

Державний університет інфраструктури та технологій
Міністерство освіти та науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БОЙКО СВІТЛАНА ОЛЕКСІЙВНА

УДК 691.694:987

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ
ОБЛАДНАННЯ ЗАСОБІВ РІЧКОВОГО ТА МОРСЬКОГО
ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗА ТЕХНІЧНИМ
СТАНОМ**

Спеціальність 271 – Річковий та морський 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

_____ С. О. Бойко

Науковий керівник:
Тимощук Олена Миколаївна,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2020

АНОТАЦІЯ

Бойко С.О. Моделі та методи прогнозування довговічності обладнання засобів річкового та морського транспорту в умовах експлуатації за технічним станом. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 271 – Річковий та морський транспорт. – Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, 2020.

В сучасних умовах не викликає сумніву те, що водний транспорт, як інфраструктурна галузь, має розвиватися швидкими темпами. Актуальність наукових досліджень пов'язана з необхідністю визначення фактичного рівня надійності комплексів обладнання засобів річкового та морського транспорту в сучасних умовах експлуатації з метою науково-методичного забезпечення вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів) як на рівні вирішення наукового завдання, так і для обґрунтування практичних рекомендацій. В практичній сфері це призводить до недостатньої інформаційної основи та виключає можливість підтримання нормативного рівня ефективності обладнання засобів річкового та морського транспорту при переведенні на експлуатацію за технічним станом. Це в сукупності складає зміст наукового завдання дисертації, що має суттєве значення для науки і практики.

Таким чином, при вирішенні проблематики розвитку транспортної галузі України, водного транспорту зокрема, актуальним є **наукове завдання** яке полягає в удосконаленні моделей та методів прогнозування довговічності обладнання засобів річкового та морського транспорту при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів). Вирішенню цього завдання і присвячена дана дисертаційна робота.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

удосконалено математичну модель процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання засобів річкового та морського транспорту, в якій, на відміну від існуючої, передбачено врахування нерівноточних результатів оцінювання показника безвідмовності в якості вихідних даних для побудови моделей за результатами експлуатаційних спостережень;

удосконалено метод прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання засобів річкового та морського транспорту з використанням результатів експлуатаційних спостережень, в якій, на відміну від існуючої, передбачено врахування залежності похибки прогнозу від способу розподілу експлуатаційних спостережень на вибірки, а також, при порівняльному використанні алгоритмів методу групового урахування аргументів запропоновано використовувати лінійну множинну регресійну модель для отримання достовірних оцінок показника довговічності в умовах використання обмеженої кількості вихідних даних при вирішенні завдань середньострокового прогнозування;

удосконалено метод оцінки показників довговічності обладнання засобів річкового та морського транспорту при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів), в якій, на відміну від існуючої, передбачено врахування залежності ефективності комплексу обладнання засобів річкового та морського транспорту від зміни технічного стану його комплектуючих, для здійснення оцінки показників довговічності з урахуванням ієрархічно розгалуженої структурної схеми його побудови.

Практичне значення одержаних результатів в тому, що їх реалізація доцільна в математичному та програмному забезпеченні, як складової технології автоматизації процесу прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання засобів річкового та морського транспорту з використанням результатів експлуатаційних спостережень. Застосування

запропонованих моделей і методів дозволяє підвисити достовірність прогнозу показників довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом в деяких випадках до 12 %.

Результати дисертаційних досліджень реалізовані у ДП «Укрводшлях» при підготуванні судноводіїв (акт від 05.10.2020 р.); а також в навчальному процесі Державного університету інфраструктури та технологій (акт від 01.10.2020 №14/а) підчас створення курсу лекцій з дисциплін «Експлуатація засобів водного транспорту», «Інфраструктура водного транспорту».

Наведені нові науково-обґрунтовані практичні рекомендації щодо визначення залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання судна 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: прогнозування, довговічність, надійність, технічний стан, засіб річкового та морського транспорту.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Бойко С.О., Михайлова Т.І., Шевченко А.П. Спосіб прогнозування відмов агрегатів суднових комплексів за даними експлуатаційних спостережень. *Новітні технології*. 2019. Вип.1(8). С.52–58.
2. 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.149–156.
3. Тимошук О.М., Трофименко А.О., Бойко С.О. Формалізація процесу технічної експлуатації елементів інтегрованої навігаційної системи. *Новітні технології*. 2019. Вип.3(10). С.13–24.

4. Дакі О.А., Бойко С.О. Математична модель функціональних систем суднових комплексів. *Водний транспорт*. 2020. Вип.1(29). С.124–131.
5. Бойко С.О. Пліта Л.Л. Методи прогнозування довговічності обладнання засобів річкового та морського транспорту в умовах експлуатації за технічним станом. *Slovak international scientific journal*. 2020. Vol.2. No.45. pp.24-30.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Данік О.В., Бойко С.О. Особливості багатокритеріальної оптимізації структури системи навігації та управління судном. Міжнародна науково-практична конференція «Водний транспорт: сучасний стан та перспективи розвитку»: тези доповідей, 16-17 травня 2019 року. К.: ДУІТ, 2019. С.381-382.
7. Коломієць О.М., Шевченко А.П., Бойко С.О. Методи автоматизації контролю технічного стану засобів водного транспорту у різноманітних умовах експлуатації. Всеукраїнська інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Технічні науки в Україні: сучасні тенденції розвитку»: тези доповідей, 20-21 листопада 2019 року. – К.: ДУІТ, 2019. С.121-123.
8. Тимошук О.М., Бойко С.О. Вибір критерію оптимальності системи технічного обслуговування суднових комплексів. II Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Навчально-наукового інституту Морського флоту Одеського національного морського університету. Одеса, 2020. С.165–168.

ANOTATION

Boyko S.O. Models and methods for predicting the durability of river and sea transport equipment under operating conditions by technical condition. - Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for a Doctor of Philosophy Degree in Specialty 271 - River and Sea Transport. - State University of Infrastructure and Technology, Kyiv, 2020.

In today's context, it is undeniable that water transport, as an infrastructure

industry, must develop rapidly. The relevance of scientific research is related to the need to determine the actual level of reliability of complexes of equipment of river and sea transport equipment in modern operating conditions with the aim of scientifically and methodically ensuring the solution of the tasks of extension of the assigned terms of service (resources) both at the level of solving the scientific task and to substantiate the practical recommendations. In the practical sphere, this leads to an insufficient information base and eliminates the possibility of maintaining the normative level of efficiency of the equipment of the river and sea transport facilities during the commissioning of the technical condition. This, in aggregate, constitutes the content of the scientific thesis of the dissertation, which is essential for science and practice.

