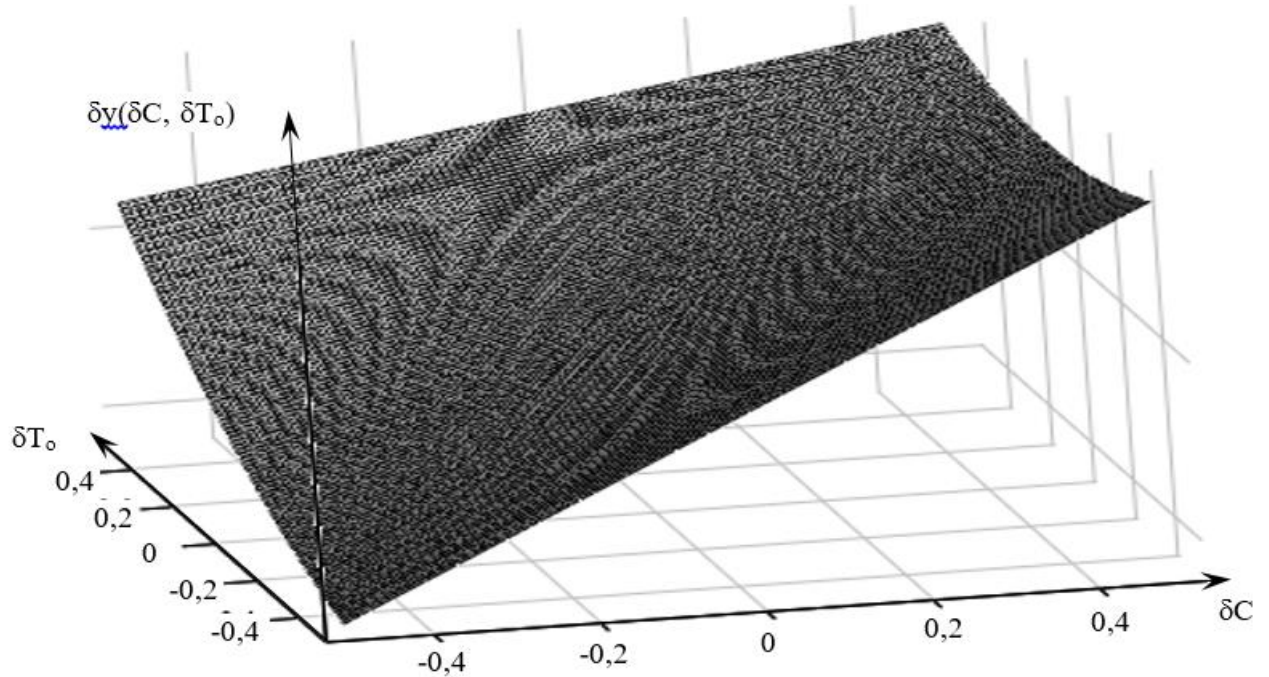


Рис.2.5. Графік залежності $\delta y(\delta C, \delta T_0)$ при фіксованих величинах $x_{\text{е}}$ і b

Криві, що обмежують ці області, (а, отже, і самі області) проектується на площину δC і δT_0 . Ділянка цієї площини, в межах якого відбувається взаємний перетин проєкцій виділених областей, характеризується тим, що при виконанні умови приналежності йому δC і δT_0 , будь-яке обране значення моменту проведення контролю граничного стану зразків обладнання ЗРМТ, при якому виконується умова $x_{\text{е}} \in [x_{\text{ен}}, x_{\text{ев}}]$, забезпечує виконання вимог до заданої величині похибки δy . Результат такої побудови при фіксованих величинах параметра $b=2$ і допустимої похибки $|\delta y| \leq 0,05$ наведено на рис.2.6, де виділена область характеризує прийнятні відносні помилки у визначенні величин C і T_0 , при яких забезпечується виконання заданих вимог

до величини δy і виконується умова $X_\varepsilon \in [X_{\varepsilon H}, X_{\varepsilon B}]$. Отримані таким чином допустимі відносні помилки оцінки показників безвідмовності перераховуються до відповідного інтервалу, межі якого можуть бути прийняті в якості приймального і бракувального рівнів показників безвідмовності.

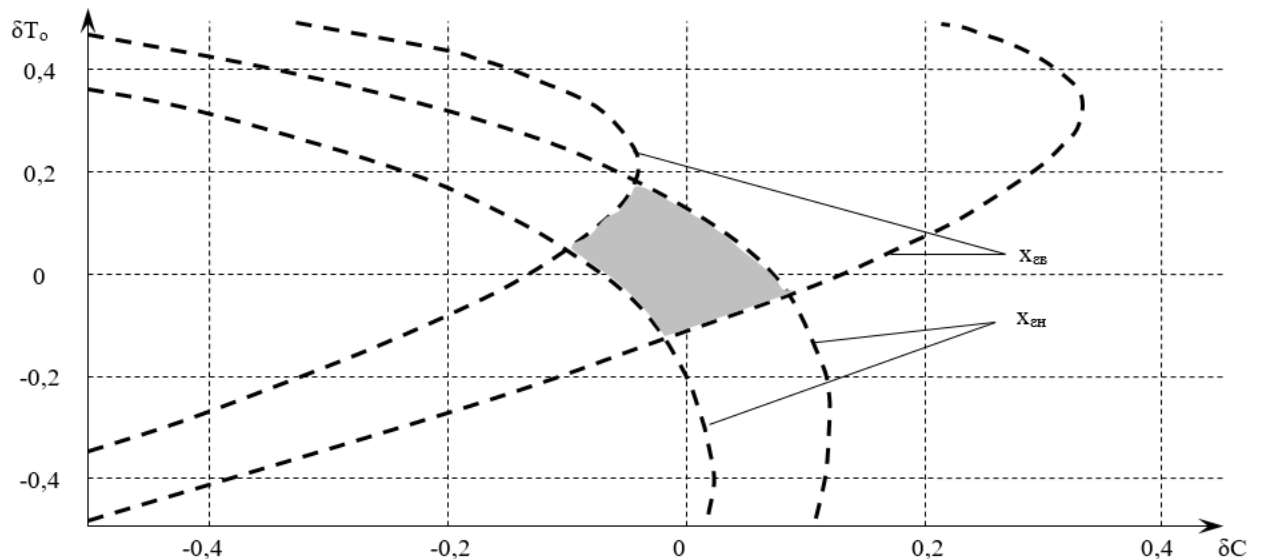


Рисунок 2.6 – Проекції перетинів залежностей $\delta y(\delta C, \delta T_0)$ на рівні $|\delta y|$

Перевагою цього варіанту обґрунтування вимог до точності контролю (оцінки) показників безвідмовності є те, що обґрунтування здійснюється з урахуванням закономірностей зміни безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ на інтервалі експлуатації, що продовжується, і вартостей ремонтів та технічних обслуговувань. При цьому недоліком є необхідність встановлення функціональної залежності показників надійності зразків обладнання ЗРМТ від тривалості експлуатації, при цьому накопичений обсяг статистики може бути недостатній для її встановлення з заданою якістю, а також необхідність оцінки середніх вартостей “малих відновлень” і “повних відновлень” та, в загальному випадку, їх функціональної залежності від тривалості

експлуатації, що важко при значному розкиді цих вартостей в різних випадках, внаслідок різноманітності конструкційного виконання функціональних вузлів і комплектуючих елементів в сучасних зразках обладнання ЗРМТ, а, отже, і способів і вартостей їх відновлення.

Таким чином, розроблений метод обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на надійність при експлуатації за технічним станом, на відміну від відомих, розроблених для дослідних або виготовлених зразків обладнання ЗРМТ, передбачає вирішення комплексу завдань: уточнення номенклатури показників надійності обладнання ЗРМТ і обґрунтування гранично допустимих значень їх показників безвідмовності; обґрунтування стратегій випробувань зразків обладнання ЗРМТ, що перебувають в експлуатації за технічним станом за кожним з показників надійності; обґрунтування вимог до точності і достовірності результатів випробувань зразків обладнання ЗРМТ, що перебувають в експлуатації, на безвідмовність. Запропонована відкрита процедура обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом, в якій, при необхідності, переглядаються попередні кількісні вимоги з урахуванням чергових отриманих результатів випробувань і підконтрольної експлуатації та іншій накопиченій інформації.

Обґрунтування (визначення) початкових характеристик проводиться з уточненням номенклатури і обґрунтуванням гранично допустимих величин нормованих показників надійності, обґрунтуванням стратегій випробувань і вимог до якості їх результатів.

Виводи до розділу 2

1. Розроблені загальні положення удосконаленого методу оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ для вирішення завдань

продовження призначених ресурсів (термінів служби), які включають:

- обґрунтування доцільності застосування розрахунково-експериментального методу оцінки їх показників залишкового ресурсу (терміну служби) і визначення взаємозв'язаної сукупності завдань, вирішення яких необхідне для індивідуального продовження призначених ресурсів (термінів служби);
- визначення переліку і послідовності етапів удосконаленого методу оцінки показників надійності;
- обґрунтування необхідності розробки сукупності часткових методів і моделей випробувань і визначення послідовності їх застосування;
- обґрунтування допущень, що використовуються при розробці часткових методів і моделей випробувань;
- уточнення поняття раціонального плану контрольних вимірювань на надійність на основі якісного аналізу методів цих випробувань.

При цьому сукупність часткових методів включає: метод обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань на надійність, метод планування випробувань на безвідмовність, метод розрахунково-експериментальної оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом з використанням результатів підконтрольної і лідерної експлуатації і випробувань на надійність.

2. Розроблений метод обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом на надійність, на відміну від відомих, розроблених для дослідних або виготовлених зразків обладнання ЗРМТ, передбачає вирішення комплексу завдань:

- уточнення номенклатури показників надійності зразків обладнання ЗРМТ і обґрунтування гранично допустимих значень їх показників безвідмовності;

- обґрунтування стратегій випробувань зразків обладнання ЗРМТ по кожному з показників надійності, що контролюються (оцінюються);
- обґрунтування вимог до точності і достовірності результатів випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність.

Комплексність у вирішенні вищеназваних завдань обумовлена необхідністю зниження сумарних витрат на ТЕ і Р зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом за рахунок узгодженого (взаємозв'язаного) обґрунтування вимог до величин показників надійності, стратегій випробувань за кожним показником надійності і вимог до якості результатів цих випробувань, що, у свою чергу, дозволяє забезпечити коректність рішень, що приймаються за результатами експлуатації і випробувань на надійність. Запропонована відкрита процедура обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ, в якій, при необхідності, переглядаються попередні кількісні вимоги з урахуванням чергових отриманих результатів випробувань і підконтрольної експлуатації та іншій накопиченій інформації.

3. При обґрунтуванні початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на надійність запропоновано в якості нормованих використовувати показники безвідмовності: “ймовірність безвідмовного включення” і “середній наробіток на відмову” та показники залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ: “середній залишковий ресурс (термін служби)”. Для кожного з вищеназваних показників обґрунтовані стратегії випробувань. При цьому для контролю (оцінки) показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом запропоновано використовувати стратегії, відповідні одноступеневим випробуванням, а при випробуваннях на безвідмовність – стратегії, відповідні послідовним випробуванням. Для оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ запропоновано представляти результати підконтрольної експлуатації і

випробувань на безвідмовність в якості результатів випробувань на довговічність і використовувати стратегію випробувань, відповідну послідовним випробуванням.

4. Проведений аналіз різних варіантів обґрунтування вимог до точності і достовірності результатів випробувань зразків обладнання ЗРМТ на надійність. Розроблена процедура вибору варіанту обґрунтування цих вимог залежно від накопиченої інформації про вартість відновлення працездатності і ресурсу зразків обладнання ЗРМТ і їх складових частин, величинах “втрат” у разі ухвалення помилкових рішень при контролі і оцінці показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ. Запропонований новий варіант обґрунтування вимог до точності оцінки показників безвідмовності, що забезпечує мінімум питомих сумарних витрат на цикл “експлуатація-ремонт”, з урахуванням закону зміни безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ на продовжуваному інтервалі експлуатації і вартості ремонтів та технічних обслуговувань.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВИПРОБУВАНЬ ЗРАЗКІВ ОБЛАДНАННЯ ЗРМТ НА БЕЗВІДМОВІНСТЬ

Нижче відповідно до викладеними в розділі 2 загальним положенням удосконаленого методу оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) розробляються математичні моделі процесів випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність за показниками “ймовірність безвідмовного включення” і “середній наробіток на відмову” при відомій стратегії випробувань з урахуванням накопиченої апріорної інформації про величину контрольованого (оцінюваного) показника. Крім того, розробляється імітаційна модель процесу контрольних вимірювань технічних об’єктів на безвідмовність, яка використовується для оцінки спостережуваних ризиків і перевірки їх відповідності запланованим значенням при обґрунтуванні параметрів планів випробувань. Далі наводиться метод планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність при відомих стратегіях випробувань, в якій використовуються розроблені в цьому розділі моделі випробувань. Основні результати, викладені в даному розділі, опубліковані в [11-21].

3.1. Основні положення і допущення, прийняті при розробці математичних моделей випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність на безвідмовність

У розділі 2 показано, що рішення задачі планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність при заданій стратегії випробувань можливо тільки за наявності відповідних математичних

моделей випробувань, що визначають функціональний зв'язок між параметрами плану випробувань. Тому нижче розглядаються загальні положення щодо розробки математичних моделей випробувань для визначення параметрів планів випробувань на безвідмовність і розробці методу планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність. При цьому розглядаються характерні особливості контролю і оцінки показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ, аналізуються методи обліку апіорної інформації і обґрунтовується доцільність застосування байєсовських методів статистичного оцінювання безвідмовності, наводиться геометрична інтерпретація процесу випробувань на надійність, що використовується при розробці математичних моделей, а також обґрунтовуються прийняті допущення.

Характерними особливостями контролю (оцінки) показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ є наступні:

- контроль (оцінка) цих показників проводиться, як правило, послідовно для різних суміжних інтервалів експлуатації у бік збільшення тривалості експлуатації (рис. 2.1);
- в процесі підконтрольної експлуатації проведення технічних обслуговувань і поточних ремонтів не приводить до підвищення величин показників безвідмовності;
- на початок випробувань на безвідмовність (чергового інтервалу експлуатації) є певний об'єм статистичної інформації про невідоме значення контрольованого (оцінюваного) показника, накопиченою за результатами експлуатації зразків обладнання ЗРМТ на попередніх інтервалах і тощо.

У науково-технічній літературі [1,2,22,26,40-42] розглянуті різні способи об'єднання апіорної інформації і експериментальних даних, наприклад, метод лінійного об'єднання незміщених оцінок показників надійності подібних виробів, використання апіорних оцінок, отриманих з попередніх випробувань виробів-аналогів, регресійний метод лінійного

об'єднання оцінок, оцінювання параметрів на основі об'єднання двох вибірок, байєсовський підхід і інші. Застосування вищенаведених способів (окрім останнього) вимагає, щоб до моменту планування випробувань була відома так звана “модель перенесення інформації”, що визначає взаємозв'язок між параметрами подібних виробів. Крім того, більшість цих способів орієнтована на оцінку надійності, а стосовно контролю надійності досліджені недостатньо повно. Якщо прийняти допущення про те, що зміна величини показника безвідмовності з моменту закінчення інтервалу експлуатації (рис. 2.1), що передує випробуванням на безвідмовність, до моменту завершення цих випробувань нехтуємо мало, а режими експлуатації і випробувань відповідають передбаченим експлуатаційною документацією для даних об'єктів, то результати експлуатації за відповідний інтервал і результати випробувань на безвідмовність можна вважати однорідними. Для об'єднання однорідної інформації найбільш універсальним вважається байєсовський спосіб обліку апіорної інформації [43,57,73,75]. Тому застосування цього способу є найбільш доцільним з погляду вирішення завдань контролю і оцінки показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ при продовженні призначених ресурсів (термінів служби). Для застосування цього підходу статистична інформація про невідоме значення контрольованого (оцінюваного) показників безвідмовності представляється у вигляді деякого апіорного розподілу, його числових характеристик і так далі. Оскільки величина конкретного показника безвідмовності невідома, вона формально може бути представлена у вигляді випадкової величини. При цьому апіорний розподіл відображає ступінь визначеності інформації про значення даного показника безвідмовності на початок випробувань. Загальна байєсовська процедура оцінювання має такі різновиди як параметричне байєсовське оцінювання (задано параметричне сімейство для розподілу випадкової величини), непараметричне байєсовське оцінювання (розподіл випадкової величини невідомий або належить деякому класу розподілів),

повна апіорна невизначеність (щільність апіорного розподілу показника безвідмовності відома повністю), часткова апіорна невизначеність (задана кінцева кількість обмежень, що накладаються на функціонали від апіорної щільності показника безвідмовності), емпіричне байєсовське оцінювання (апіорний розподіл показника безвідмовності повністю невідомий). Нижче, з урахуванням допущень підрозділу 2.1 (відомі закони розподілу випадкових величин) розглянуті методи параметричного байєсівського оцінювання з повною або частковою невизначеністю.

Розглянемо інші загальні положення, прийняті при розробці математичних моделей випробувань, а саме, геометричну інтерпретацію процесу проведення випробувань зразків обладнання ЗРМТ по показникам безвідмовності [53, 79, 80].

Процес проведення циклових випробувань зразків обладнання ЗРМТ на представляється як процес блукання точки, координати якої відповідають фактичним результатам випробувань в даний момент часу, в першій чверті системи координат “тривалість випробувань – кількість відмов” (рис.3.1), де під тривалістю випробувань [79, 80] розуміється сумарна кількість проведених циклів “включено – вимкнено” при циклових випробуваннях або сумарний наробіток зразків обладнання ЗРМТ при прогоні, а під кількістю відмов – відповідно, кількість невдалих циклів “включено – вимкнено” з сумарної кількості проведених циклів або кількість відмов за сумарний наробіток.

Переміщення даної точки уздовж осі абсцис відбувається на величину, відповідну тривалості випробувань зразків обладнання ЗРМТ. Переміщення уздовж осі ординат відбувається на одиницю після виявлення чергової відмови з точки, координати якої відповідають фактичним тривалості випробувань і числу виявлених відмов до даного моменту часу. Таке блукання, відповідне процесу послідовних випробувань, триває до першого влучення в будь-яку з точок зупинки, сукупність яких утворює межу зупинки

і обмежує область блукань. Шлях з початку координат (точка О) до де-якої крапки, що характеризує фактичні результати випробувань в даний момент часу, називається траєкторією. Плани послідовних випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність є планами першого входження [79, 80].

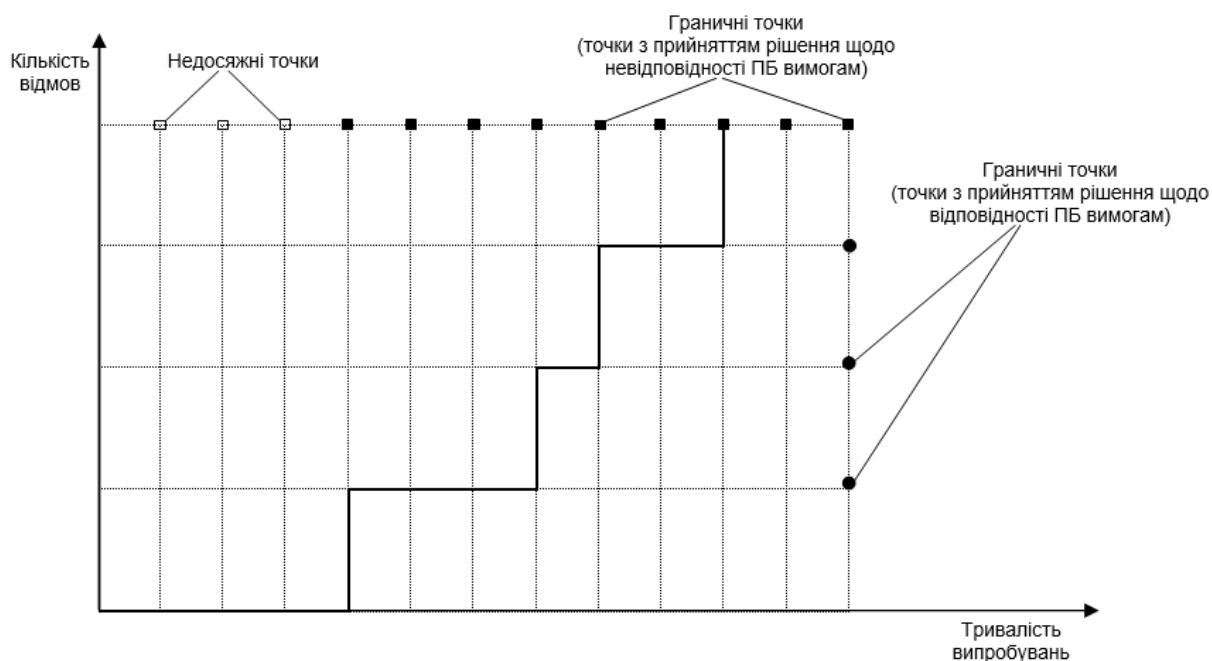


Рисунок 3.1 – Графічне представлення процесу випробувань на безвідмовність як блукаючої крапки в системі координат “тривалість випробувань – кількість відмов”

При цьому межі зупинки зафіксовані у вищезазначеній системі координат до початку випробувань і їх положення не залежить від поточних результатів випробувань. Область блукань складається з безлічі прохідних точок, тобто точок в системі координат, які не є точками зупинки, і ймовірність влучення в яких з початку координат відмінна від нуля. Прохідні крапки і точки зупинки утворюють безліч досяжних крапок.

При проведенні випробувань, як правило, є часові та (або) вартісні обмеження на проведення випробувань. З урахуванням цього доцільно

використовувати замкнуті плани випробувань на надійність, які передбачають усікання за максимальною тривалістю та (або) числом відмов. Тому при проведенні випробувань зразків обладнання ЗРМТ за показниками безвідмовності для забезпечення тієї, що фізично реалізується, доцільне застосування усіченої послідовної процедури контролю безвідмовності за одним рівнем з багатоступінчатими лініями приймання і бракування. Графік послідовних випробувань, відповідний запропонованій процедурі проведення випробувань на безвідмовність, приведений на рис.3.2. Траєкторія, що описує процес послідовних випробувань, є ступінчастою лінією зі скачками в точках з координатами, відповідними моментам виявлення відмов. За відсутності відмов траєкторія, що описує процес послідовних випробувань, є горизонтальним відрізком, співпадаючим або паралельним осі абсцис.

Варіанти замкнутих схем послідовних випробувань досить детально описані в [40-42,26.36,43,109]. При цьому передбачається проведення випробувань на надійність до моменту попадання траєкторії, що описує процес послідовних випробувань, на межу однієї з областей ухвалення рішень про відповідність або про невідповідність відповідного показника безвідмовності встановленим вимогам. Слід зазначити, що методичні підходи при плануванні випробувань, приведені в [110-132], забезпечують відповідність спостережуваних значень ризику постачальника і споживача запланованим значенням. Тому надалі при розробці математичних моделей випробувань на безвідмовність доцільно використовувати ці підходи. Як відомо, значення показників достовірності результатів контрольних вимірювань визначаються з використанням оперативної характеристики, яка є функцією параметрів планів випробувань і розраховується як сума ймовірності влучення траєкторії послідовних випробувань на межу області відповідності показника безвідмовності встановленим вимогам, в крапках, ординати яких відповідають різному числу відмов. Нижче пропонується процедура визначення ймовірності переходу з початку координат або

досяжної точки в іншу досяжну точку, що дозволяє розраховувати їх з використанням байесовського підходу до обліку апіорної інформації. Відзначимо, що відомий в [43] підхід до визначення величини ймовірності переходу з початку координат в будь-яку досяжну точку розроблений стосовно планування випробувань без урахування апіорної інформації, унаслідок чого його застосування для вирішення аналогічного завдання стосовно випробувань зразків обладнання ЗРМТ ускладнене. Запропонована процедура передбачає, що будь-який замкнутий план контролю показника безвідмовності як відомий в науково-технічній літературі і нормативних документах, так і той, що знов розробляється, може бути представлений послідовним планом, усіченим за тривалістю. Для опису такого плану випробувань введемо дві підмножини S_0 і S_1 , елементами яких є тривалість випробувань, відповідна абсцисам точок перегину багатоступінчатих ліній приймання і бракування в дискретних точках, відповідних різному числу відмов (невдалих циклів “включено – вимкнено”),

$$S_0 = \{ N(0), \dots, N(i), \dots, N(d_{\text{пр}}) \}, S_1 = \{ N^*(1), \dots, N^*(i), \dots, N^*(d_{\text{бр}}) \}, \quad (3.1)$$

де $N(i)$ і $N^*(i)$ – значення абсцис ступінчастих ліній приймання і бракування відповідно при ординаті рівної i ;

$d_{\text{пр}}$ і $d_{\text{бр}}$ – максимальні значення приймального і бракувального числа відмов відповідно.

Траєкторія, що описує процес послідовних випробувань, у разі приймання перетинає відповідну лінію в одній з точок з координатами $N(i) \in S_0$. У разі бракування перетин з відповідною лінією можливо в деякій проміжній крапці з координатами (n_i, i) , що задовольняють нерівності $N^*(i-1) < n_i \leq N^*(i)$.

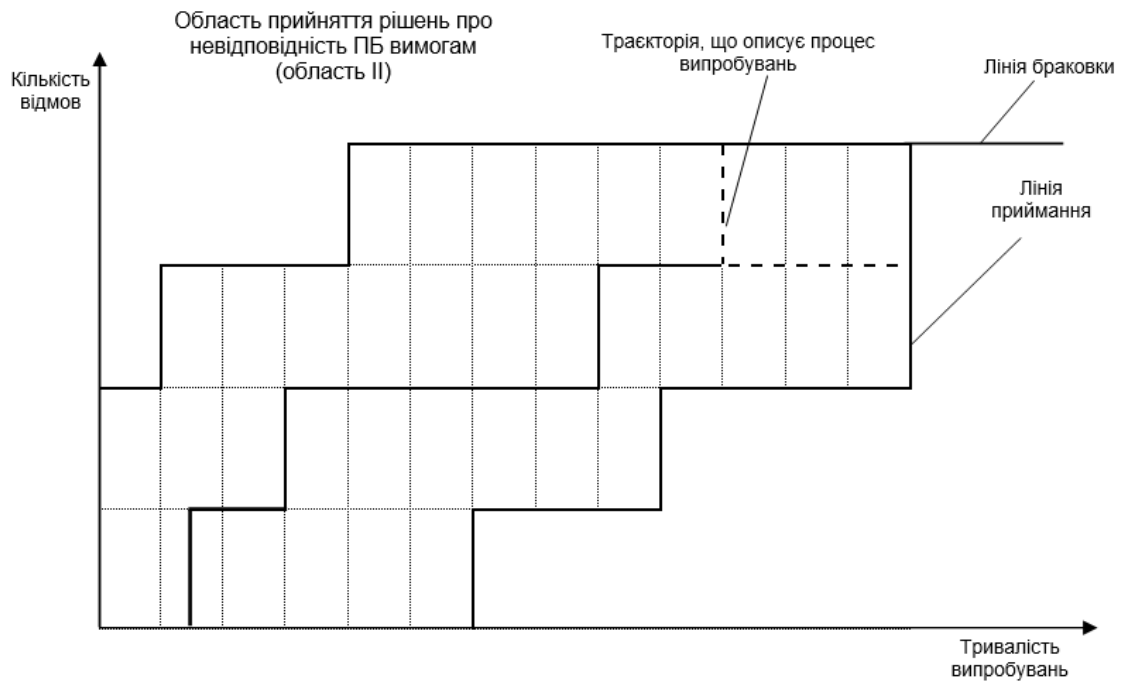


Рисунок 3.2 – Графічне представлення процесу проведення усічених послідовних випробувань зразків обладнання ЗРМТ

Оскільки рішення про приймання, бракування або продовження випробувань ухвалюються в послідовні моменти, то підмножини S_0 і S_1 можливо об'єднати в множину $S = S_0 \cup S_1$, елементи якої після впорядкування утворюють послідовність $S_{уп}$

$$S_{уп} = \{N_{уп}(j)\}, N_{уп}(j) \in S, N_{уп}(j) \geq N_{уп}(j-1), j = \overline{1, d_{пр} + d_{бр}}. \quad (3.2)$$

Для деяких планів контрольних випробувань у підмножинах (3.1) елементи, відповідні початковим значенням індексів (тобто малому числу відмов), можуть бути відсутніми. Отже, кількість елементів в послідовності $S_{уп}$ може відрізнятися від вказаної в (3.2) максимально можливої величини $(d_{пр} + d_{бр})$ в меншу сторону. Крім того, впорядковані значення елементів $S_{уп}$ розбивають область блукання (рис. 3.2) на паралельно розташовані

непересічні прямокутні ділянки, причому довжина j -го ділянки рівна $\mu_j = N_{\text{уп}}(j) - N_{\text{уп}}(j-1)$, $j = \overline{1, d_{\text{пр}} + d_{\text{бр}}}$, а висота визначається як різниця відповідної бракувальної

$$d_{\text{бр},j} = \max \left\{ i \mid N^*(i) \geq N_{\text{уп}}(j) \geq N^*(i-1) \right\}$$

i приймальної

$$d_{\text{пр},j} = \max \left\{ i \mid N_{\text{уп}}(j) \geq N(i) \right\}$$

кількості відмов, що характеризують ординати точок зупинки випробувань на відповідному прямокутному j -участку. Відповідно, точки з координатами $(N; d)$, що задовольняють системі нерівностей

$$\begin{cases} N_{\text{уп}}(j-1) < N \leq N_{\text{уп}}(j); \\ d_{\text{пр},j} + 1 \leq d \leq d_{\text{бр},j} - 1, \end{cases} \quad (3.3)$$

є досяжними і в сукупності за всіма прямокутними ділянками утворюють область блукання, відповідну процесу послідовних випробувань.

Вищенаведені положення поширюються на випробування за показником безвідмовності “середній наробіток на відмову” за умови зміни величини $N(i)$ на $T(i)$, $N^*(i)$ на $T^*(i)$, $N_{\text{уп}}(j)$ на $T_{\text{уп}}(j)$ і N на T , де T – абсциса деякої досяжної точки в системі координат, $T(i)$ і $T^*(i)$ – значення абсцис східчастих ліній приймання і бракування відповідно при ординаті рівній i , $T_{\text{уп}}(j)$ – j -ий елемент впорядкованої послідовності, складеної з абсцис точок перегину багатоступеневих ліній приймання і бракування.

Співвідношення, що визначає величину довірчої ймовірності події “дійсне значення позитивного показника безвідмовності перевищує відповідну односторонню нижню довірчу межу” при фіксованому об’ємі вибірки (тривалість випробувань, кількість відмов за цю тривалість),

стосовно вищенаведеної геометричної інтерпретації процесу випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність, описує суму ймовірності влучення в точки, абсциси яких відповідають тривалості випробувань, а ординати – числу відмов від нуля до фіксованого числа відмов. Ймовірність влучення в конкретну точку вищезгаданої системи координат (3.2) можна знайти як різницю ймовірності подій “дійсне значення показника безвідмовності не перевищує відповідну односторонню нижню довірчу межу”, визначених за однакову тривалість випробувань і різне число відмов, що відрізняється на одиницю (у меншу сторону).

Величину ризику споживача можна розрахувати як суму умовної ймовірності влучання з початку координат в кожную точку лінії приймання за умови, що показник безвідмовності не відповідає встановленим вимогам. Аналогічно величину ризику постачальника можна розрахувати як суму умовної ймовірності влучення на лінію бракування за умови, що показник безвідмовності відповідає встановленим вимогам.

При розробці математичних моделей випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність використані припущення про те, що об’єкт випробувань є таким, що обслуговується і відновлюється, а зміною безвідмовності об’єктів випробувань, а, отже, і зміною величини показників безвідмовності, що контролюються (оцінюються), за тривалість випробувань можна нехтувати, оскільки їх тривалість зневажливо мала в порівнянні з ресурсом об’єкту випробувань.