Thus, in solving the problems of development of the transport industry of Ukraine, water transport in particular, the scientific task is urgent, which is to improve the models and methods of forecasting the longevity of the equipment of river and sea transport when operating by technical condition to solve the problems of extending the assigned service life (resources). This dissertation is dedicated to solving this problem.

Scientific novelty of the obtained results is that:

improved mathematical model of the process of changing the technical condition (level of failure) of river and sea transport equipment, in which, unlike the existing one, it takes into account non-equitable results of estimation of the failure rate as baseline data for constructing models based on operational observations;

the method of forecasting the residual life (resource) of river and sea transport equipment using the results of operational observations has been improved, which, unlike the existing one, takes into account the dependence of the prediction error on the method of the distribution of operational observations on samples, and also, in the comparative use of algo it is suggested to use a linear multiple regression model to obtain reliable long-run estimates ichnosti in the use of a limited number of initial data in solving the medium-term forecasting;

the method of estimation of durability indicators of river and maritime transport equipment during operation by technical condition has been improved to solve tasks of extension of assigned service life (resources), in which, unlike the existing one, it is envisaged to take into account the dependence of the efficiency of the river and maritime transport facilities on the change of its technical condition equipment, for estimation of the durability indices taking into account the hierarchically branched structural scheme of its construction.

The practical significance of the obtained results is that their implementation is expedient in mathematical and software, as a component of automation technology of the process of forecasting the remaining service life (resource) of river and sea transport equipment using the results of operational observations. The application of the proposed models and methods allows to increase the reliability of the forecast of the durability of the equipment of the LMWT during operation in technical condition in some cases up to 12%.

The results of dissertation research were implemented in the SE "Ukrvodshlyakh" in the training of drivers (act of 05.10.2020); as well as in the educational process of the State University of Infrastructure and Technology (act from 01.10.2020 №14 / a) during the creation of a course of lectures on the disciplines "Operation of water transport", "Infrastructure of water transport".

These new scientifically sound practical recommendations for determining the remaining life of a ship's equipment (resource) make it possible to consider the use of these approaches in other vehicle systems, as well as to significantly improve the system of technical operation of the vessel by planning and timely implementation of appropriate measures.

Keywords: forecasting, durability, reliability, technical condition, means of river and sea transport.

LIST OF BUILDER PUBLICATIONS

Scientific papers, in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Boyko S.O., Mikhailova T.I., Shevchenko A.P. The method of predicting failures of units of ship complexes according to operational observations. New technologies. 2019. Issue 1 (8). P.52–58.
2. Bogomya V.I., Boyko S.O., Panchishkin O.I., Polyakov G.E., Savin R.O. Research of ways of development of the automated control system of ships. New technologies. 2019. Issue 2 (9). P.146–156.
3. Timoshchuk O.M., Trofimenko A.O., Boyko S.O. Formalization of the process of technical operation of the elements of the integrated navigation system. New technologies. 2019. Issue 3 (10). P.13–24.
4. Daki O.A., Boyko S.O. Mathematical model of functional systems of ship complexes. Water transport. 2020. Issue 1 (29). P.124–131.
5. Boyko S.O. Methods for forecasting the durability of river and sea transport equipment in terms of technical condition. Slovak international scientific journal. 2020. Vol.2. No.45. pp.24-30.

Scientific works certifying the approbation of the dissertation materials:

6. Danik O.V., Boyko S.O. Features of multicriteria optimization of the structure of the ship navigation and control system. International scientific-practical conference "Water transport: current status and prospects for development": abstracts, May 16-17, 2019. K .: DUIT, 2019. S.381-382.
7. Kolomiets O.M., Shevchenko A.P., Boyko S.O. Methods of automation of control of a technical condition of means of water transport in various operating conditions. All-Ukrainian Internet conference of students, graduate students and young scientists "Technical sciences in Ukraine: current trends": abstracts, November 20-21, 2019. - K .: DUIT, 2019. P.121-123.

8. Timoshchuk O.M., Boyko S.O. Selection of the criterion of optimality of the system of maintenance of ship complexes. II International Scientific and Practical Maritime Conference of the Department of SEU and TE Educational and Scientific Institute of the Navy of Odessa National Maritime University. Odessa, 2020. P.165–168.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	13
ВСТУП	14
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ ТА НАУКОВО-МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ЙОГО ДОЛГОВІЧНОСТІ	21
1.1. Аналіз деградаційних процесів зміни технічного стану річкового та морського транспорту	21
1.2. Аналіз системи технічної експлуатації та її вплив на ефективність річкового та морського транспорту.....	32
1.3. Дослідження існуючих науково-методичних підходів до прогнозування технічного стану обладнання	37
1.4. Напрями впровадження системи технічної експлуатації за станом. Формування наукового завдання.....	47
Висновки до розділу 1.....	51
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ЗАГАЛЬНИХ ПОЛОЖЕНЬ ЩОДО УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ЗРМТ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ.....	54
2.1. Концептуальний підхід до прогнозування довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом з метою вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів)	55
2.2. Вибір методу прогнозування процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання.....	60
2.3. Розробка математичної моделі процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ за результатами експлуатаційних спостережень	67
2.3.1. Визначення напрямів формування математичної моделі.	67

2.3.2. Формалізація факторів впливу на процес зміни технічного стану (рівня безвідмовності) судового обладнання.....	72
2.3.3. Моделювання за експериментальними даними з використанням процедур МГУА	78
2.3.4. Перевірка адекватності моделей та оцінка якості прогнозу.	90
Висновки до розділу 2.....	95
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ЗРМТ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ	97
3.1. Метод прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ з використанням результатів експлуатаційних спостережень	98
3.2. Удосконалений метод оцінки показників довговічності комплексу обладнання при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів).....	113
3.2.1. Оцінка показників	114
3.2.2. Удосконалення методу оцінки показників довговічності комплексів обладнання.....	122
Висновки до розділу 3.....	127
РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ПРОДОВЖЕННЯ ПРИЗНАЧЕНИХ ТЕРМІНІВ СЛУЖБИ (РЕСУРСІВ)	128
4.1. Оцінка показників довговічності обладнання при експлуатації за технічним станом за результатами розрахунків	128
4.1.1. Прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ за результатами експлуатаційних спостережень.	128
4.1.2. Дослідження залежності залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання від інтенсивності експлуатації.....	140