Отже можна вважати, що спостережувані випадкові величини підпорядковані відповідно експоненціальному розподілу з постійною інтенсивністю відмов (наробітком між відмовами) і біноміальному розподілу з постійною ймовірністю відмови в кожному поодинокому досвіді (кількість невдалих циклів “включено–вимкнено”). Тоді потік відмов при випробуваннях на тривалу безперервну роботу (прогін) можна описувати простим потоком, а результати кожного окремого циклу “включено–

вимкнено” розглядати як незалежні випадкові події.

Таким чином, обґрунтована доцільність застосування байесовського підходу до обліку апіорної інформації, який узгоджується з практикою проведення випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність; показано, що за основу методичного підходу, який використовуватиметься далі при розробці математичних моделей, доцільно вибрати підхід, приведений в [125–130]; обґрунтовані прийняті при розробці математичних моделей допущення.

3.2. Математичні моделі випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність по показнику “ймовірність безвідмовного включення”

Конкретизуємо викладені в підрозділі 3.1 положень стосовно циклічних випробувань зразків обладнання ЗРМТ. Геометрично процес проведення циклічних випробувань зразків обладнання ЗРМТ може бути представлений як блукання по точках цілочисельних ґрат з координатами $(N; d_p)$ (рис.3.2), де N сумарна кількість проведених в процесі циклічних випробувань зразків обладнання ЗРМТ циклів “включено–вимкнено”, d_p – сумарна кількість невдалих циклів “включено–вимкнено” з їх загального числа. Лінія приймання включається в область ухвалення рішення про відповідність показників безвідмовності встановленим вимогам (область I) і є ступінчастою лінією зі “стрибками” в крапках з координатами $(N(i); i)$, $i = \overline{0, d_{p.pr}}$, $d_{p.pr}$ – максимальне значення приймального числа невдалих циклів “включено–вимкнено” з їх загального числа при циклових випробуваннях. Величина $N(i), i = \overline{0, d_{p.pr}}$ вибирається за критерієм мінімуму середнього об’єму циклових випробувань до ухвалення рішення про їх припинення так, щоб при перетині траєкторією послідовних випробувань лінії приймання циклових випробувань їх сумарний об’єм

забезпечував ухвалення рішення про відповідність зразків обладнання ЗРМТ встановленим вимогам щодо ймовірності безвідмовного включення з достовірністю не нижче заданої.

Максимальне значення числа бракування невдалих циклів “включено-вимкнено” при циклових випробуваннях визначається як мінімальне за критерієм достатності сумарного об’єму (у разі їх припинення з позитивним результатом) для подальшої оцінки ймовірності безвідмовного включення зразків обладнання ЗРМТ із заданою точністю. Лінія бракування включається в область ухвалення рішення про невідповідність показників безвідмовності встановленим вимогам (область II) (рис.3.2) і є ступеневою лінією зі стрибками в крапках з координатами $(N^*(i); i)$, $i = \overline{1, d_{p.бр}}$, $d_{p.бр}$ – максимальне значення числа бракування невдалих циклів “включено-вимкнено” з їх загального числа при циклових випробуваннях.

Величина $N^*(i)$, $i = \overline{1, d_{p.бр}}$ визначається з урахуванням допущення про мінімальні відновлення зразків обладнання ЗРМТ після кожної відмови (тобто в припущенні того, що безвідмовність зразків обладнання ЗРМТ в процесі циклових випробувань не поліпшується і одностороння верхня ґдовірча межа ймовірності безвідмовного включення є незростаючою функцією від поточних результатів випробувань). Тому в процесі проведення циклових випробувань зразків обладнання ЗРМТ для позитивного показника безвідмовності “ймовірність безвідмовного включення” повинна виконуватися нерівність

$$\bar{P}_{\text{вкл.}(1-\beta)} > P_{\text{вкл.тр}}, \quad (3.4)$$

де $\bar{P}_{\text{вкл.}(1-\beta)}$ – верхня межа одностороннього довірчого інтервалу ймовірності безвідмовного включення рівня $1 - \beta$.

Інакше, тобто при невиконанні цієї нерівності, циклові випробування зразків обладнання ЗРМТ слід припинити з ухваленням рішення про

бракування, оскільки при будь-якому збільшенні їх об'ємів виконання умови (3.4) не буде досягнуте. Значення $N^*(i)$ (при $i < d_{p.бp}$) визначаються за критерієм мінімуму середнього об'єму циклових випробувань до ухвалення рішення про їх припинення (рішення про бракування або приймання) так, щоб після досягнення i невдалих циклів “включено–вимкнено” сумарний об'єм проведених випробувань забезпечував ухвалення рішення про знаходження одностороннього верхнього довірчого інтервалу ймовірності безвідмовного включення поза областю допуску (нижче необхідного або гранично допустимого значення ймовірності безвідмовного включення зразків обладнання ЗРМТ) із заданою ймовірністю.

Відповідно до [7, 10, 12, 21, 23, 34, 76, 112, 115] співвідношення для визначення довірчої ймовірності при фіксованому об'ємі циклових випробувань, а також заданих апіорній щільності розподілу показників безвідмовності і його односторонньої нижньої довірчої межі можна записати у вигляді

$$\frac{\int_0^{P_{\text{вкл.}\gamma}} C_N^{d_p} x^{N-d_p} (1-x)^{d_p} f_a(x) dx}{\int_0^1 C_N^{d_p} x^{N-d_p} (1-x)^{d_p} f_a(x) dx} = G_{\text{ц.и.}}(P_{\text{вкл.}\gamma}, N, d_p, f_a(x)), \quad (3.5)$$

де $f_a(x)$ – апіорна щільність розподілу величини ймовірності безвідмовного включення,

$G_{\text{ц.и.}}(P_{\text{вкл.}\gamma}, N, d_p, f_a(x))$ – довірка ймовірність того, що при результатах циклових випробувань (N, d_p) невідоме значення ймовірності безвідмовного включення належить інтервалу $[0, P_{\text{вкл.}\gamma}]$.

Ймовірність влучення з точки, що належить області блукання, в точку, координати якої відрізняються на n по осі абсцис та на i ($i \geq 1$) по осі

ординат, відповідно до вищевикладеного підходу до інтерпретації результатів циклових випробувань і прийнятими допущеннями, без урахування обмежень області блукань, що накладаються лініями приймання і бракування, визначається таким чином

$$P_{\text{ц.и.}}(\underline{P}_{\text{вкл.}\gamma}, n, i) = G_{\text{ц.и.}}(\underline{P}_{\text{вкл.}\gamma}, n, i, f_a(x)) - G_{\text{ц.и.}}(\underline{P}_{\text{вкл.}\gamma}, n, i-1, f_a(x)). \quad (3.6)$$

При $i = 0$ в співвідношенні (3.6) від’ємник рівний 0, тобто

$$P_{\text{ц.и.}}(\underline{P}_{\text{вкл.}\gamma}, n, 0) = G_{\text{ц.и.}}(\underline{P}_{\text{вкл.}\gamma}, n, 0, f_a(x)).$$

Тоді розрахункове співвідношення для визначення ймовірності влучення з початку координат (т.О) в досягну точку з координатами $(N; d_p)$ з урахуванням обмежень області блукань, що накладаються лініями приймання і бракування, можна записати у вигляді

$$P_{P_{\text{вкл}}} (O; N, d_p) = \left[\prod_{j=1}^m \sum_{i_j=Y(j)}^{H(j)-I(j)} P_{\text{ц.и.}}(\underline{P}_{\text{вкл.}\gamma}, \mu_j, i_j) \right] P_{\text{ц.и.}}(\underline{P}_{\text{вкл.}\gamma}, N - N_{\text{уп}}(m), d_p - I(j) - i_m), \quad (3.7)$$

де $m = \max \left\{ j \mid N \geq N_{\text{уп}}(j) \right\}$ – сумарна кількість прямокутних ділянок, що

повністю розміщуються до точки з координатами, тобто $\sum_{j=1}^m \mu_j < N \leq \sum_{j=1}^{m+1} \mu_j$;

$I(j) = \sum_{a=1}^{j-1} i_a$ – арифметична сума числа реалізацій кількості невдалих

циклів “включено–вимкнено” після закінчення $(j-1)$ -ої прямокутної ділянки циклових випробувань $I(1) = 0$;

$H(j) = \min \{ d_p; d_{p, \text{бр.}j} - 1 \}$ – гранична допустима кількість невдалих циклів “включено–вимкнено” на j -ої прямокутній ділянці циклових

випробувань;

$$Y(j) = \begin{cases} 0, & \text{если } I(j) > d_{p,pr.(j+1)}; \\ 1, & \text{если } I(j) = d_{p,pr.(j+1)}. \end{cases}$$

У співвідношенні (3.7) значення кожного доданку, що стоїть під знаком суми, розраховується з використанням співвідношення (3.6), а вираз в квадратних дужках є ймовірністю влучання з початку координат в точку, координати якої відповідають координатам правої верхньої вершини останньої прямокутної ділянки, що повністю розміщується до точки з координатами $(N; d_p)$.

Математичне очікування кількості циклів “включено–вимкнено”, що реалізуються до ухвалення рішення про припинення циклових випробувань, визначається виходячи з наступної умови: необхідність в проведенні чергового циклу “включено–вимкнено” виникає, якщо в процесі проведення всіх попередніх циклів “включено–вимкнено” траєкторія послідовних випробувань не перетнула межі областей приймання або бракування, тобто залишилася в області блукання. Розрахункове співвідношення для обчислення величини шуканого математичного очікування має вигляд

$$M\left[N \middle| N(i), N^*(i)\right] = 1 + \sum_{j=1}^{d_{p,pr} + d_{p,br}} \sum_{i=N_{yp}(j-1)+1}^{N_{yp}(j)} \left[\sum_{r=d_{p,pr,j}+1}^{d_{p,br,j}-1} P_{P_{вкл}}(O; i-1, r) \right]. \quad (3.8)$$

Розрахункове співвідношення для обчислення ймовірності $P_{P_{вкл}}(O; i-1, r)$ влучення з початку координат в точку з координатами $(i-1, r)$ відповідає співвідношенню (3.7) за умови заміни величин N на $(i-1)$ і d_p на r . Вираз в квадратних дужках є ймовірністю події “траєкторія послідовних випробувань залишиться в області блукання з точками, абсциси яких рівні $(i-1)$ ”.

При обчисленні точкової оцінки $\hat{P}_{\text{вкл}}$ необхідно враховувати той факт, що форма області блукання відрізняється від прямокутної, унаслідок чого частина траєкторій (наприклад, траєкторія, що проходить через початок координат, точки з координатами $(N(2);0)$ і $(N(i);i-1)$) є неможливими. Скористаємося співвідношеннями для точкової оцінки показника безвідмовності типу “ймовірності” в “схемі біноміальних блукань”, приведеними в [79, 80]

$$\hat{P}_{\text{вкл}}(i) = \frac{P_{\text{вкл}}(O;1,0)P_{\text{вкл}}(1,0;N(i),i)}{P_{\text{вкл}}(O;N(i),i)}, \quad i > 0, \quad (3.9)$$

де $P_{\text{вкл}}(1,0;N(i),i)$ – ймовірність влучення з точки з координатами $(1,0)$ в точку з координатами $(N(i),i)$, що розраховується за співвідношенням (3.7), з урахуванням області блукань, обмеженого лініями приймання і бракування.

При $i = 0$ (тобто при безвідмовних випробуваннях) для обчислення $\hat{P}_{\text{вкл}}(0)$ можна використовувати розрахункове співвідношення, рекомендоване в [52], тобто

$$\hat{P}_{\text{вкл}}(0) = \frac{P_{\text{вкл}}(O;N(0),0)}{P_{\text{вкл}}(O;N(0)+1,0)}. \quad (3.10)$$

Відповідно до [79, 80] дисперсію точкової оцінки ймовірності безвідмовного включення в “схемі біноміальних блукань” можна визначити як

$$D[\hat{P}_{\text{вкл}}] = \left(\hat{P}_{\text{вкл}}\right)^2 - \hat{P}_{\text{вкл}}^2, \quad (3.11)$$

де величина $\hat{P}_{\text{вкл}}^2$ розраховується з використанням співвідношення

$$\hat{P}_{\text{ВКЛ}}^2(i) = \frac{P_{\text{ВКЛ}}(O; 2, 0) P_{\text{ВКЛ}}(2, 0; N(i), i)}{P_{\text{ВКЛ}}(O; N(i), i)}, \quad i > 0. \quad (3.12)$$

При $i = 0$ (тобто при безвідмовних випробуваннях) співвідношення для обчислення $\hat{P}_{\text{ВКЛ}}^2(0)$ може бути отримане аналогічно вищенаведеному для, тобто

$$\hat{P}_{\text{ВКЛ}}(0) = \frac{P_{\text{ВКЛ}}(O; N(0), 0)}{P_{\text{ВКЛ}}(O; N(0) + 2, 0)}. \quad (3.13)$$

В окремому випадку, а саме, за відсутності апіорної інформації щодо величини ймовірності безвідмовного включення (повна невизначеність), як апіорний розподіл даного показника (відповідно до вищевикладеного в підрозділі 3.1) може бути прийнято рівномірне у всьому діапазоні його можливих значень, тобто

$$f_a(P_{\text{ВКЛ}}) = \begin{cases} 1, & \text{при } P_{\text{ВКЛ}} \in [0, 1]; \\ 0, & \text{при } P_{\text{ВКЛ}} \notin [0, 1]. \end{cases} \quad (3.14)$$

При цьому співвідношення (3.13) приводиться до відомого вигляду

$$P_{\text{Ц.И.}}(P_{\text{ВКЛ.}\gamma}, n, i) = C_n^i P_{\text{ВКЛ.}\gamma}^{n-i} (1 - P_{\text{ВКЛ.}\gamma})^i. \quad (3.15)$$

Співвідношення для визначення ймовірності влучення з початку координат в досягну точку з координатами $(N; d_p)$ з урахуванням обмежень області блукань, що накладаються лініями приймання і бракування, може бути записано у вигляді

$$P_{\text{ВКЛ}}(O; N, d_p) = K_p(O; N, d_p) P_{\text{ВКЛ}}^{N-d_p} (1 - P_{\text{ВКЛ}})^{d_p}, \quad (3.16)$$

де $K_p(O; N, d_p)$ – число різних траєкторій в області блукань, обмеженого

лініями приймання і бракування, з початку координат (т.О) в крапку з координатами, яке для одноступеневої схеми випробувань дорівнює $C_N^{d_p}$.

При багатоступеневих і послідовних випробуваннях величина $K_p(O; N, d_p)$ може бути розрахована з використанням наступного співвідношення

$$K_p(O; N, d_p) = \left[\prod_{j=1}^m \sum_{i_j=Y(j)}^{H(j)-I(j)} C_{\mu_j}^{i_j} \right] \times C_{N-N_{up}(m)}^{d_p-I(j)-i_m}, \quad (3.17)$$

де $C_{\mu_j}^{i_j}$ – відповідний біноміальний коефіцієнт.