4.2. Рекомендації щодо використання методу прогнозування довговічності обладнання при переведенні на експлуатацію за технічним станом.....	149
4.2.1. Розробка рекомендацій щодо використання методу прогнозування довговічності обладнання при експлуатації за технічним станом.	149
4.2.2. Техніко-економічна оцінка рекомендацій щодо продовження призначених термінів служби (ресурсів) комплексів обладнання ЗРМТ при переведенні на експлуатацію за технічним станом.	152
Висновки до розділу 4.....	156
ВИСНОВКИ.....	158
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	163
Додаток А.....	178
Додаток Б	180

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕД – експлуатаційна документація;

ЕТС – експлуатація за технічним станом;

ЗРМТ – засіб річкового та морського транспорту;

КТС – контроль технічного стану;

КР – капітальний ремонт;

МГУА – метод групового урахування аргументів;

МНК – метод найменших квадратів;

ПР – поточний ремонт;

ТЕ – технічна експлуатація;

СР – середній ремонт;

ТО – технічне обслуговування;

ТС – технічний стан;

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. За офіційними даними загальний стан аварійності на річковому та морському транспорті в Україні продовжує залишатися на високому рівні. Варте підкреслити, те що за статистикою останніх років технічні причини аварійності складають близько 20%, серед яких особливе місце займають проблеми технічного обслуговування та експлуатації.

Дослідження, яке виконане в межах даної дисертації показує, що існуючий парк обладнання засобів річкового та морського транспорту (ЗРМТ) по причині деградаційних процесів зміни його технічного стану, недоліків системи технічної експлуатації даного транспорту характеризується перебуванням в експлуатації обладнання, яке практично вичерпале призначені розробником і виробником терміни служби (ресурси). З іншого боку характерна мала чисельність парку однотипних комплексів, відсутність статистичних даних щодо моментів переходу обладнання у граничний стан, обмеженість можливостей підприємств промислового комплексу щодо проведення усіх видів відновлювальних робіт.

На думку фахівців основі узагальнення досвіду застосування регламентованої стратегії технічного обслуговування і ремонту визначена неможливість підтримання нормативного рівня технічної готовності існуючого парку комплексів обладнання ЗРМТ через обмежені виробничі можливості організацій-експлуатантів і виробничі потужності ремонтних підприємств промисловості. Також, виявлена низка недоліків, невідповідностей та протиріч у теорії і практиці підтримання засобів водного транспорту в належному стані та визначене основне протиріччя між існуючим постійним зниженням показників надійності обладнання ЗРМТ (в першу чергу в зв'язку з експлуатацією поза межами призначених термінів служби) і зростаючим рівнем вимог до галузі водного транспорту за

результатами вивчення існуючих стратегій технічного обслуговування і ремонту та можливостей їх застосування.

Проблеми розвитку водного транспорту України, зокрема системи технічної експлуатації 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. Севастєєв, С.Р. Смирнов та інші.

На теперішній час актуальність наукових досліджень пов'язана з необхідністю визначення фактичного рівня надійності комплексів обладнання ЗРМТ в сучасних умовах експлуатації з метою науково-методичного забезпечення вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів) як на рівні вирішення наукового завдання, так і для обґрунтування практичних рекомендацій. В практичній сфері це призводить до недостатньої інформаційної основи та виключає можливість підтримання нормативного рівня ефективності обладнання ЗРМТ при переведенні на експлуатацію за технічним станом. Це в сукупності складає зміст наукового завдання дисертації, що має суттєве значення для науки і практики.

Таким чином, при вирішенні проблематики розвитку транспортної галузі України, водного транспорту зокрема, актуальним є *наукове завдання* яке полягає в удосконаленні моделей та методів прогнозування довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів). Вирішенню цього завдання і присвячена дана дисертаційна робота.

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.; Програми економічних реформ з урахуванням основних напрямів розвитку, визначених у Транспортній стратегії України на період до 2020 р.,

затвердженій розпорядженням КМУ від 20.10.2010 р. № 2174-р. в інтересах науково-дослідної роботи «Розробка комплексного показника якості пасажирських круїзних суден змішаного плавання в системі безпересадкових круїзних перевезень між портами Дніпра, Чорного моря та Дунаю» (номер держреєстрації 0116U03946), яка виконувалася у Державному університеті інфраструктури та технологій, у якої автор приймала участь як виконавець. А також у відповідності до плану наукової роботи та науково-технічної діяльності Державного університету інфраструктури та технологій.

Мета і задачі дослідження.

Мета дослідження – підвищення ефективності управління технічною експлуатацією обладнання ЗРМТ через розробку та впровадження моделей і методів прогнозування показників довговічності відповідних зразків.

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

проаналізувати систему технічної експлуатації ЗРМТ в сучасних умовах, оцінити технічний стан комплексів обладнання та деградаційні процеси зміни технічного стану його зразків, дослідити існуючі науково-методичні підходи до прогнозування процесів зміни технічного стану;

провести вибір методу прогнозування, його розвиток з урахуванням умов завдання, що вирішується та розробити математичну модель процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ;

удосконалити метод прогнозування довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом, а саме удосконалити метод прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання з використанням результатів експлуатаційних спостережень; удосконалити методи оцінки показників довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом з метою вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів);

обґрунтувати рекомендації щодо використання моделей та методів прогнозування довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за

технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів).

Об'єкт дослідження – процес експлуатації обладнання ЗРМТ за технічним станом.

Предмет дослідження – довговічність обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом.

Методи досліджень. Для досягнення поставленої в роботі мети використані наступні методи дослідження:

математичної статистики та регресійного аналізу – при обробці вхідних статистичних даних результатів експлуатаційних спостережень та представлення інформації у вигляді динамічного ряду;

системного аналізу – при дослідженні процесу функціонування системи технічної експлуатації обладнання ЗРМТ в сучасних умовах;

прогнозування (індуктивного моделювання) – для здійснення прогнозування та встановлення закономірностей процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ з визначенням їх залишкового терміну служби (ресурсу);

порівняльного аналізу – для обґрунтування рекомендацій щодо продовження призначених термінів служби (ресурсів) обладнання ЗРМТ при ЕТС;

спостереження та порівняння, загальні положення теорії складних технічних систем, теорії ймовірності, теорії надійності – при постановці наукового завдання та виборі методу його вирішення та аналізі технічного стану обладнання ЗРМТ.

Використання перерахованих методів досліджень у ході рішення поставлених наукових задач дозволило одержати ряд нових обґрунтованих наукових результатів.

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

1. Удосконалено математичну модель процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ, в якій, на відміну від існуючої, передбачено врахування нерівноточних результатів оцінювання показника безвідмовності в якості вихідних даних для побудови моделей за результатами експлуатаційних спостережень.