При цьому розрахункові співвідношення для визначення $\hat{D}_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}}(i)$ і $\hat{D}_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}}^2(i)$ значно спростяться

$$\hat{P}_{вкл}(i) = \frac{K_p(1, 0; N(i), i)}{K_p(O; N(i), i)}, \quad i > 0, \quad (3.18)$$

де $K_p(1, 0; N(i), i)$ – кількість різних траєкторій в області блукань, обмеженого лініями приймання і бракування, з точками з координатами (1,0) в точку з координатами (N(i), i);

$$\hat{P}_{вкл}^2(i) = \frac{K_p(2, 0; N(i), i)}{K_p(O; N(i), i)}, \quad i > 0. \quad (3.19)$$

При $i = 0$ (тобто при безвідмовних випробуваннях) шукана ймовірність може бути розрахована за рекомендованими в [79, 80]

$$\hat{P}_{вкл}(0) = \frac{N(0)}{N(0) + 1},$$

$$\hat{P}_{вкл}^2(0) = \frac{N(0)}{N(0) + 2}.$$

Тоді співвідношення для обчислення дисперсії $D[\hat{P}_{вкл}(i)]$ у разі

завершення випробувань ухваленням рішення про приймання при $i > 0$ має вигляд

$$D[\hat{P}_{\text{вкл}}(i)] = \frac{(K_p(1,0; N(i), i))^2 - K_p(2,0; N(i), i)K_p(0; N(i), i)}{(K_p(0; N(i), i))^2}, i > 0. \quad (3.20)$$

При $i = 0$ це співвідношення перетвориться до вигляду

$$D[\hat{P}_{\text{вкл}}(0)] = \frac{(N(0))^2(N(0) + 2) - N(0)(N(0) + 1)^2}{(N(0) + 1)^2(N(0) + 2)}. \quad (3.21)$$

Отримані співвідношення (3.4) – (3.21) є математичні моделі випробувань РЕС експлуатованих ЗРК на безвідмовність за показником “ймовірність безвідмовного включення”. Ці математичні моделі випробувань узагальнюють відомі моделі випробувань технічних об’єктів за показником надійності типу “ймовірність” і в окремих випадках зводяться до них. На відміну від відомих моделей послідовних випробувань без урахування апріорної інформації і моделей одноступеневих випробувань з використанням байесовського підходу до обліку апріорної інформації, розроблені математичні моделі описують процес замкнутих випробувань за показником надійності типу “ймовірність” з використанням байесовського підходу до обліку апріорної інформації про величину даного показника, накопичену за даними підконтрольної експлуатації зразків обладнання ЗРМТ. Дані моделі використовуються надалі при обґрунтуванні параметрів планів випробувань зразків обладнання ЗРМТ з метою ухвалення рішень про відповідність (невідповідності) показника безвідмовності “ймовірність безвідмовного включення” встановленим вимогам із заданою достовірністю, а у разі ухвалення рішення про відповідність – кількісної оцінки його величини із заданою точністю. Точкові оцінки ймовірності безвідмовного включення зразків обладнання ЗРМТ і їх дисперсії, розраховані за результатами циклових випробувань, використовуються надалі для побудови регресійної моделі зміни цього показника безвідмовності і обчислення оцінок показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ.

3.3. Математичні моделі випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність за показником “середній наробіток на відмову”

Конкретизуємо положення, приведені в підрозділі 3.1, стосовно випробувань зразків обладнання ЗРМТ на тривалу безперервну роботу (прогін). Геометрично процес проведення прогону зразків обладнання ЗРМТ може бути представлений в якості блукання по точках з координатами $(T; d_T)$ (рис.3.2), де T – сумарний наробіток в процесі прогону зразків обладнання ЗРМТ, d_T – сумарна кількість відмов, виявлених за наробіток T . Лінія приймання включається в область ухвалення рішення про відповідність показника безвідмовності встановленим вимогам (область I) і є ступінчастою лінією зі “стрибками” в точках з координатами $(T(i); i)$, $i = \overline{0, d_{T.пр}}$, $d_{T.пр}$ – максимальне значення приймального числа відмов за наробіток $T(i)$. Величина $T(i)$, $i = \overline{0, d_{T.пр}}$ обирається за критерієм мінімуму середнього об’єму прогону до ухвалення рішення про його припинення таким чином, щоб його сумарний об’єм на момент перетину траєкторією послідовних випробувань лінії приймання забезпечував ухвалення рішення про відповідність зразків обладнання ЗРМТ встановленим вимогам за середнім наробітком на відмову із достовірністю не нижче заданою.

Максимальне значення бракувального числа відмов при прогоні визначається як мінімальне за критерієм достатності сумарного об’єму випробувань (у разі їх припинення з позитивним результатом) для подальшої оцінки середнього наробітку на відмову зразків обладнання ЗРМТ із заданою точністю. Лінія бракування включається в область ухвалення рішення про невідповідність показника безвідмовності встановленим вимогам (область II) (рис.3.2) і є ступінчастою лінією зі скачками в точках з координатами $(T^*(i); i)$, $i = \overline{1, d_{T.бр}}$, $d_{T.бр}$ – максимальне значення бракувального числа відмов за

наробіток $T(i)$. Величина $T^*(i)$, $i = \overline{1, d_{т.бр}}$ визначається з урахуванням допущення про мінімальні відновлення зразків обладнання ЗРМТ після кожної відмови (тобто в припущенні того, що безвідмовність зразків обладнання ЗРМТ в процесі прогону не поліпшується і одностороння верхня γ -довірча межа середнього наробітку на відмову є незростаючою функцією від поточних результатів випробувань). Тому в процесі проведення прогону зразків обладнання ЗРМТ для позитивного показника надійності “середній наробіток на відмову” повинна постійно виконуватися нерівність

$$\bar{T}_{o.(1-\beta)} > T_{o.тр}, \quad (3.22)$$

де $\bar{T}_{o.(1-\beta)}$ – верхня межа одностороннього довірчого інтервалу середнього наробітку на відмову рівня $1 - \beta$.

Інакше, тобто при невиконанні цієї нерівності, прогін зразків обладнання ЗРМТ слід припинити з ухваленням рішення про бракування, оскільки при будь-якому збільшенні їх об’ємів виконання умови (3.22) не буде досягнуте. Значення $T^*(i)$ (при $i < d_{т.бр}$) визначаються за критерієм мінімуму середнього об’єму прогону до ухвалення рішення про їх припинення (рішення про бракування або приймання) таким чином, щоб після досягнення i відмов сумарний об’єм проведених випробувань забезпечував ухвалення рішення про знаходження одностороннього верхнього довірчого інтервалу середнього наробітку на відмову поза областю допуску (нижче необхідного або гранично допустимого значення середнього наробітку зразків обладнання ЗРМТ на відмову) із заданою достовірністю.

У відповідності [7, 10, 12, 21, 24, 34, 76, 112, 115] співвідношення для визначення довірчої ймовірності при фіксованому об’ємі випробувань на тривалу безперервну роботу, а також заданих апіорній щільності розподілу показника безвідмовності і його односторонньої нижньої довірчої межі можна записати у вигляді

$$\frac{\int_0^{\underline{T}_{0,\gamma}} \frac{\left(\frac{T}{x}\right)^{d_T}}{(d_T)!} \exp\left(-\frac{T}{x}\right) f_a(x) dx}{\int_0^{\infty} \frac{\left(\frac{T}{x}\right)^{d_T}}{(d_T)!} \exp\left(-\frac{T}{x}\right) f_a(x) dx} = G_{\text{прог}}(\underline{T}_{0,\gamma}, T, d_T, f_a(x)), \quad (3.23)$$

де $f_a(x)$ – апіорна щільність розподілу величини середнього наробітку на відмову; $G_{\text{прог}}(\underline{T}_{0,\gamma}, T, d_T, f_a(x))$ – довірна ймовірність того, що при результатах випробувань на тривалу безперервну роботу (T, d_T) невідоме значення середнього наробітку на відмову належить інтервалу $[0, \underline{T}_{0,\gamma}]$.

Ймовірність влучення з точки, що належить області блукання в точку, координати якої відрізняються на t по осі абсцис і на i ($i \geq 1$) по осі ординат, відповідно до вищевикладеного підходу до інтерпретації результатів випробувань на тривалу безперервну роботу (прогін) і прийнятих допущень, без урахування обмежень області блукань, що накладаються лініями приймання і бракування, визначається наступним чином

$$P_{\text{прог}}(\underline{T}_{0,\gamma}, t, i) = G_{\text{прог}}(\underline{T}_{0,\gamma}, t, i, f_a(x)) - G_{\text{прог}}(\underline{T}_{0,\gamma}, t, i-1, f_a(x)). \quad (3.24)$$

При $i = 0$ в співвідношенні (3.24) від'ємник рівний 0, тобто

$$P_{\text{прог}}(\underline{T}_{0,\gamma}, t, 0) = G_{\text{прог}}(\underline{T}_{0,\gamma}, t, 0, f_a(x)). \quad (3.25)$$

Тоді розрахункове співвідношення для визначення ймовірності влучення графіка послідовних випробувань з початку координат (т.О) в досягну точку з координатами $(T; d_T)$ з урахуванням обмежень області блукань, що накладаються лініями приймання і бракування, можна записати у вигляді

$$P_{T_0}(O; T, d_T) = \left[\prod_{j=1}^m \sum_{i_j=Y(j)}^{H(j)-I(j)} P_{\text{прог}}(T_{0,\gamma}, \mu_j, i_j) \right] P_{\text{прог}}(T_{0,\gamma}, T - T_{\text{уп}}(m), d_T - I(j) - i_m) \quad (3.26)$$

де $m = \max \left\{ j \mid T \geq T_{\text{уп}}(j) \right\}$ – сумарна кількість прямокутних ділянок, що повністю розміщуються до точки з координатами $(T; d_T)$, тобто

$$\sum_{j=1}^m \mu_j < T \leq \sum_{j=1}^{m+1} \mu_j;$$

$$I(j) = \sum_{a=1}^{j-1} i_a, \quad j = 2, 3, 4, \dots \text{ – арифметична сума числа реалізацій кількості}$$

відмов після закінчення $(j-1)$ -ої прямокутної ділянки прогону $I(1) = 0$;

$H(j) = \min \{ d_T; d_{T, \text{бр.}j} - 1 \}$ – гранична допустима кількість відмов на j -ої прямокутній ділянці прогону;

$$Y(j) = \begin{cases} 0, & \text{при } I(j) > d_{T, \text{пр.}(j+1)}; \\ 1, & \text{при } I(j) = d_{T, \text{пр.}(j+1)}. \end{cases}$$

У співвідношенні (3.26) значення кожного доданку, що стоїть під знаком суми, розраховується з використанням співвідношення (3.25), а вираз в квадратних дужках є ймовірністю влучення з початку координат в точку, координати якої відповідають координатам правої верхньої вершини останньої прямокутної ділянки, що повністю розміщується до точки з координатами $(T; d_T)$.

Математичне сподівання тривалості прогону до ухвалення рішення про його припинення визначається з урахуванням наступної умови: необхідність в подальшому проведенні прогону виникає, якщо в процесі його проведення до теперішнього моменту часу траєкторія послідовних випробувань не перетнула межі областей приймання або бракування, тобто залишилася в

області блукання. Розрахункове співвідношення для обчислення величини математичного сподівання має вигляд

$$M\left[T \middle| T(j), T^*(j)\right] = \sum_{j=1}^{d_{\text{т.пр}} + d_{\text{т.бр}}} \int_{T_{\text{уп}}(j-1)}^{T_{\text{уп}}(j)} \left[\sum_{r=d_{\text{т.пр.}j}+1}^{d_{\text{т.бр.}j}-1} P_{T_0}(O; t, r) \right] dt. \quad (3.27)$$

Розрахункове співвідношення для обчислення ймовірності $P_{T_0}(O; t, r)$ влучення з початку координат в точку з координатами $(t; r)$ відповідає співвідношенню (3.26) за умови заміни величин T на t і d_T на r . Вираз в квадратних дужках є ймовірністю події “траєкторія послідовних випробувань залишиться в області блукання з крапками, абсциси яких рівні t ”.

Застосування співвідношень для обчислення точкової оцінки \hat{T}_0 за допомогою відомих співвідношень, які застосовуються для вирішення даного завдання при визначальних випробуваннях на надійність з цензурованими вибірками (оскільки при оцінюванні у разі припинення випробувань з ухваленням рішення про приймання – остання реалізація завжди неповна) недоцільно. Це пов’язано з тим, що ці співвідношення передбачають відомими число відмов, сумарний наробіток до останньої відмови і, відповідно, наробіток до цензурування (завершення випробувань ухваленням рішення про приймання). При плануванні випробувань на тривалу безперервну роботу (прогін) випадковими є як число виникаючих відмов, так і моменти їх виникнення. Крім того, в цих співвідношеннях не враховується той факт, що область блукання відрізняється від прямокутної форми, унаслідок чого частина траєкторій (наприклад, траєкторія, що проходить з початку координат в точку з координатами $(T(i); i)$ через точки з меншим числом відмов, належні області приймання) є неможливими. Нижче для обчислення точкової оцінки середнього наробітку на відмову і її дисперсії за результатами послідовних усічених за числом відмов випробувань на

безвідмовність пропонується наступний підхід.

При випробуваннях технічних об'єктів за показником типу “наробіток” випадковою величиною є наробіток між відмовами (яка, при необхідності, потім при детермінованому сумарному наробітку може бути трансформована у випадкове число відмов). За визначенням середній наробіток на відмову є не що інше, як перший початковий момент наробітку між відмовами. Звідси точкова оцінка середнього наробітку на відмову з урахуванням відомого перетворення [7, 10, 24, 53, 88, 90, 115, 121] матиме вигляд

$$\hat{T}_o = \int_0^{\infty} \hat{P}_{T_o}(t) dt, \quad (3.29)$$

де $\hat{P}_{T_o}(t)$ – точкова оцінка післядослідної (з урахуванням фактичного результату випробувань) ймовірності безвідмовної роботи протягом часу t .

Відповідно до [79, 80] співвідношення для точкової оцінки показника безвідмовності типу “ймовірність” можна записати у вигляді

$$\hat{P}_{T_o}(i) = \frac{P_{T_o}(O; t, 0) P_{T_o}(t, 0; T(i), i)}{P_{T_o}(O; T(i), i)}, \quad i > 0. \quad (3.30)$$

Враховуючи той факт, що при $t > T(0)$ $P_{T_o}(t, 0; T(i), D(i)) = 0$, співвідношення для визначення точкової оцінки середнього наробітку на відмову при прогоні має вигляд

$$\hat{T}_o(i) = \int_0^{T(0)} \frac{P_{T_o}(O; t, 0) P_{T_o}(t, 0; T(i), i)}{P_{T_o}(O; T(i), i)} dt, \quad i > 0. \quad (3.31)$$

Дисперсію точкової оцінки середнього наробітку на відмову можна знайти за відомим в теорії ймовірності [7, 10, 15, 16, 24, 53, 88, 90] співвідношенням

$$D[\hat{T}_o] = (\hat{\alpha}_2) - [\hat{T}_{o.и}]^2. \quad (3.32)$$

Співвідношення для визначення другого початкового моменту можна отримати в результаті наступного перетворення

$$\alpha_2 = \int_0^{\infty} t^2 dF(t) = 2 \int_0^{\infty} t \times P_{T_0}(t) dt, \quad (3.33)$$

де $F(t)$ – ймовірність виникнення відмови за наробіток t .

З урахуванням вищенаведеного, співвідношення для визначення дисперсії точкової оцінки середнього наробітку на відмову можна записати у вигляді

$$D[\hat{T}_0(i)] = 2 \int_0^{T(0)} t \frac{P_{T_0}(O; t, 0) P_{T_0}(t, 0; T(i), i)}{P_{T_0}(O; T(i), i)} dt - \left[\int_0^{T(0)} \frac{P_{T_0}(O; t, 0) P_{T_0}(t, 0; T(i), i)}{P_{T_0}(O; T(i), i)} dt \right]^2. \quad (3.34)$$

У окремому випадку, а саме, за відсутності апіорної інформації щодо величини середнього наробітку на відмову (повна невизначеність), в якості апіорного розподілу даного показника може бути прийнято рівномірне в деякому діапазоні його можливих значень. При цьому співвідношення (3.26) приводиться до відомого вигляду

$$P_{\text{ц.и.}}(T_{0,\gamma}, t, i) = \frac{\left(\frac{t}{T_{0,\gamma}} \right)^i}{i!} \exp\left(- \frac{t}{T_{0,\gamma}} \right). \quad (3.35)$$

Співвідношення для визначення ймовірності влучення графіка послідовних випробувань з початку координат в досягну точку з координатами $(T; d_T)$ з урахуванням обмежень області блукань, що накладаються лініями приймання і бракування, може бути записано у вигляді

$$P_{T_0}(O; T, d_T) = Z(O; T, d_T) \times (T_0)^{-d_T} \times \exp\left(- \frac{T}{T_0} \right), \quad (3.36)$$

де $Z(O; T, d_T)$ – функція, що описує кількість можливих траєкторій в області блукань, обмеженого лініями приймання і бракування, з початку координат (T, O) в точку з координатами (T, d_T) , яке для одноступеневої схеми випробувань дорівнює $\frac{T^i}{(d_T)!}$.

При багатоступеневих і послідовних випробуваннях величина $Z(O; T, d_T)$ може бути знайдена з використанням наступного співвідношення

$$Z(O; T, d_T) = \left[\prod_{j=1}^m \sum_{i_j=Y(j)}^{H(j)-I(j)} \frac{(\mu_i)^{i_j}}{i_j!} \right] \times \frac{(T - T_{yp}(m))^{(d_T - I(j) - i_m)}}{(d_T - I(j) - i_m)!}, \quad (3.37)$$

а розрахункові співвідношення для визначення $\hat{T}_0(i)$ і $\hat{T}_0^2(i)$ значно спростяться

$$\hat{P}_{T_0}(i) = \frac{Z(t, 0; T(i), i)}{Z(O; T(i), i)}, \quad i > 0. \quad (3.38)$$

де $Z(t, 0; T(i), i)$ – функція, що описує кількість можливих траєкторій в області блукань, обмеженого лініями приймання і бракування, із точки з координатами $(t, 0)$ в точку з координатами $(T(i), i)$.

Співвідношення для визначення точкової оцінки середнього наробітку на відмову при прогоні має вигляд

$$\hat{T}_0(i) = \int_0^{T(0)} \frac{Z(t, 0; T(i), i)}{Z(O; T(i), i)} dt, \quad i > 0. \quad (3.39)$$

Тоді співвідношення для обчислення дисперсії точкової оцінки середнього наробітку на відмову перетвориться до вигляду

$$D[\hat{T}_o(i)] = 2 \int_0^{T(0)} t \frac{Z(t, 0; T(i), i)}{Z(O; T(i), i)} dt - \left[\int_0^{T(i)} \frac{Z(t, 0; T(i), i)}{Z(O; T(i), i)} dt \right]^2. \quad (3.40)$$

Отриманими співвідношеннями (3.22) – (3.40) є математичні моделі випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність за показником “середній наробіток на відмову”.

Ці математичні моделі узагальнюють відомі моделі випробувань технічних об’єктів за показником надійності типу “наробіток” і в окремих випадках зводяться до них. На відміну від моделей послідовних випробувань без урахування апріорної інформації і моделей одноступеневих випробувань з використанням байесовського підходу до обліку апріорної інформації, розроблені математичні моделі описують процес замкнутих випробувань за показником надійності типу “наробіток” з використанням байесовського підходу до обліку апріорної інформації про величину даного показника, накопичену за даними підконтрольної експлуатації зразків обладнання ЗРМТ.

Дані моделі використовуються в подальшому при обґрунтуванні параметрів планів випробувань зразків обладнання ЗРМТ з метою ухвалення рішень про відповідність (невідповідність) показників безвідмовності “середній наробіток на відмову” встановленим вимогам із заданою достовірністю, а у разі ухвалення рішення про відповідність кількісної оцінки його величини із заданою точністю. Точкові оцінки середнього наробітку зразків обладнання ЗРМТ на відмову і їх дисперсії, розраховані за результатами випробувань на тривалу безперервну роботу (прогін), використовуються надалі для побудови регресійної моделі зміни цього показника безвідмовності і обчислення оцінок показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ.

Висновки до розділу 3

1. В загальні положення по розробці моделей випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність доцільне включити:

– обґрунтування доцільності застосування байесовського підходу, що узгоджується з практикою проведення випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність, для обліку апіорної інформації про невідому величину показника безвідмовності в припущенні, що з моменту завершення інтервалу підконтрольної експлуатації, що передував випробуванням і до їх закінчення зміною величин показників безвідмовності можна нехтувати, оскільки ця тривалість несумірно мала в порівнянні з терміном служби (ресурсом) об'єкту випробування;

– представлення процесу випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність як процесу блукання точки, координати якої відповідають фактичним результатам випробувань в конкретний момент часу, в першій чверті системи координат “тривалість випробувань – кількість відмов”.

2. Розроблені математичні моделі випробувань, що є співвідношення для визначення ймовірності влучення з початку координат в будь-яку досяжну точку з урахуванням форм областей відповідності і невідповідності контрольованих показників безвідмовності встановленим вимогам; співвідношення для визначення величин ризику споживача, середній тривалості випробувань і так далі.

Розроблені математичні моделі випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність узагальнюють відомі моделі випробувань технічних об'єктів за показником надійності типу “ймовірність” і “наробіток”, та, на відміну моделей послідовних випробувань без урахування апіорної інформації і моделей одноступеневих випробувань з використанням байесовського підходу до обліку апіорної інформації, описують процес замкнутих випробувань будь-якого типу на безвідмовність з використанням

байесовського підходу до обліку апріорної інформації про величину показників безвідмовності, накопичену за даними підконтрольної експлуатації зразків обладнання ЗРМТ.

Дані моделі використовуються надалі при обґрунтуванні параметрів планів випробувань зразків обладнання ЗРМТ з метою ухвалення рішень про відповідність (невідповідності) величин показників безвідмовності встановленим вимогам із заданою достовірністю, а у разі ухвалення рішення про відповідність – кількісної оцінки його величини із заданою точністю.

Точкові оцінки показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ і їх дисперсії, розраховані за результатами випробувань на безвідмовність, використовуються надалі для побудови регресійної моделі зміни цих показників безвідмовності і обчислення оцінок показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ.

3. Застосування розроблених математичних моделей випробувань не обмежується контролем безвідмовності за одним рівнем. Після незначного їх доопрацювання і корегування оптимізаційного завдання визначення параметрів планів випробувань ці моделі можуть бути застосовані і при контролі безвідмовності за двома рівнями.

РОЗДІЛ 4

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПЛАНУВАННЯ ВИПРОБУВАНЬ З УРАХУВАННЯМ НАКОПИЧЕНОЇ АПРІОРНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

4.1. Імітаційна модель процесу контрольних випробувань технічних об'єктів на безвідмовність для перевірки відповідності спостережуваних ризиків запланованим

Особливістю планування контрольних випробувань технічних об'єктів на надійність є те, що помилка в плануванні не може бути виявлена в результаті випробувань, внаслідок чого коректність планування випробувань визначає достовірність прийняття відповідних рішень за результатами контролю надійності. Реальний результат проведення контрольних випробувань на надійність може помітно змінити впевненість у правильності прийнятого рішення. Прийняті для планування значення відповідних ризиків характеризують тільки план контролю і не можуть бути мірою цієї впевненості, тому після проведення контролю надійності доцільно оцінювати ризики постачальника α' і споживача β' [31, 41, 90]. Зазначимо, що й ті та інші ризики є умовними ймовірностями прийняття відповідних рішень, за умови рівності невідомого значення показника надійності відповідно до приймального та бракувального рівнів. Оскільки заплановані ризики відносяться до гіпотетично найгіршого результату спостережень, а спостережувані – до реального, відповідно, зрозуміло, що останні повинні не перевищувати перші. Вищенаведене дозволяє в якості міри коректності планування контрольних випробувань технічних об'єктів на надійність запропонувати наступну умову: при реалізації спланованих випробувань ризики постачальника α' і споживача β' , що спостерігаються, повинні незначно відрізнятися від заданих при плануванні α та β . У [31, 41] значення

α' і β' наведені для планів контролю показників надійності типу “ймовірність безвідмовної роботи” за одноступеневим методом. Для наведених у [31, 41] планів контролю показників надійності типу “середній наробіток на відмову” та послідовних планів випробувань за методом Ярликова, спостерігаються ризики близькі до запланованих. Для послідовних планів контролю ймовірності безвідмовної роботи за методом Вальда значення α' та β' в [31, 41] не визначені. Крім того, на практиці планування контрольних випробувань нерідко виникають ситуації, коли необхідно застосовувати плани випробувань, відсутні в [31, 41], або передбачати раніше в порівнянні з [31, 41] усічення послідовних планів. У наведених та інших випадках для перевірки коректності планування контрольних випробувань на надійність необхідно мати можливість при різних величинах приймального і бракувального рівнів показників надійності оцінювати ризики α' та β' , що спостерігаються, і до проведення випробувань та за результатами зіставлення їх із запланованими α і β , надавати рекомендації про необхідність коригування параметрів планів випробувань на надійність. Одержання таких оцінок пов'язане із необхідністю моделювання процесу контрольних випробувань на безвідмовність. При розробці імітаційної моделі використовувалися викладені в [25,44,73] та ін. літературі методи моделювання, які передбачають формування можливих значень випадкових величин із заданим законом розподілу. При цьому в процесі моделювання отримані на кожній прямокутній ділянці (рис.3.2) реалізації кількості відмов підсумовуються та після завершення чергової ділянки перевіряється виконання правил припинення випробувань.

Розроблена імітаційна модель, що описує процеси контрольних випробувань виробів на безвідмовність будь-якого типу (одноступеневих, багатоступеневих, послідовних і інших), конкретизує відомі методи і способи імітаційного моделювання стосовно нового об'єкту моделювання процесу контрольних випробувань технічних об'єктів на надійність. При цьому може

бути сформований будь-який можливий закон розподілу спостережуваних в процесі контрольних випробувань випадкових величин (наробіток між відмовами, кількість відмов за заданий наробіток і інші). Застосування розробленої імітаційної моделі дозволяє оцінювати величини спостережуваних ризиків, перевіряти відповідність цих оцінок запланованим значенням при обґрунтуванні параметрів планів випробувань для планів контрольних випробувань на безвідмовність, як приведених в нормативних документах, так і для тих, що знов розробляються. Результати такої перевірки можуть бути використані при корегуванні (уточненні) параметрів планів контрольних випробувань на безвідмовність, що, у свою чергу, дозволяє забезпечувати задану достовірність схвалюваних за результатами випробувань рішень.

4.2. Методика планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність

Методика, що викладається нижче, базується на розроблених в підрозділі 2.1 загальних положеннях методу контролю і оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ, розроблених в даному розділі математичних і імітаційної моделей випробувань, узагальненні і систематизації нормативно-технічної документації [77-88], науково-технічної літератури [5–7, 10, 12, 21, 24, 35, 44, 49, 52, 53, 76, 77, 84–90, 112, 115, 117–130], результатів виконаних НДР по питаннях планування випробувань технічних виробів, контролю і оцінки їх показників надійності. Розроблена методика розглядає питання планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність при відомому типі плану випробувань, а саме: визначення параметрів планів випробувань вибраного типу і вибір оптимального плану випробувань відповідно до початкових даних, які є на момент планування. Положення розробленої методики визначають набір

початкових даних, основні завдання, послідовність їх рішення, сукупність використовуваних моделей і вихідні дані методики.

Початкові дані. Для застосування методики передбачаються відомими: номенклатура нормованих показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ і їх гранично допустимі значення; стратегії (типи планів) випробувань за кожним показником безвідмовності; вимоги до точності і достовірності контролю і оцінки показників безвідмовності; обмеження, що накладаються на режими використання за призначенням (максимально допустима тривалість перебування у включеному стані, мінімальна тривалість перебування у вимкненому стані і інші); часові і (або) вартісні обмеження на проведення випробувань; результати контролю і оцінки показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ за інтервал підконтрольної експлуатації, передуючий випробуванням.

Область застосування методики. Методика призначена для обґрунтування величин параметрів планів випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність, рішень, що проводяться з метою ухвалення, про відповідність (невідповідності) контрольованих показників безвідмовності встановленим вимогам і, у разі їх відповідності, кількісної оцінки величин цих показників із заданою точністю, за результатами підконтрольної експлуатації і випробувань на безвідмовність, які організуються при контролі граничного стану. Розроблена методика є складовою частиною методу контролю і оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ при вирішенні завдань продовження призначених ресурсів (терміну служби).

Етапи методики. У методиці планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність можна виділити основні етапи (рис. 4.1).

1. Аналіз початкових даних: результатів підконтрольної експлуатації зразків обладнання ЗРМТ за інтервал передуючий випробуванням; номенклатури контрольованих показників безвідмовності і їх гранично допустимі значень; вимог до достовірності і точності контролю та подальшої

оцінки показників безвідмовності; обмежень, що накладаються на режими застосування за призначенням в процесі експлуатації (максимальна тривалість перебування у включеному стані, мінімальна тривалість перебування у вимкненому стані і таке інше) і інші (блоки 1 – 6).

Зміст першого етапу методики, зокрема, обмеження, що накладаються на режими застосування зразків обладнання ЗРМТ за призначенням, викладені в експлуатаційній документації відповідного об'єкту випробувань і наведені вище при аналізі зразків обладнання ЗРМТ як об'єктів випробувань на надійність (підрозділ 1.1). Порядок уточнення номенклатури контрольованих показників безвідмовності, обґрунтування їх гранично допустимих значень, вимог до достовірності і точності контролю та подальшої оцінки показників безвідмовності викладені при розробці методу обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на надійність (підрозділ 2.2). Суть аналізу початкових даних про результати підконтрольної експлуатації зразків обладнання ЗРМТ за період передуючий випробуванням полягає у виключенні аномальних спостережень і класифікації тих, що залишилися як таких, що характеризують безвідмовність в тому або іншому режимі застосування за призначенням, тобто віднесення спостережень до того або іншого контрольованого показника безвідмовності.

2. Розробка математичних моделей, що описують процес випробувань зразків обладнання ЗРМТ за кожним показником безвідмовності (блок 7). Роботи цього етапу проводяться у разі, коли для заданого типу плану випробувань відсутні відомі математичні моделі випробувань. Стосовно замкнутих послідовних випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність з урахуванням апіорної інформації розроблені математичні моделі приведені для кожного показника безвідмовності в підрозділах 3.2, 3.3.

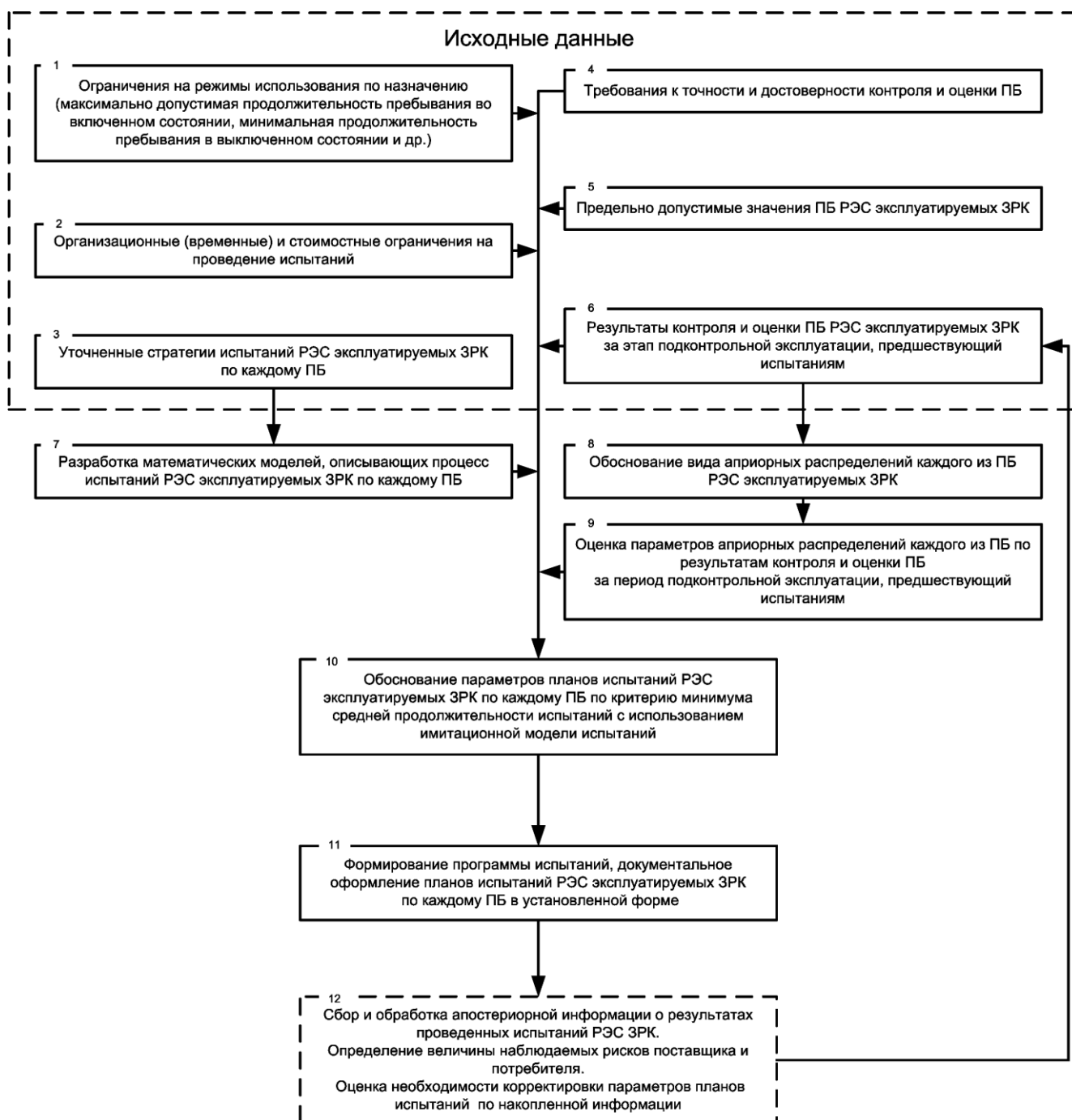


Рисунок 4.1 – Структурна схема методики планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність при відомій стратегії (типі плану) випробувань

3. Обґрунтування виду апіорних розподілів кожного з показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ і оцінки їх параметрів за результатами контролю і оцінки показників безвідмовності за період підконтрольної експлуатації, передуючий випробуванням (блоки 8, 9). В рамках цього етапу проводиться представлення результатів підконтрольної експлуатації зразків обладнання ЗРМТ як результатів випробувань на безвідмовність з фіксованим об'ємом вибірки, визначення параметрів законів розподілу величин показників безвідмовності.