2. Удосконалено метод прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ з використанням результатів експлуатаційних спостережень, в якій, на відміну від існуючої, передбачено врахування залежності похибки прогнозу від способу розподілу експлуатаційних спостережень на вибірки, а також, при порівняльному використанні алгоритмів методу групового урахування аргументів запропоновано використовувати лінійну множинну регресійну модель для отримання достовірних оцінок показника довговічності в умовах використання обмеженої кількості вихідних даних при вирішенні завдань середньострокового прогнозування.

3. Удосконалено метод оцінки показників довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів), в якій, на відміну від існуючої, передбачено врахування залежності ефективності комплексу обладнання ЗРМТ від зміни технічного стану його комплектуючих, для здійснення оцінки показників довговічності з урахуванням ієрархічно розгалуженої структурної схеми його побудови.

Практичне значення одержаних результатів.

Реалізація одержаних в роботі результатів доцільна в математичному та програмному забезпеченні, як складової технології автоматизації процесу прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ з використанням результатів експлуатаційних спостережень. Застосування запропонованих моделей і методів дозволяє підвищити достовірність прогнозу показників довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом в деяких випадках до 12 %.

Результати дисертаційних досліджень реалізовані у ДП «Укрводшлях» при підготуванні судноводіїв (акт від 05.10.2020 р.); а також в навчальному процесі Державного університету інфраструктури та технологій (акт від 01.10.2020 №14/а) підчас створення курсу лекцій з дисциплін «Експлуатація засобів водного транспорту», «Інфраструктура водного транспорту».

Наведені нові науково-обґрунтовані практичні рекомендації щодо визначення залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання судна 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] аналіз способів прогнозування відмов агрегатів суднових комплексів за даними експлуатаційних спостережень; у [2] аналіз шляхів розвитку автоматизованої системи управління суден; у [3] формалізація процесу технічної експлуатації елементів інтегрованої навігаційної системи; у [4] математична модель функціональних систем суднових комплексів; у [5] метод прогнозування довговічності обладнання засобів річкового та морського транспорту в умовах експлуатації за технічним станом; у [6] аналіз особливості багатокритеріальної оптимізації структури системи навігації та управління судном; у [7] дослідження процесу автоматизації контролю технічного стану засобів водного транспорту у різноманітних умовах експлуатації; у [8] аналіз критерію оптимальності системи технічного обслуговування суднових комплексів.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, які отримані у ході виконання дисертаційної роботи, доповідалися на міжнародної та всеукраїнської науково-технічних конференціях, а також на засіданнях кафедри судноводіння та керування судном ДУІТ: Міжнародна

науково-практична конференція «Водний транспорт: сучасний стан та перспективи розвитку», 16-17 травня 2019 року у ДУІТ, м. Київ; Всеукраїнська інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Технічні науки в Україні: сучасні тенденції розвитку», 20-21 листопада 2019 року, ДУІТ м. Київ; II Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Навчально-наукового інституту Морського флоту Одеського національного морського університету, 2020 рік, м. Одеса.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи відображені у 8 наукових працях, серед них: 5 статей, опублікованих у співавторстві у збірниках наукових праць, що входять до переліку видань, дозволених МОН України для публікацій результатів досліджень з технічних наук (у тому числі 1 у періодичному науковому виданні держави, яка входять до Європейського Союзу), 3 матеріалах науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація загальним обсягом 181 сторінки машинописного тексту складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел з 128 найменувань. Дисертація містить 28 рисунків. Ілюстрації, таблиці, перелік використаних джерел та додаток займають 44 сторінки тексту.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ ТА НАУКОВО-МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ЙОГО ДОЛГОВІЧНОСТІ

1.1. Аналіз деградаційних процесів зміни технічного стану річкового та морського транспорту

За даними публічного звіту В.о. Голови Морської адміністрації за 2019 рік [101]: «Протягом 2019 року на морському і річковому транспорті України, у тому числі з маломірними (малими) суднами сталося 30 аварійних подій, в яких 10 осіб загинуло, 10 осіб зникло безвісти та 16 осіб отримали травм. За аналогічний період 2018 року відбулося 13 аварійних подій, в яких 1 особа загинула, 1 особа зникла безвісти та 6 осіб отримали травм...Якщо порівняти кількість аварійних подій протягом декількох років (2014 – 2019), то можна зробити висновок, що не зважаючи на щорічні коливання аварійності у сторону значного росту або зниження, загальний стан аварійності на водному транспорті в Україні продовжує залишатися на високому рівні» (рис.1.1).

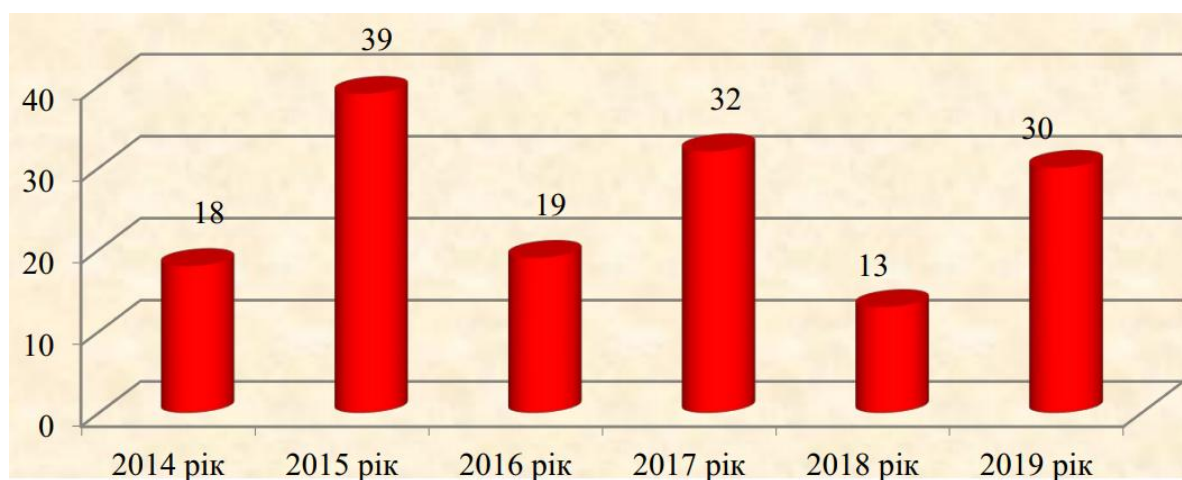


Рис.1.1. Порівняльний стан аварійності з 2014 по 2019 роки

В цьому звіті надана інформація стосовно визначення обставин, факторів та причин виникнення аварійних подій [101] рис.1.2:

1) навігаційні причини – 11 випадків (37%) (потрапляння на міліну, зіткнення маломірних суден, навал лоцбота на причал, порушення вимог відповідних Правил плавання у частині права пріоритету руху суден тощо);

2) організаційні причини – 10 випадків (33%) (неналежна організація бункерування судна, несення вахтової служби на ходовому містку для забезпечення безаварійного плавання судна, неврахування маневрених елементів судна під час плавання в обмежених річних умовах та на акваторії портів, порушення вимог відповідних Правил плавання);

3) технічні причини – 7 випадків (23%) (неналежна організація виконання правил технічного обслуговування і експлуатації головних та допоміжних двигунів, рульового пристрою судна, використання саморобного незареєстрованого плавзасобу (типу плоскодонка) з незареєстрованим двигуном без належного технічного огляду);

4) психофізіологічні – 2 випадка (7%) (порушення правил техніки безпеки (потрапляння за борт), охорони праці та СУБ при використанні трапу-сходні, управління човном у стані алкогольного сп'яніння).

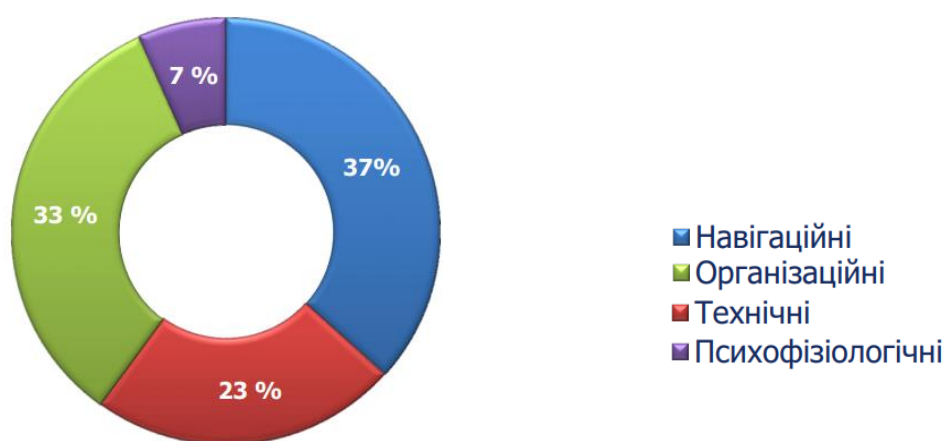


Рис. 1.2. Кількість випадків аварійних подій за причинами виникнення

Це підкреслює актуальність наукових досліджень в напрямку, яке обрано за темою дисертації.

Проведений аналіз технічного стану ЗРМТ свідчать, що зі складу 1978-1986 років випуску 50% засобів вичерпали призначений термін служби, потребують проведення капітального ремонту, укомплектованість ЗІП складає 40...60%, у ЗРМТ 1985 – 1991 року випуску 85% засобів вичерпали призначені терміни служби, потребують проведення середнього (капітального) ремонту, укомплектованість ЗІП складає 40...50%, 73% засобів 1986 – 1990 років випуску вичерпали призначений термін служби та потребують капітального ремонту, укомплектованість ЗІП складає 50...60% [99,102].

Результати аналізу свідчать, що ЗРМТ, які складають основу технічної оснащеності, перебувають в експлуатації більше 20 років у стані нештатної експлуатації через несвоєчасне проведення заводських ремонтів, незабезпеченістю комплектів ЗІП-1 та ЗІП-2 запасними частинами та матеріалами, на теперішній час вичерпали призначені ресурси (терміни) служби та за своїм технічним станом потребують капітального (середнього) ремонту. Тому з метою впровадження перспективних стратегій ТЕ був проведений аналіз ЗРМТ як об'єктів технічної експлуатації і ремонту та їх пристосованості до експлуатації за технічним станом, за результатами якого встановлено те, що данні засоби характеризуються високою та середньою ступеню пристосованості до експлуатації за технічним станом.

Далі надано аналіз деградаційних процесів зміни технічного стану ЗРМТ.

Відомо, що в процесі експлуатації обладнання поступово втрачає свої властивості в результаті фізичного (технічного) і морального старіння при накладенні економічних обмежень. Кожен з режимів експлуатації в тій або іншій мірі здійснює вплив на інтенсивність зміни властивостей обладнання (фізичне або технічне старіння), в той же час, в ході виробництва і експлуатації відбувається втрата властивостей практично незалежно від самих зразків (моральне старіння). Обидва процеси старіння з різною мірою узагальнення об'єднує один кінцевий результат – припинення або

недоцільність перебування обладнання в експлуатації, при цьому на зміну застарілому (зношеному повністю або частково, а інколи і відносно недавно виготовленому) приходять зразки досконалішої конструкції [6,33,34].

При цьому крім оновлення парку комплексів обладнання, як правило, має місце проведення доробок та модернізацій. Динаміка цього процесу показує [7-12], що хоча переважна більшість комплексів пройшли глибоку модернізацію не менше трьох – чотирьох разів, проте цей процес істотно стримується, перш за все, економічними можливостями держави та великою тривалістю періоду розробки і випробувань ЗРМТ. Таким чином, економічне обмеження, разом з фізичним і моральним старінням, є причиною припинення (а в окремих випадках – продовження) експлуатації комплексів обладнання.

Постійне вдосконалення конструкції у зв'язку із складністю покладених завдань, багатофункціональністю, застосуванням комплектуючих обладнання мікроелектронного виконання, які характеризуються високою безвідмовністю – все це веде до зростання значення проблеми надійності і необхідності її вирішення, оскільки саме надійність стає усе більш значимим чинником стійкого і тривалого функціонування як обладнання, так і ЗРМТ в цілому.

Проте, як показав досвід експлуатації обладнання ЗРМТ, забезпечення високої надійності окремих елементів і технічних пристроїв є необхідною, але не достатньою умовою успішного функціонування судна в цілому, пов'язаною з тим, що кожен ЗРМТ є складною технічною системою.

До складу комплексів обладнання входять засоби, які складаються з радіоелектронної апаратури, механічних, електромеханічних, гідравлічних пристроїв, засобів автономного (зовнішнього) електроживлення, що характеризуються різними значеннями показників безвідмовності, довговічності, призначених термінів служби (ресурсів) тощо [17, 20].

Провівши за конструкторсько-компоновочною ознакою декомпозицію комплексів обладнання ЗРМТ, визначимо (від нижчого до вищого) наступні

рівні ієрархії:

електро-радіо елементи, деталі, чарунки, ТЕЗ (ознака цього рівня: електро-радіо елементи, деталі, чарунки, ТЕЗ є не відновлювальними виробами);

субблоки, блоки, шафи і системи частин технічних засобів (приклади: система енергоживлення);

частини засобів;

комплекс обладнання в цілому;

обладнання у складі системи.

Вочевидь, що з переходом від нижчого рівня ієрархії до наступного з'являються нові властивості і можливості, у тому числі - інший рівень надійності, визначення якого на кожному рівні є самостійним специфічним завданням.

Відмітимо, що системою виробництва, експлуатації і ремонту передбачається кожному рівню ієрархії адекватна форма підтримки і відновлення рівня надійності і ефективності функціонування обладнання ЗРМТ:

заміна електро-радіо елементів, деталей, чарунок та ін. при поточному ремонті (ПР) або технічному обслуговуванні (ТО);

заміна блоків і деталей при ПР, планових видах ТО і середньому ремонті (СР);

відновлення ресурсу і працездатності при капітальному ремонті (КР), а за передбаченими експлуатаційною документацією (ЕД) складовим частинам комплексу обладнання при СР;

повна модернізація комплексів (систем) обладнання або заміна на новий зразок.

Стосовно конкретного засобу комплексу початковий рівень довговічності може розглядатися як максимально можливий, оскільки практично негайно після його досягнення (виготовлення зразків і завершення

приймально-здавальних випробувань) починається процес витрачання запасу надійності (довговічності).

Тому, з метою дослідження шляхів продовження терміну експлуатації доцільно основні зусилля зосередити на дослідженні питань підтримання нормативного рівня безпеки судноводіння та надійності в процесі переведення комплексів обладнання на експлуатацію за технічним станом (ЕТС), враховуючи наявність закладаємих в зразки обладнання ЗРМТ значних запасів надійності, що витрачаються під час експлуатації, та можливість їх вимірювання.

Розглянемо показники терміну служби комплексів обладнання як функцію фізичних характеристик і параметрів елементів, а також швидкості їх зміни залежно від різних факторів.

Запаси надійності комплексів обладнання ЗРМТ, що вимірюються, в загальному випадку характеризуються резервуванням та параметричною надмірністю даних зразків [56,57]. При цьому, витрата запасів надійності зводиться до процесу витрати резерву, що пов'язаний зі зниженням рівня резервування, та до процесу витрати параметричної надмірності, що пов'язаний з виходом параметрів, що визначають працездатність, від номінальних до гранично допустимих значень.

Фізична сутність механізму внутрішніх процесів, що обумовлюють зниження рівня надійності, може бути детально проаналізована у кожному конкретному випадку для певного зразка обладнання ЗРМТ, заданих умов експлуатації і режимів роботи. Проте конкретні механізми порушень визначаються загальними фізико-хімічними процесами змін структури, властивостей і параметрів елементів. Причому, закономірності, що характеризують ці процеси, можуть бути основою для побудови загальних моделей, що описують процес зміни технічного стану, тобто процес зміни рівня надійності (в першу чергу – безвідмовності).

Процеси зміни рівня надійності протікають під дією сукупності факторів, які можна розділити на деградаційні фактори і фактори

відновлення запасу надійності. Деградаційні процеси, що приводять до відмов, класифікуються за швидкістю їх протікання і в зв'язку з цим дані процеси розподілені на три групи [38,57].

Процеси, що протікають *швидко*. До них відносяться вібрації виробу, зміни сил тертя в рухомих з'єднаннях, коливання робочих навантажень і інші процеси, що впливають на обладнання ЗРМТ в кожен момент часу і спотворюють цикл його роботи.

Процеси, що протікають з *середньою швидкістю*. Процеси середньої швидкості протікають за час безперервної роботи виробу. Вони приводять до монотонної зміни початкових параметрів обладнання. До цієї категорії відносяться як оборотні процеси (зміни температури самого виробу і навколишнього середовища, зміни вологості середовища), так і необоротні (наприклад, знос).

Процеси, що протікають *повільно*. Повільні процеси протікають протягом всього періоду експлуатації. До таких процесів відносяться знос основних механізмів зразка обладнання ЗРМТ, в тому, перерозподіл внутрішньої напруги в деталях і елементах, повзучість металів, забруднення поверхонь, корозія, сезонні зміни температури. Аналізуючи процес втрати зразком обладнання ЗРМТ працездатності, з урахуванням [1,75,76] визначимо, що особливу складність представляє оцінка інтенсивності процесів, що протікають *повільно*.

В якості найбільш загальних фізико-хімічних процесів, що протікають у матеріалах виробів, прийнято указувати наступні:

дифузійні процеси в об'ємі і на поверхні твердих тіл; переміщення і скупчення точкових дефектів і дислокацій в кристалічних і твердих тілах; флуктуаційний розрив міжатомних зв'язків в металах і сплавах; розрив хімічних зв'язків ланцюгів макромолекул полімерних матеріалів; електролітичні процеси; дія поверхнево-активних речовин; структурні перетворення в сплавах металів і ін. [69, 78-90].

Характерним для перерахованих процесів є те, що їх дія може проходити як одночасно, так і послідовно, унаслідок чого виділити домінуючі достатньо важко. Залежно від умов експлуатації протікання процесів може бути різним із-за впливу дестабілізуючих факторів: вібрації, ударів, температури, вологості, тиску, сонячної радіації, піску, пилу, соляного туману, агресивних рідин або газів і ін.

На прикладі однієї з комплексних властивостей технічного стану обладнання ЗРМТ – надійності, розглянемо загальноприйнятий показник, який може бути представлений у вигляді функції фізичних характеристик і параметрів елементів, швидкості їх зміни залежно від різних чинників. Так, ймовірність виникнення відмов можна визначити [24,97]

$$q = \int_0^t \frac{\partial q}{\partial t} dt = \int_0^t \frac{\partial q}{\partial(\Delta x)} \frac{\partial(\Delta x)}{\partial t} dt, \quad (1.1)$$

де $\frac{\partial(\Delta x)}{\partial t}$ – швидкість зміни запасу міцності унаслідок фізико-хімічних процесів, що протікають;

$\frac{\partial q}{\partial(\Delta x)}$ – ймовірнісні характеристики міцності матеріалів;

Δx – запас міцності (механічний Δx_M , електричний Δx_E або тепловий Δx_T) з урахуванням дії різних факторів.

$$\Delta x = \sum_{i=1}^k \Delta x_i, \quad (1.2)$$

$$q = \int_0^t \frac{\partial q}{\partial(x_M)} \left[\sum_1^{K_M} \frac{\partial(\Delta x_{MI})}{\partial t} \right] dt + \int_0^t \frac{\partial q}{\partial(\Delta x_E)} \left[\sum_1^{K_E} \frac{\partial(\Delta x_{EI})}{\partial t} \right] dt + \int_0^t \frac{\partial q}{\partial(\Delta x_\theta)} \left[\sum_1^{K_\theta} \frac{\partial(\Delta x_{\theta I})}{\partial t} \right] dt \quad (1.3)$$

Оперування цим співвідношенням можливо, якщо відомі необхідні фізичні характеристики матеріалів і вплив різних фізико-хімічних процесів на швидкість зміни запасу міцності.