4. Обґрунтування параметрів планів випробувань зразків обладнання ЗРМТ за кожним показником безвідмовності за критерієм мінімуму середньої тривалості випробувань з використанням розробленої імітаційної моделі випробувань (блоки 10, 11).

Класифікація конкретних точок в системі координат за приналежністю областям відповідності (невідповідності) контрольованого показника безвідмовності встановленим вимогам і визначення ймовірності припинення випробувань за ознакою влучення траєкторії послідовних випробувань на межу відповідних областей визначає безліч допустимих планів випробувань. При обґрунтуванні параметрів планів випробувань використовуються результати, приведені в [125–130], в яких показано, що для всіх послідовних критеріїв перевірки гіпотез сили (α, β) той, у якого межі областей ухвалення рішень вибрані так, що ймовірність влучення траєкторії послідовних випробувань на ці межі при будь-якому числі відмов постійна і рівна деякому значенню q , забезпечує найбільші коефіцієнти довіри, що гарантуються, які дорівнюють $(1-q)$ для найбільш точних довірчих меж. Крім того, передбачається корегування (при необхідності) параметрів планів випробувань на основі апіорної (на етапі планування) і (або) апостеріорної (після проведення випробувань) оцінки величин спостережуваних ризиків споживача і постачальника.

5. Документальне оформлення планів випробувань зразків обладнання ЗРМТ по кожному показнику безвідмовності у встановленій формі (блок 12). При цьому оформляється підсумковий документ, що містить параметри оптимального плану випробувань, порядок і правила їх проведення і так далі.

Таким чином, методика планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність уточнює відомі аналогічні методики стосовно даного об'єкту випробувань. На відміну від відомих методик, що передбачають обґрунтування параметрів планів випробувань конкретного типу, дана методика дозволяє обґрунтовувати параметри замкнутих планів випробувань на безвідмовність будь-якого типу з урахуванням апріорної інформації про невідому величину контрольованого (оцінюваного) показника безвідмовності і, при необхідності, корегувати ці параметри на основі апріорної (на етапі планування) оцінки величини спостережуваних ризиків споживача і постачальника.

Висновки до розділу 4

1. Розроблена імітаційна модель процесів контрольних випробувань будь-якого типу (одноступеневих, багатоступеневих, послідовних і інші) виробів на надійність, яка конкретизує відомі методи і способи імітаційного моделювання стосовно нового об'єкту моделювання процесу контрольних випробувань технічних об'єктів на надійність.

Застосування розробленої моделі дозволяє оцінювати величини спостережуваних ризиків на етапі планування та, у свою чергу, зіставляти їх із запланованими значеннями як для планів контрольних випробувань на надійність, приведених в нормативних документах, так і для тих, що розробляються. Результати даної перевірки використовуються при корегуванні (уточненні) параметрів планів контрольних випробувань на надійність, що, у свою чергу, дозволяє забезпечити прийнятну достовірність

рішень, що приймаються за результатами випробувань.

2. Розроблена методика планування випробувань на безвідмовність уточнює відомі аналогічні методики стосовно зразків обладнання ЗРМТ. На відміну від відомих методик, що передбачають обґрунтування параметрів планів випробувань конкретного типу, запропонована методика дозволяє обґрунтовувати параметри замкнутих планів випробувань на безвідмовність будь-якого типу з урахуванням апіорної інформації про невідому величину контролюваного (оцінюваного) показника безвідмовності i , при необхідності, корегувати ці параметри на основі апіорної (на етапі планування) оцінки величин спостережуваних ризиків споживача і постачальника.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті дисертаційних досліджень, виконаних авторкою, вирішено нове актуальне наукове завдання удосконалення моделей та методів оцінки безвідмовності обладнання засобів водного транспорту при експлуатації за технічним станом під час вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби).

Дане наукове завдання має важливе значення для теорії і практики підвищення ефективності та надійності засобів водного транспорту в умовах експлуатації за технічним. Відсутність аналогічних рішень в нашій країні і за кордоном робить результати досліджень пріоритетними.

На підставі проведених досліджень зроблені наступні висновки:

1. Дослідження стану безпеки руху засобів водного транспорту України свідчить про те, що проблема забезпечення безаварійності на морському і річковому транспорті залишається актуальною. При вирішенні цього значна роль належить забезпеченню надійності, а саме, безвідмовності технічних засобів в умовах експлуатації за технічним станом.

2. Застосування відомого науково-методичного апарату контролю і оцінки показників надійності при індивідуальному вирішенні завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом неефективно, оскільки ними передбачається роздільне вирішення завдань контролю і оцінки показників надійності технічних виробів, що пов'язане із значними сумарними витратами на організацію випробувань обладнання ЗРМТ окремо на безвідмовність і на довговічність, недостатньо повним обліком апріорної інформації про величини показників надійності, значним витрачанням ресурсу об'єктів випробувань, а також унаслідок труднощів виділення декількох однорідних зразків обладнання ЗРМТ в якості об'єктів для випробувань на довговічність унаслідок істотних відмінностей в умовах і режимах їх попередньої експлуатації.

3. Доведена актуальність сформульованого наукового завдання

дисертації, яке полягає в удосконаленні моделей та методів оцінки безвідмовності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом під час вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби). Рішення цього завдання зводиться до: удосконалення методу оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) в умовах експлуатації за технічним станом; удосконалення методу обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на надійність з уточненням номенклатури і обґрунтуванням величин нормованих показників надійності, стратегій випробувань і вимог до якості їх результатів; розробка математичних моделей випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність та удосконалення методу планування їх випробувань з урахуванням накопиченої апіорної інформації; удосконалення методу розрахунково-експериментальної оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ за результатами підконтрольної і лідерної експлуатації і випробувань на надійність.

4. Загальні положення удосконаленого методу оцінки показників надійності зразків обладнання ЗРМТ для вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) включають:

- обґрунтування доцільності застосування розрахунково-експериментального методу оцінки їх показників залишкового ресурсу (терміну служби) і визначення взаємозв'язаної сукупності завдань, вирішення яких необхідне для індивідуального продовження призначених ресурсів (термінів служби);
- визначення переліку і послідовності етапів удосконаленого методу оцінки показників надійності;
- обґрунтування необхідності розробки сукупності часткових методів і моделей випробувань і визначення послідовності їх застосування;
- обґрунтування допущень, що використовуються при розробці часткових методів і моделей випробувань;

– уточнення поняття раціонального плану контрольних вимірювань на надійність на основі якісного аналізу методів цих випробувань.

При цьому сукупність часткових методів включає: метод обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань на надійність, метод планування випробувань на безвідмовність, метод розрахунково-експериментальної оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом з використанням результатів підконтрольної і лідерної експлуатації і випробувань на надійність.

5. Розроблений метод обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом на надійність, на відміну від відомих, розроблених для дослідних або виготовлених зразків обладнання ЗРМТ, передбачає вирішення комплексу завдань: уточнення номенклатури показників надійності зразків обладнання ЗРМТ і обґрунтування гранично допустимих значень їх показників безвідмовності; обґрунтування стратегій випробувань зразків обладнання ЗРМТ по кожному з показників надійності, що контролюються (оцінюються); обґрунтування вимог до точності і достовірності результатів випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність.

Комплексність у вирішенні вищеназваних завдань обумовлена необхідністю зниження сумарних витрат на ТЕ і Р зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом за рахунок узгодженого (взаємозв'язаного) обґрунтування вимог до величин показників надійності, стратегій випробувань за кожним показником надійності і вимог до якості результатів цих випробувань, що, у свою чергу, дозволяє забезпечити коректність рішень, що приймаються за результатами експлуатації і випробувань на надійність.

Запропонована відкрита процедура обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ, в якій, при необхідності, переглядаються попередні кількісні вимоги з урахуванням чергових отриманих результатів випробувань і підконтрольної експлуатації

та іншій накопиченій інформації.

6. При обґрунтуванні початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗРМТ на надійність запропоновано в якості нормованих використовувати показники безвідмовності: “ймовірність безвідмовного включення” і “середній наробіток на відмову” та показники залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ: “середній залишковий ресурс (термін служби)”. Для кожного з вищеназваних показників обґрунтовані стратегії випробувань. При цьому для контролю (оцінки) показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом запропоновано використовувати стратегії, відповідні одноступеневим випробуванням, а при випробуваннях на безвідмовність – стратегії, відповідні послідовним випробуванням. Для оцінки показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ запропоновано представляти результати підконтрольної експлуатації і випробувань на безвідмовність в якості результатів випробувань на довговічність і використовувати стратегію випробувань, відповідну послідовним випробуванням.

7. Проведений аналіз різних варіантів обґрунтування вимог до точності і достовірності результатів випробувань зразків обладнання ЗРМТ на надійність. Розроблена процедура вибору варіанту обґрунтування цих вимог залежно від накопиченої інформації про вартість відновлення працездатності і ресурсу зразків обладнання ЗРМТ і їх складових частин, величинах “втрат” у разі ухвалення помилкових рішень при контролі і оцінці показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ. Запропонований новий варіант обґрунтування вимог до точності оцінки показників безвідмовності, що забезпечує мінімум питомих сумарних витрат на цикл “експлуатація-ремонт”, з урахуванням закону зміни безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ на продовжуваному інтервалі експлуатації і вартості ремонтів та технічних обслуговувань.

8. Загальні положення по розробці моделей випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність включають:

– обґрунтування доцільності застосування байєсівського підходу, що узгоджується з практикою проведення випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність, для обліку апріорної інформації про невідому величину показника безвідмовності в припущенні, що з моменту завершення інтервалу підконтрольної експлуатації, що передував випробуванням і до їх закінчення зміною величин показників безвідмовності можна нехтувати, оскільки ця тривалість несумірно мала в порівнянні з терміном служби (ресурсом) об'єкту випробування;

– представлення процесу випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність як процесу блукання точки, координати якої відповідають фактичним результатам випробувань в конкретний момент часу, в першій чверті системи координат “тривалість випробувань – кількість відмов”.

9. Розроблені математичні моделі випробувань, що є співвідношення для визначення ймовірності влучення з початку координат в будь-яку досягну точку з урахуванням форм областей відповідності і невідповідності контрольованих показників безвідмовності встановленим вимогам; співвідношення для визначення величин ризику споживача, середній тривалості випробувань і так далі. Розроблені математичні моделі випробувань зразків обладнання ЗРМТ на безвідмовність узагальнюють відомі моделі випробувань технічних об'єктів за показником надійності типу “ймовірність” і “наробіток”, та, на відміну моделей послідовних випробувань без урахування апріорної інформації і моделей одноступеневих випробувань з використанням байєсівського підходу до обліку апріорної інформації, описують процес замкнутих випробувань будь-якого типу на безвідмовність з використанням байєсовського підходу до обліку апріорної інформації про величину показників безвідмовності, накопичену за даними підконтрольної експлуатації зразків обладнання ЗРМТ. Дані моделі використовуються надалі при обґрунтуванні параметрів планів випробувань зразків обладнання ЗРМТ з метою ухвалення рішень про відповідність (невідповідність) величин показників безвідмовності встановленим вимогам із заданою достовірністю, а у разі ухвалення рішення про відповідність – кількісної оцінки його

величини із заданою точністю. Точкові оцінки показників безвідмовності зразків обладнання ЗРМТ і їх дисперсії, розраховані за результатами випробувань на безвідмовність, використовуються надалі для побудови регресійної моделі зміни цих показників безвідмовності і обчислення оцінок показників залишкового ресурсу (терміну служби) зразків обладнання ЗРМТ.

10. Застосування розроблених математичних моделей випробувань не обмежується контролем безвідмовності за одним рівнем. Після незначного їх доопрацювання і корегування оптимізаційного завдання визначення параметрів планів випробувань ці моделі можуть бути застосовані і при контролі безвідмовності за двома рівнями.

11. Розроблена імітаційна модель процесів контрольних випробувань будь-якого типу (одноступеневих, багатоступеневих, послідовних і інші) виробів на надійність, яка конкретизує відомі методи і способи імітаційного моделювання стосовно нового об'єкту моделювання процесу контрольних випробувань технічних об'єктів на надійність. Застосування розробленої моделі дозволяє оцінювати величини спостережуваних ризиків на етапі планування та, у свою чергу, зіставляти їх із запланованими значеннями як для планів контрольних випробувань на надійність, приведених в нормативних документах, так і для тих, що розробляються. Результати даної перевірки використовуються при корегуванні (уточненні) параметрів планів контрольних випробувань на надійність, що, у свою чергу, дозволяє забезпечити прийнятну достовірність рішень, що приймаються за результатами випробувань.

12. Розроблена методика планування випробувань на безвідмовність уточнює відомі аналогічні методики стосовно зразків обладнання ЗРМТ. На відміну від відомих методик, що передбачають обґрунтування параметрів планів випробувань конкретного типу, запропонована методика дозволяє обґрунтовувати параметри замкнутих планів випробувань на безвідмовність будь-якого типу з урахуванням апіорної інформації про невідому величину контролюваного (оцінюваного) показника безвідмовності і, при необхідності, корегувати ці параметри на основі апіорної (на етапі

планування) оцінки величин спостережуваних ризиків споживача і постачальника.

13. Основні результати досліджень доведені до практичної реалізації у вигляді розрахункових програм, що дало змогу їх реалізація при вирішенні завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) як окремого обладнання, так і судна в цілому. Застосування запропонованих моделей і методів дозволяє підвищити достовірність визначення нових призначених ресурсів (термінів служби) до 25 %. При цьому, за результатами математичного моделювання, можливе підвищення ймовірності виконання безвідмовного судноводіння до 15 % за рахунок впровадження на практиці.

14. Обґрунтованість результатів досліджень забезпечується глибоким аналізом сутності функціонування ЗРМТ при експлуатації за технічним станом, а також факторів, що визначають особливості їх застосування. Достовірність отриманих у дисертації наукових результатів підтверджується збіжністю теоретичних результатів з результатами статистичного моделювання, використанням апробованого математичного апарату, адекватністю удосконалених моделей та методів.

15. Мета роботи щодо підвищення призначених ресурсів (термінів служби) за рахунок впровадження запропонованих моделей та методів оцінки безвідмовності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом досягнута, поставлені часткові наукові завдання виконані. Наукові результати досліджень є внеском у розвиток моделей і методів підвищення ефективності та надійності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом.