Більш узагальнене уявлення про суть досліджуваних процесів наведене у [121] при викладі фізичного принципу в теорії надійності, зміст якого ґрунтується на тому, що кожен зразок обладнання ЗРМТ володіє запасом надійності, величина якого (r) з часом (t) витрачається. При цьому функція $r(t)$ є статистичною характеристикою рівня надійності обладнання, яка може бути виражена через ймовірність безвідмовної роботи наступним співвідношенням $r(t) = -\ln P(t)$. Залежно від факторів, що впливають, має місце відповідна швидкість витрати запасу надійності, пропорційна зміні інтенсивності відмов $\frac{dr}{dt} \approx \lambda(t)$, де λ – інтенсивність відмов.

З урахуванням названого фізичного принципу в [26] пропонується вважати, що зміна λ залежить не тільки від часу, але і від дії факторів і режимів роботи, що описуються функцією $\varepsilon : \frac{dr}{dt} \cong \lambda(t, \varepsilon)$. Зрозуміло, що якщо $r(t) \rightarrow \min$, то $t \rightarrow T_{mc}$, де T_{mc} – термін служби (експлуатації) зразка обладнання ЗРМТ до набуття граничного стану.

Швидкість зміни запасу надійності є функцією певного числа факторів:

$$\frac{dr}{dt} = \lambda(t, \varepsilon(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)), \quad (1.4)$$

де $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ – символи, що представляють фактори, кількість яких n .

Запропонована незалежність даних впливів, процес накопичення порушень працездатності також можна вважати незалежним. Вплив сукупності факторів і робочого навантаження в найбільш загальному лінійному вигляді можна вирахувати за допомогою виразу

$$\varepsilon = \Theta_0 + \Theta_1\varphi_1 + \Theta_2\varphi_2 + \dots + \Theta_n\varphi_n, \quad (1.5)$$

де $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n$ – параметри, що характеризують взаємозв'язок факторів з функцією ε .

Вплив комплексу факторів і робочого навантаження обумовлює приведення в дію механізму фізико-хімічних процесів, в результаті запас надійності зразків обладнання ЗРМТ з часом неухильно скорочується, не дивлячись на проведення заходів з ТО і Р.

Вираз (1.5) представляє в загальному вигляді функцію, що відповідає змісту процесу, що досліджується. Вибір математичного апарату, який може бути використаний для цієї цілі, може бути здійснений прямим врахуванням впливу факторів за допомогою процедур регресійного аналізу.

Таким чином, розглянуті процеси старіння і зносу впливають на процес необоротної зміни технічних показників комплексів обладнання ЗРМТ від деяких номінальних значень до допустимих значень, які відповідають граничному стану відповідних комплексів.

Граничний стан [78-90, 92-96] настає у разі, коли “подальша експлуатація об'єкта неприпустима чи недоцільна, або відновлення його працездатного стану неможливе або недоцільно”. При цьому, наприклад, граничний стан настає як у наслідок неможливості відновлення працездатного стану об'єкту внаслідок несправності, так й в набуття показником безвідмовності (середній наробіток на відмову) граничнодопустимих значень, обумовлених вимогами нормативно-технічної документації.

Викладене дозволяє укласти, що перехід об'єкту в граничний стан з урахуванням впливу сукупності факторів, наведених на рис.1.3, відбувається внаслідок протікання процесів технічного (фізичного) або морального старіння ЗРМТ, а також непомірно високого зростання витрат на експлуатацію. В окремих випадках перехід комплексу обладнання в граничний стан може бути обумовлений виникненням неусувних порушень

правил техніки безпеки, що, як правило, пов'язано з технічною деградацією відповідного зразка обладнання.

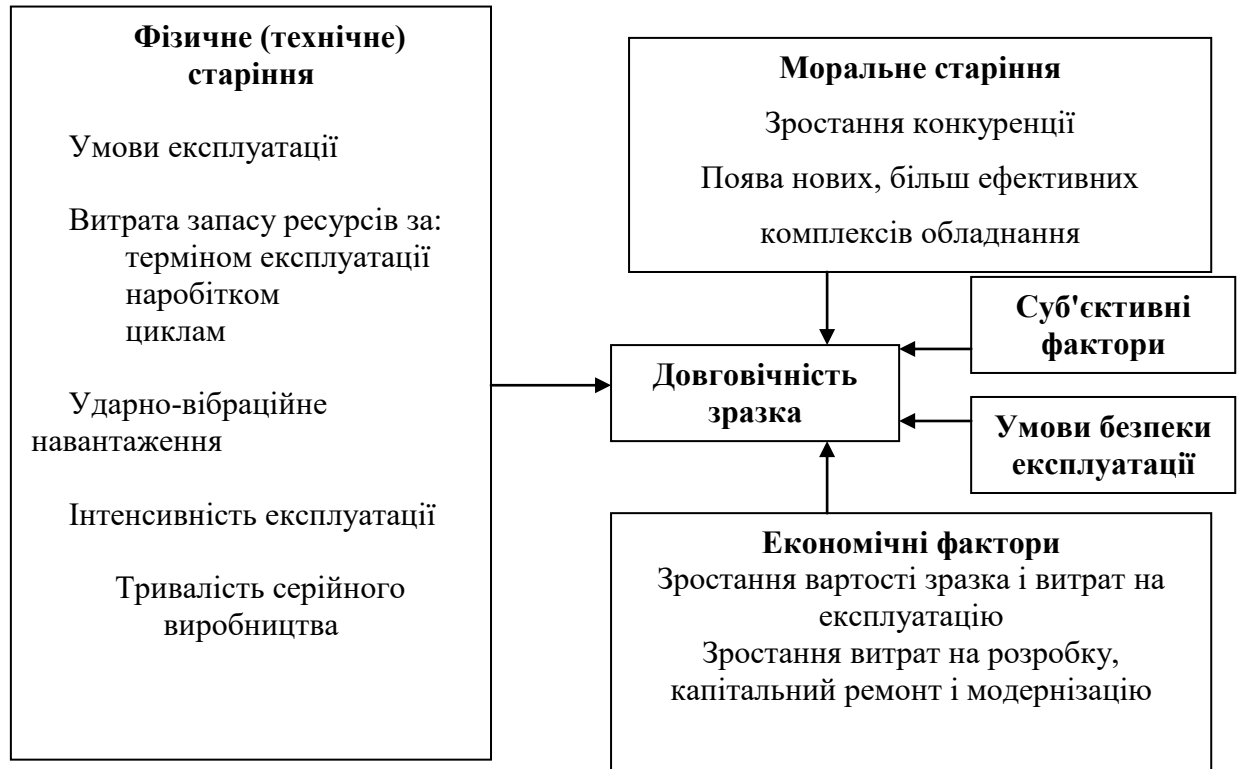


Рис.1.3. Фактори, що впливають на зміну технічного стану комплексів обладнання ЗРМТ