16. Напрямами подальших досліджень доцільно визначити застосування технологій штучного інтелекту при розробці моделей та методів оцінки безвідмовності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вахцеванос Г., Льюїс Ф., Ремер М., Хесс А. та Ву Б. Інтелектуальна діагностика несправностей та прогнозування інженерних систем. Хобокен (Нью-Джерсі) : John Wiley & Sons, 2006. 376 с.
2. Жардин А. К., Лін Д., Банєвич Д. Огляд діагностики та прогнозування обладнання, що реалізує технічне обслуговування за станом. Механічні системи та обробка сигналів. 2006. Т. 20, № 7. С. 1483–1510.
3. Пехт М. Прогнозування та управління справністю електроніки. Енциклопедія структурного моніторингу стану здоров'я. 2008.
4. Хен А., Чжан С., Тан А. С., Мэтью Дж. Прогнозування обертових машин: сучасний стан, проблеми та можливості. Механічні системи та обробка сигналів. 2009. Т. 23, № 3. С. 724–739.
5. Сікорська Дж. З., Ходкевич М., Ма Л. Варіанти прогностичного моделювання для оцінки залишкового терміну придатності за галузями. Механічні системи та обробка сигналів. 2011. Т. 25, № 5. С. 1803–1836.
6. Укун С., Гебель К., Лукас П. Дж. Стандартизація методів дослідження для прогностики. Міжнародна конференція з прогностики та управління здоров'ям. 2008. С. 1–10.
7. Аналіз стану безпеки руху, польотів, судноплавства та аварійності на транспорті в Україні за I півріччя 2017 р. URL: http://dsbt.gov.ua/sites/default/files/imce/Bezpeka_DTP/analiz_2017/analiz_avariynosti_i_pivrichchya_2017.pdf (дата звернення 23.04.2023).
8. Аналіз стану безпеки руху, польотів, судноплавства та аварійності на транспорті в Україні за 2013 р. URL: https://mtu.gov.ua/files/Avar_analiz_2013.Pdf (дата звернення 23.04.2023).
9. Аналіз стану безпеки руху, польотів, судноплавства та аварійності на транспорті в Україні за 2021 р. URL: https://mtu.gov.ua/files/Avar_analiz_2021.Pdf (дата звернення 23.04.2023).

10. Зінченко С.М. Теоретичні та практичні засади автоматизації процесів керування рухом суден на основі відкритих модульних систем // дисертація на здобуття вченого ступеня д.т.н., Херсонський національний технічний університет, 2021 р.

11. Бажак О.В., Найдьонов І.В. Розроблення методів поліпшення екологічних показників засобів річкового транспорту в умовах експлуатації. Slovak international scientific journal. Vol.1. No.49, 2021. pp.13-20

12. Бажак О.В., Сьомін О.А., Генералова І.Г., Коломієць О.М. Аналіз математичного апарату прогнозування технічного стану обладнання засобів водного транспорту. Водний транспорт. 3(31). 2020. С.46–55.

13. Бажак О.В., Трофименко І.В., Бойко А.Д. Синтез моделі та алгоритмів процесу керування рухом судна. Водний транспорт. 1(32). 2021. С.29–35.

14. Бажак О.В., Дакі О.А., Рященко О.І., Тришин В.В., Пліта Л.Л. Розробка математичної моделі рівня безвідмовності обладнання засобів водного транспорту (розділ у колективної монографії). Математичний апарат прогнозування довговічності обладнання засобів водного транспорту в умовах експлуатації за технічним станом: колективна монографія / за загальною редакцією О.А. Дакі. – К.: Державний університет інфраструктури та технологій, 2021. – 250 с. ISBN 978-966-999-212-3

15. Бажак О.В., Дакі О.А., Рященко О.І., Тришин В.В., Ткаченко В.В., Дорофєєва З.Я. Аналіз методів синтезу тестових сигналів для контролю технічного стану радіонавігаційних комплексів засобів водного транспорту (розділ у колективної монографії). Математичний апарат прогнозування довговічності обладнання засобів водного транспорту в умовах експлуатації за технічним станом: колективна монографія / за загальною редакцією О.А. Дакі. – К.: Державний університет інфраструктури та технологій, 2021. – 250 с. ISBN 978-966-999-212-3

16. Бажак О.В., Урум Н.С., Іваненко В.М., Федунів В.М. Підготовка майбутніх моряків до особистої безпеки, суспільних обов'язків і боротьби за живучість судна на заняттях з фахової підготовки. *Новітні технології*. 1(12). 2021. С.91–103.

17. Бажак О.В., Пліта Л.Л. Методи підвищення безпеки судноводіння на основі локальної радіонавігаційної системи з гнучкою структурою. *Новітні технології*. 1(11). 2020. С.65-78.

18. Бажак О.В., Тихонов І.В., Богом'я В.І., Пліта Л.Л. Метод підвищення безпеки судноводіння. *Водний транспорт*. 2(33). 2021. С.144–152.

19. Бажак О.В. Удосконалення методу оцінки показників надійності обладнання засобів водного транспорту. *Водний транспорт*. 3(34). 2021. С.148–159.

20. Бажак О.В., Богом'я В.І. Методика планування випробувань зразків обладнання засобів водного транспорту на безвідмовність. *Водний транспорт*. 1(35). 2022. С.25–32.

21. Бажак О.В., Пліта Л.Л. Модель інтелектуальної системи керування судном. Тези доповідей одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції 8 – 9 квітня 2021 року Том 1: секції 1, 2. Баку – Харків – Київ – Жиліна 2021. С.18.

22. Rausand, M., & Høyland, A. (2004). *System reliability theory: models, statistical methods, and applications* (Vol. 396). John Wiley & Sons.

23. Баранов Г. Л., Носовський А. М., Тихонов І. В. Функціональна стійкість навігаційного обслуговування безпеки судноплавства на внутрішніх водних шляхах: монографія. Київ: КДАВТ, 2012. 149 с.

24. Баранов Г.Л., Тихонов І.В. Концепція побудови функціонально стійкого навігаційного обслуговування об'єктів водного транспорту в зонах підвищеного ризику плавання. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2009. Вип.2(10). С. 17-21.

25. Gertsbakh, I. (2005). Reliability theory: with applications to preventive maintenance. Springer.
26. Meeker, W. Q., & Escobar, L. A. (1998). Statistical methods for reliability data. John Wiley & Sons.
27. Elsayed, E. A. (2012). Reliability engineering. John Wiley & Sons.
28. Бенъ А.П. Методы оценки опасности траектории движения судов в системах поддержки принятия решений. *Вестник ХНТУ: сб. науч. трудов Херсонского национального технического университета*. 2009. Вып. 1 (34). С. 429-433.
29. Самарський А.А., Михайлов А.П. Математичне моделювання: Ідеї. Методи. Приклади. - К.: Наукова думка, 2005. - 312 с.
30. Богом'я В. І., Коломієць О. М. Методи підвищення ефективності процесу експлуатації суднових комплексів. *Новітні технології*. 2017. Вип. 1(3). С. 42–48.
31. Богом'я В.І., Бойко С.О., Панчишкін О. І., Поляков Г. Е., Савін Р. О. Дослідження шляхів розвитку автоматизованої системи управління суден. *Новітні технології*. 2019. Вип.2(9). С.146–156.
32. Hieronymi, A. (2013). Understanding Systems Science: A Visual and Integrative Approach. *Systems Research and Behavioral Science*, 30(5), 580-595.
33. Вагущенко Л. Л. Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судна: учебное пособие. Одесса: Латстар, 2002. 310 с.
34. Вагущенко Л. Л., Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судна: учебное пособие. 3-е издание перераб.и доп. Одесса: Феникс, 2007. 376 с.
35. Hogg R.V., McKean J., Craig A.T. Introduction to Mathematical Statistics. - Pearson, 2019. - 672 p.
36. Wackerly D., Mendenhall W., Scheaffer R.L. Mathematical Statistics with Applications. - Cengage Learning, 2014. - 902 p.

37. Rice J.A. Mathematical Statistics and Data Analysis. - Cengage Learning, 2006. - 696 p.
38. Montgomery D.C., Peck E.A., Vining G.G. Introduction to Linear Regression Analysis. - Wiley, 2021. - 672 p.
39. Вычужанин В.В., Рудниченко Н.Д. Технические риски сложных комплексов функционально взаимосвязанных структурных компонентов судовых энергетических установок. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2014. № 2. С. 68–77.
40. Rausand M., Høyland A. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications. - Wiley, 2004. - 664 p.
41. Srinath L.S. Reliability Engineering. - Prentice Hall, 1994. - 482 p.
42. Kececioglu D. Reliability Engineering Handbook. Vols 1-2. - DEStech Publications, 2002. - 1390 p.
43. Birolini A. Reliability Engineering: Theory and Practice. - Springer, 2014. - 618 p.
44. Горбань І.І. Теорія ймовірностей і математична статистика для наукових працівників та інженерів. Київ: НАНУ. ІПММС. 2003. 244 с.
45. Горошко К. О. Оцінка сучасного стану та перспективні шляхи розвитку внутрішнього водного транспорту України: збірник наукових праць ДЕТУТ. Сер. «Економіка і управління». Вип 26. Київ: ДЕТУТ, 2013. С. 169 – 173.
46. Присенко Г.В., Равікович Є.І. Прогнозування соціально-економічних процесів: Навч. посібник. - Київ: КНЕУ, 2005. - 378 с.
47. Довідник кваліфікаційних характеристик професій працівників. «Водний транспорт». Розділ «Морський транспорт». Міністерство транспорту України. 2002. Вип.67. 128 с.
48. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. URL: <https://www.twirpx.com/file/2414014/> (дата звернення: 03.07.2023).

49. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. URL: https://dnaop.com/html/2273/doc_2860-94 (дата звернення: 03.07.2023).

50. Закон України «Про транспорт» від 28.12.2015 р. №233/94-ВР. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/232/94-вр> (дата звернення 03.07.2023).

51. Saltelli A., Ratto M., Andres T., et al. Global Sensitivity Analysis: The Primer. - Wiley, 2008. - 304 p.

52. Zio E. The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis. - Springer, 2013. - 193 p.

53. Ивахненко А.Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей. / А.Г. Ивахненко, Й.А. Мюллер. – К.: Техника, 1985. – 221 с.

54. Інструкція з проведення технічного нагляду за суднами рибної промисловості України, що не підлягають нагляду класифікаційного товариства. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0749-17> (дата звернення 04.07.2019).

55. Качинский А. Б. Засады системного анализа безопасности сложных систем. Киев: ДП «НВЦ» Євроатлантикінформ, 2006. 336 с.

56. Бусыгин Б.С., Коваль Г.И., Леоненков А.В. Основы системного анализа. - К.: НТУУ "КПИ", 2009. - 348 с.

57. Згуровский М.З., Панкратова Н.Д. Системный анализ: проблемы, методология, приложения. - К.: Наукова думка, 2011. - 743 с

58. Тимошук О. М., Коломієць О. М., Данік О. В. Выбор показателей надежности с учетом интенсивности эксплуатации судна. *Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy*. 2017. №2. С. 90–95.

59. Кондрашова Н.В. Влияние способа разбиения выборки в алгоритмах МГУА на точность прогнозирования / Н.В. Кондрашова // Управляющие системы и машины. – 2003. – №2. – С. 128 – 133.

60. Коппа Ю.В. Сравнение прогнозирующих свойств моделей регрессионного типа и МГУА / Ю.В. Коппа, В.С. Степашко // Кибернетика и выч. техника. – 1999. – Вып. 117. – С. 23 – 29.

61. Сергієнко І.В. Математичні моделі і методи сучасної теорії графів: Навч. посібник. - К.: ВПЦ "Київський університет", 2015. - 319 с.
62. Тимошук О.М., Коломієць О. М., Дакі О.А., Трофименко І.В. Критерій оптимальності процесу технічного обслуговування суднових комплексів. *Наука і техніка Повітряних сил Збройних сил України*. 2017.№4(29). С.132–136.
63. Гурін О.В, Кірієнко М.В. Транспортні системи міст: Навч. посібник. - К.: НАУ, 2015. - 192 с.
64. Кудрицька Н.В. Транспортнодорожній комплекс України: сучасний стан, проблеми та шляхи розвитку: монографія. Київ: НТУ, 2010. 338 с.
65. Нікітченко М.С., Шкільнюк О.Ф. Дискретна математика: Підручник. - К.: ВПЦ "Київський університет", 2004. - 598 с.
66. Кунцевич В. М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. Киев: Наукова думка, 2006. 264с.
67. Ланецкий Б.Н., Лукьянчук В.В. Адаптивное управление техническим состоянием и надежностью сложных технических систем в условиях ресурсных ограничений. *Системи озброєння і військова техніка*. – Вип. 2 (26). – Х.: ХУ ПС. – 2011. – С. 149 – 151.
68. Козлов Б.О., Ушаков І.О. Довідник з теорії надійності. - Київ: Вища школа, 1994. - 230 с.
69. Хвостіков В.П., Рильніков О.М., Яшков В.О. Теорія надійності: Навч. посібник. - Харків: ХВУ, 2003. - 207 с.
70. Майстренко О., Гурченков О. Стан виробничого потенціалу суднобудування та перспективи його розвитку URL: http://www.nbu.gov.ua/portal/Soc_Gum/Ecan/2011_9_2/pdf (дата звернення 12.12.2022).
71. Мухін В.Є. Імітаційне моделювання: Навч. посібник. - Київ: Професіонал, 2004. - 384 с.

72. Маринов М. Л., Клименко В. Д. Учет человеческого фактора в аварийных ситуациях на море. Эксплуатация морского транспорта. 2008. № 2. С. 25-29.

73. Моделювання та оптимізація інформаційних систем в судноводінні: підручник / Кравченко Ю.В. та ін., за ред. О.М. Тимошук. Київ :ДУІТ, 2019, 312 с.

74. Мусорін О. О. Методи підвищення ефективності засобів й систем навігаційного обслуговування вантажних суден необмеженого району судноплавання: дис... к-та техніч. наук : 05.22.13/ ДП «УНДНЦ ПССЯ». Київ, 2017. 187 с.

75. Навігаційне забезпечення управління рухом суден : навчальний посібник / Богом'я В.І. та ін. Київ :ДВВП «Компас», 2012, 336 с.

76. Козлов Б.О., Ушаков І.О. Довідник з теорії надійності. - Київ: Вища школа, 1994. - 230 с.

77. Северин В.П. Теорія надійності технічних систем: Навч. посібник. - Суми: Університетська книга, 2011. - 352 с.

78. Харченко В.С. Математичні моделі та методи розрахунку надійності технічних систем. - Харків: НАУ "ХАІ", 2005. - 240 с.

79. Жуковицький І.В. Надійність технічних систем: Навч. посібник. - Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка", 2010. - 208 с.

80. Сільвестров А.М. Теоретичні основи надійності елементів і систем: Підручник. - Харків: НТУ "ХПІ", 2008. - 432 с.

81. Rausand M., Høyland A. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications. - Wiley, 2004. - 664 p.

82. Birolini A. Reliability Engineering: Theory and Practice. - Springer, 2014. - 618 p.

83. Kececioglu D. Reliability Engineering Handbook, Vols 1-2. - DEStech Publications, 2002. - 1390 p.

84. Надійність техніки. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення: ДСТУ 2864:94. – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Держстандарт України, 1995. – 30 с.

85. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними: ДСТУ 3004:95. – [Чинний від 1995-01-25]. – К.: Держстандарт України, 1994. – 124 с.

86. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги: ДСТУ 2862:94. – [Чинний від 1994-12-08]. – К.: Держстандарт України, 1994. – 38 с.

87. Надійність техніки. Моделі відмов: ДСТУ 3433:96. – [Чинний від 1997-12-05]. – К.: Держстандарт України, 1996. – 46 с.

88. Надійність техніки. Терміни та визначення: ДСТУ 2860:94. – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Держстандарт України, 1995. – 79 с.

89. Національної доповіді про стан техногенної природної безпеки в Україні у 2013 році.
URL:http://www.mns.gov.ua/files/prognoz/report/2013/2_5.pdf (дата звернення 22.12 2021).

90. Основи технічної експлуатації автоматизованої системи управління судном: підручник для студентів вищих навчальних закладів. / Богомья В.І. та ін. ; за ред. О. М. Тимощук. Київ. ДУІТ. 2018. 305 с.

91. Особливості системного підходу до вирішення наукових завдань експлуатації суднового обладнання./ Богомья В.І. та ін. ; за ред. О. М. Тимощук. Київ, ДУІТ, 2018, 305 с.

92. Переверзев Е.С. Надежность и испытания технических систем. / Е.С. Переверзев. – К.: Наукова думка, 1990. – 326 с.

93. Письменна К. С. Стан і тенденції розвитку суднобудівної промисловості в Україні: господарсько-правовий аспект URL: <http://vuzlib.com/content/view/2516/27/> (дата звернення 12.04.2022).

94. Прогнозирование и оценка технического состояния корпуса судна по замерам остаточных толщин /Баева Л.С. та ін. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 7-1. С. 7-10. URL: <http://www.applied-research.ru/ru/article/view?id=9746> (дата звернення: 30.06.2022).

95. Публічний звіт В.о. Голови Морської адміністрації за 2019 рік URL: <https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/gromadska-rada/Zvit/Publichnyi%20Zvit.pdf> (дата звернення: 21.03.2022).

96. Публічний звіт Голови Державної служби України з безпеки на транспорті М. Ноняка за 2017 рік. Державна служба України з безпеки на транспорті : веб сайт. URL: <http://dsbt.gov.ua/storinka/publichnyy-zvit-golovy-derzhavnoyi-sluzhby-ukrayiny-z-bezpeky-na-transporti-myhayla-0> (дата звернення: 09.12.2021).

97. Пятаков Э. Н. Требование к процедуре формирования второго уровня иерархической системы управления взаимодействием судов. Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, Одесса: *ИздамИнформ*, Вып.13. 2007. С. 145 – 148.

98. Варбанець Р. А., Кучеренко Ю. М., Жолтіков Є. І., Маулевич В. О., Кріжановська І. П. Застосування методу безградієнтної оптимізації при синхронізації даних моніторингу робочого процесу суднових дизелів: Одеська морська академія, національний університет Суднові енергетичні установки. №38. Одеса, 2018. С.40-53.

99. Булгаков М. П., Зенкін Є. Ю., Kuric I., Saga M. Системи і засоби транспорту. Проблеми експлуатації і діагностики [текст] / за наук. ред. проф. Грицука І.В. Херсон: ХДМА, 2019. 442 с.

100. Програмное обеспечение автоматизации оценки риска отказов сложных технических систем / В. В. Вычужанин, Н. Д. Рудниченко, А. В. Вычужанин, А. Е. Козлов // Информатика та мат. методи в моделюванні =

Informatics and Mathematical Methods in Simulation. – Одеса, 2019. – Т. 9, № 4. – С. 315–323.

101. Розвиток транспорту з метою відновлення і зростання української економіки: наукова доповідь / за ред. О.І. Никифороук. Київ: Ін-т екон. та прогнозів. НАН України. 2018. 200 с.

102. Садловська І.П. Аналіз сучасних вантажопотоків в Україні та напрями їх розвитку. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Дніпропетровськ: *Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*, 2012. Вип. 42. С. 242 – 250.

103. Hooke, Norman. Maritime Casualties: Causes and Consequences. London: Lloyd's of London Press, 1997. 327 p.

104. Структурное моделирование та символічні перетворення для управління рухом транспортних засобів/ Баранов Г. Л. та ін. Київ, 2014. 310 с.

105. Тимошук О. М., Коломієць О. М., Дакі О. А. Обґрунтування застосування сигналів з нормованим спектром для контролю технічного стану радіонавігаційних приладів засобів водного транспорту. *Новітні технології*. 2018. Вип. 2(6). С. 39–45.

106. Тимошук О. М., Коломієць О. М., Данік О. В. Вибір критерію оптимальності системи відновлення суднових комплексів. *Економіка та держава*. 2017. № 4. С. 102–104.

107. Управління технічною експлуатацією флоту : конспект лекцій. URL:
http://www.kma.ks.ua/ua/images/2_library/methodical/sud_energ/department/avtomatyka/utef/u1.pdf (дата звернення: 05.12.2023).

108. Шевченко А.П., Пліта Л.Л., Дакі О.А. Особливості організації процесу експлуатації засобів водного транспорту. *Новітні технології*. 2019. Вип. 3(10). С. 6-12.

109. Montgomery, Douglas C. Introduction to Statistical Quality Control. 7th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013. 768 p.
110. Amemiya, T. Advanced Econometrics, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1985. – 507 p.
111. Lisowski J. Game control methods in navigator decision support system / The Archives of Transport. 2005. No 3-4, Vol. XVII. P. 133 –147.
112. Lancaster P., A Finger on the Pulse. One Approach for Remote Monitoring, Diagnosis and Maintenance of Marine Diesel Engines, II International Sci-entifically-Technical Conference „Explo-Diesel & Gas Turbine '01" Gdańsk - Międzyzdroje - Kopenhaga 23-27 April 2001, Vol. 1, s. 173 -174.
113. Mallows C.L. Some comments on Cp // Technometrics. –1973. – v.15. –P.661 – 667.
114. Reform in the inland water transport: China's experience URL: <https://www.unescap.org/our-work/transport> (дата звернення 12.12.2021).
115. Sustainable development of inland waterway transport in China (2009). Theme I of a World Bank Project: Comprehensive Transport System Analysis in China URL: <http://siteresources.worldbank.org/EXTPRAL/Resources/china.pdf> (дата звернення: 05.12.2023).
116. The work plans of the 11 European Coordinators for the TENT have been finalised, establishing the basis for action until 2030. / Carlo Secchi, Karla Peijs, Laurens Jan Brinkhorst and others. Brussel, Belgium: European Commission, Directorate General for Mobility and Transport, May 2015 URL: http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/news/20150528_coordinatorworkplans_en.htm (дата звернення: 05.12.2023).
117. Chang L, Haensch W. Near-threshold operation for power-efficient computing? it depends. In: Design automation conference (DAC), 2012 49th ACM/EDAC/ IEEE; 2012, p. 1155–9.

118. Seabaugh AC, Zhang Q. Low-voltage tunnel transistors for beyond CMOS logic. *Proc IEEE* 2010;98(12):2095–110. <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2010.2070470>. (дата звернення: 05.12.2023).
119. Knoll L, Zhao Q-T, Nichau A, Trellenkamp S, Richter S, Schafer A, et al. Inverters with strained Si nanowire complementary tunnel field-effect transistors. *Electron Dev Lett, IEEE* 2013;34(6):813–5. <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2013.2258652>. (дата звернення: 05.12.2023).
120. Gandhi R, Chen Z, Singh N, Banerjee K, Lee S. CMOS-compatible verticalsilicon-nanowire gate-all-around p-type tunneling FETs with 50 mv/decade subthreshold swing. *Electron Dev Lett, IEEE* 2011;32(11):1504–6. <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2011.2165331>. (дата звернення: 02.07.2022).
121. Tomioka K, Yoshimura M, Fukui T. Steep-slope tunnel field-effect transistors using iii–v nanowire/Si heterojunction. In: *VLSI technology (VLSIT), 2012 symposium on; 2012*. p. 47–8.
122. Mohata D, Bijesh R, Zhu Y, Hudait MK, Southwick R, Chbili Z, et al. Demonstration of improved heteroepitaxy, scaled gate stack and reduced interface states enabling heterojunction tunnel FETs with high drive current and high on-off ratio. In: *VLSI technology (VLSIT), 2012 Symposium on; 2012*. p. 53–4. [doi:10.1109/VLSIT.2012.6242457](https://doi.org/10.1109/VLSIT.2012.6242457). (дата звернення: 05.12.2023).
123. Appenzeller J, Lin Y-M, Knoch J, Avouris P. Band-to-band tunneling in carbon nanotube field-effect transistors. *Phys Rev Lett* 2004;93:196805. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.196805>. URL . (дата звернення: 02.07.2022).
124. Khatami Y, Krall M, Li H, Xu C, Banerjee K. Graphene based heterostructure tunnel-FETs for low-voltage/high-performance ICs. In: *Device research conference (DRC), 2010; 2010*. p. 65–6. [doi:10.1109/DRC.2010.5551939](https://doi.org/10.1109/DRC.2010.5551939). (дата звернення: 05.12.2023).
125. Kotlyar R, Avci U, Cea S, Rios R, Linton T, Kuhn K, et al. Bandgap engineering of group iv materials for complementary n and p tunneling field effect

transistors. Appl Phys Lett 2013;102(11). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4798283>. 113106–113106–4. (дата звернення: 05.12.2023).

126. Yang Y, Su S, Guo P, Wang W, Gong X, Wang L, et al. Towards direct band-to-band tunneling in p-channel tunneling field effect transistor (TFET): technology enablement by germanium-tin (gesn). In: Electron devices meeting (IEDM), 2012 IEEE international; 2012. p. 16.3.1–4. doi:10.1109/IEDM.2012.6479053. (дата звернення: 05.12.2023).

127. Nikonov D, Young I. Uniform methodology for benchmarking beyond-CMOS logic devices. In: Electron devices meeting (IEDM), 2012 IEEE international; 2012. p. 25.4.1–4.

128. Saripalli V, Datta S, Narayanan V, Kulkarni J. Variation-tolerant ultra lowpower heterojunction tunnel FET SRAM design. In: Nanoscale architectures (NANOARCH), 2011 IEEE/ACM international symposium on; 2011. p. 45–52.

129. Cotter M, Liu H, Datta S, Narayanan V. Evaluation of tunnel FET-based flip-flop designs for low power, high performance applications. In: Quality electronic design (ISQED), 2013 14th international symposium on; 2013. p. 430–7. doi:10.1109/ISQED.2013.6523647. (дата звернення: 05.12.2023).

130. Liu H, Vaddi R, Datta S, Narayanan V. Tunnel FET-based ultra-low power, highsensitivity UHF RFID rectifier. In: Low power electronics and design (ISLPED), 2013 IEEE international symposium on; 2013. p. 157–62. doi:10.1109/ISLPED.2013.6629287. (дата звернення: 05.12.2023).

131. Datta S, Bijesh R, Liu H, Mohata D, Narayanan V. Tunnel transistors for energy efficient computing. In: Reliability physics symposium (IRPS), 2013 IEEE international; 2013. p. 6A.3.1–7. doi:10.1109/IRPS.2013.6532046. (дата звернення: 05.12.2023).

132. Dewey G, Chu-Kung B, Boardman J, Fastenau JM, Kavalieros J, Kotlyar R, et al. Fabrication, characterization, and physics of iii–v heterojunction tunneling field effect transistors (h-TFET) for steep sub-threshold swing. In:

Electron devices meeting (IEDM), 2011 IEEE international; 2011. p. 33.6.1–4. doi:10.1109/IEDM.2011.6131666/ (дата звернення: 05.12.2023).

133. Бажак О. В., Найдьонов А. І.. Формалізація процесу відновлення устаткування засобів водного транспорту. Матеріали III Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету, квітень 2021. Видавництво Іванченка І. С., 2021. С.28-32. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36574.15681>.

134. Богом'я В. І., Бажак О. В., Пліта Л. Л.. Вплив радіонавігаційних систем на безпеку судноводіння. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету, квітень 2022. Видавництво Іванченка І. С., 2022. С.16-23. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15422.36166>

Додаток А



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ
(ДУІТ)


Вул. Кирилівська, 9 м. Київ, 04071 тел./факс: (044) 463-74-70, 482-51-26

E-mail: duit@duit.edu.ua Код ЄДРПОУ 41330257

«28» 02 2024 № 186/01/11

УЗГОДЖЕНО

Проректор з науково-педагогічної роботи

 **Юрій ДУДНИК**

ЗАТВЕРДЖУЮ



 **Надія БРАЙКОВСЬКА**

АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи
БАЖАК Ольги на тему «Моделі і методи оцінки безвідмовності обладнання засобів водного транспорту в умовах експлуатації за технічним станом»

Цей акт складено про те, що наукові дослідження за темою дисертаційної роботи БАЖАК Ольги на тему «Моделі і методи оцінки безвідмовності обладнання засобів водного транспорту в умовах експлуатації за технічним станом» використовуються в навчальному процесу факультету експлуатації технічних система на водному транспорті на кафедрі суднових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації при викладанні дисциплін «Суднові системи та пристрої» і «Технічне обслуговування та ремонт суднових технічних засобів» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт.

Директор Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного, доктор технічних наук, професор



Олена ТИМОЩУК

Декан факультету експлуатації технічних система на водному транспорті, кандидат технічних наук



Олексій СЬОМІН

Додаток Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

Керівник Добров Г.О.

«04» 03 2024 року

АКТ

впровадження результатів дисертаційних досліджень

Бажак Ользі Валеріївни

«Моделі і методи оцінки безвідмовності обладнання засобів водного транспорту в умовах експлуатації за технічним станом»

Комісія у складі голови – Доброва Г.О. та членів – Лашкова В.О., Пащенко І.В. встановила, що результати наукових досліджень автора, а саме:

метод оцінки показників безвідмовності обладнання засобів морського та річкового транспорту (ЗМРТ), який на відміну від існуючих враховує те, що на зразках обладнання ЗМРТ послідовно виконуються відповідні етапи підконтрольної експлуатації за рахунок комплексного використання взаємопов'язаних часткових методів: методу обґрунтування початкових характеристик для планування випробувань зразків обладнання ЗМРТ на надійність; методу планування випробувань зразків обладнання ЗМРТ на безвідмовність; методу розрахунково-експериментальної оцінки показників залишкового ресурсу обладнання ЗМРТ при експлуатації за технічним станом.

Практичне значення одержаних результатів в тому, що їх реалізація доцільна при вирішенні завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) як окремого обладнання, так і судна в цілому.

Застосування запропонованих моделей і методів дозволяє підвищити достовірність визначення нових призначених ресурсів (термінів служби) до 25 %. При цьому, за результатами математичного моделювання, можливе підвищення ймовірності виконання безвідмовного судноводіння до 15 % за рахунок впровадження на практиці.

Акт не є підставою для фінансових розрахунків

Голова:
директор

Члени:
Майстер



Добров Г.О.

Лашков В.О.
Пащенко І.В.

Додаток Б

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Список публікацій здобувача за темою дисертації:

1. Бажак О.В., Сьомін О.А., Генералова І.Г., Коломієць О.М. Аналіз математичного апарату прогнозування технічного стану обладнання засобів водного транспорту. *Водний транспорт*. 3(31). 2020. С.46–55. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.05>
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/138>
2. Бажак О.В., Трофименко І.В., Бойко А.Д. Синтез моделі та алгоритмів процесу керування рухом судна. *Водний транспорт*. 1(32). 2021. С.29–35. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.1.32.04>
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/154>
3. Бажак О.В., Тихонов І.В., Богом'я В.І., Пліта Л.Л. Метод підвищення безпеки судноводіння. *Водний транспорт*. 2(33). 2021. С.144–152. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.16>
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/181>
4. Бажак О.В. Удосконалення методу оцінки показників надійності обладнання засобів водного транспорту. *Водний транспорт*. 3(34). 2021. С.148–159. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.17>
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/199>
5. Бажак О.В., Богом'я В.І. Методика планування випробувань зразків обладнання засобів водного транспорту на безвідмовність. *Водний транспорт*. 1(35). 2022. С.25–32. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.03> https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/205_1,0
6. Бажак О.В., Якусевич Ю.Г., Дорофєєва З.Я., Бойко С.О., Дослідження шляхів ефективного використання систем автоматизованого проектування в галузі суднобудування. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. № 34 (73). С. 94–99. https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2023/2_2023/part_2/17.pdf
doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/17

Наукові праці, в яких опубліковані додаткові наукові результати дисертації:

7. Бажак О.В. Напрями впровадження системи технічної експлуатації за станом (розділ у колективній монографії). Математичний апарат прогнозування довговічності обладнання засобів водного транспорту в умовах експлуатації за технічним станом: колективна монографія / за загальною редакцією О.А. Дакі. Державний університет інфраструктури та технологій, 2021. С.56–62.

8. Бажак О.В., Найдьонов І.В. Розроблення методів поліпшення екологічних показників засобів річкового транспорту в умовах експлуатації. *Slovak international scientific journal. Vol.1. No.49, 2021. pp.13-20.* <http://repository.vsau.org/getfile.php/27983.pdf>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Бажак О.В., Пліта Л.Л. Модель інтелектуальної системи керування судном. Тези доповідей одинадцятої Міжнародної науково-технічної конференції 8 – 9 квітня 2021 року Том 1: секції 1, 2. *Баку – Харків – Київ – Жиліна. 2021. С.18.*

10. Бажак О. В., Найдьонов А. І.. Формалізація процесу відновлення устаткування засобів водного транспорту. Матеріали III Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету, квітень 2021. *Видавництво Іванченка І. С., 2021. С.28-32.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36574.15681>.

11. Богом'я В. І., Бажак О. В., Пліта Л. Л.. Вплив радіонавігаційних систем на безпеку судноводіння. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету, квітень 2022. *Видавництво Іванченка І. С., 2022. С.16-23.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15422.36166>