Тому, з метою дослідження шляхів продовження призначених термінів служби доцільно основні зусилля зосередити на дослідженні питань підтримання нормативного рівня безаварійності та довговічності за рахунок переведення комплексів обладнання на ЕТС, тобто здійснювати вплив на експлуатаційні та організаційно-технічні умови технічної експлуатації з урахуванням практичної відсутності можливостей впливу на фізико-географічні умови та конструкційну побудову.

Таким чином, переведення комплексів обладнання на ЕТС як одна із найбільш впливових організаційно-технічних умов, дозволяє за рахунок завчасного прогнозування досягнення комплексу обладнання граничного стану визначити терміни проведення заходів ТО і заміни окремих пристроїв

зі складу складових частин комплексів, нейтралізувати негативний вплив експлуатаційних умов.

На основі проведеного аналізу існуючого складу обладнання ЗРМТ та деградаційних процесів зміни його технічного стану можна зробити висновок, що основним джерелом підтримання обладнання в належному стані на даному етапі експлуатації стає поетапне індивідуальне продовження призначеного терміну служби (ресурсу) комплексу обладнання, яке здійснюється за рахунок впровадження експлуатації комплексів за технічним станом. Але, у складі конструкції засобів комплексів є велика частка обладнання, яке не передбачає застосування відповідних засобів контролю та діагностики в умовах військової частини, та має індивідуальні терміни переходу у граничний стан. При цьому, термін переходу у граничний стан є випадковою величиною, характеристики якої неможливо визначити дослідним шляхом у сучасних умовах експлуатації.

Тому своєчасне виявлення моментів виникнення деградаційних процесів, які визначають терміни переходу у граничний стан та є індивідуальними для кожного типу обладнання, стає головною метою прогнозування рівня надійності ЗРМТ на даному етапі його експлуатації.

1.2. Аналіз системи технічної експлуатації та її вплив на ефективність річкового та морського транспорту

Світовий досвід експлуатації ЗРМТ протягом останніх десятиріч свідчить про те, що одним з напрямками підвищення ефективності його застосування (в межах дисертаційного дослідження) є скорочення часових показників, сил та засобів на виконання всіх видів робіт ТО.

Відомо, що технічний стан обладнання у процесі його експлуатації залежить від якості технічного забезпечення, яке охоплює достатньо складний комплекс заходів, в якому значну частину займає організація та здійснення експлуатації комплексів обладнання [96].

Організаційно-технічною основою процесу експлуатації обладнання ЗРМТ є система технічної експлуатації, яка має певну структуру [26, 37, 115, 123]. Система технічної експлуатації і ремонту була сформована ще в 60–70 роках ХХ століття та була орієнтована на проведення високовитратних регламентованих технічних обслуговувань і капітальних ремонтів.

Важливою складовою системи ТЕ є система технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р), яка являє собою сукупність взаємопов'язаних засобів, документації ТО і Р та виконавців (інженерно-технічного складу), необхідних для підтримання та відновлення якості виробів, що входять до складу даної системи. Метою функціонування системи ТО і Р відповідно є управління технічним станом виробів на протязі їх терміну служби або ресурсу до списання, яке дозволяє забезпечити:

заданий рівень готовності комплексів обладнання до використання за призначенням і безвідмовності при застосуванні;

підтримання працездатності і запасу технічного ресурсу в процесі експлуатації; мінімальні витрати часу, праці і засобів на виконання ТО і Р комплексів обладнання.

Прийнята для того чи іншого об'єкта експлуатації стратегія ТО і Р відображається в програмі ТО і Р. Загальноприйнятими є наступні стратегії ТО і Р: за наробітком і за календарною тривалістю експлуатації; за станом з контролем параметрів; за станом з контролем рівня надійності.

При цьому до станів експлуатації комплексу обладнання можна віднести: використання за призначенням; різні види ТО, поточного ремонту, транспортування, зберігання, очікування переходу в певний експлуатаційний стан тощо [77].

Під надійністю розглядаємо властивість об'єкта зберігати у часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування [78-90,47].

Згідно правилам, які визначають граничний стан (ГС) (і його вид) і

встановлюють межі використання зразка за призначенням виділені наступні методи ТЕ:

до вироблення призначеного ресурсу (або закінчення призначеного терміну служби) (ТЕР);

до передвідмовного стану (ТЕП);

до відмови (ТЕВ).

Методи ТЕП і ТЕВ визначаються як методи ТЕС [36, 50-25, 63, 64]. При цьому під методом ТЕП розуміється метод ТЕ, при якому застосування обладнання за призначенням здійснюється до досягнення ним передвідмовного стану, після чого проводиться відновлення виробу або його заміна. Метод ТЕВ визначений як метод ТЕ обладнання, при якому його експлуатація здійснюється до безпечної відмови, а відновлення (заміна, списання) виробу здійснюється на основі аналізу його технічного стану і рівня надійності.

Ефективність регламентованої стратегії ТО і Р (за наробітком або за календарною тривалістю), яка передбачає виконання профілактичних робіт певних обсягів через раніше заплановані інтервали часу або наробітку на всьому однотипному парку комплексів обладнання незалежно від стану їх систем і виробів, залежить від того, в якій ступені вона враховує рівень надійності, закладений в ЗРМТ під час їх виробництва, фізико-географічні умови та інтенсивність їх експлуатації.

Основними перевагами регламентованої системи ТО і Р є: нескладний механізм планування і організації процесу відведення комплексів (зразків) в ремонт; однакова технологічна схема ремонту зразків; незмінна повнота технологічного контролю якості ремонту на ремонтних підприємствах і контролю якості відремонтованих комплексів (зразків) за умови їх своєчасного відведення в ремонт і дотриманні технології ремонту.

До недоліків регламентованої системи ТО і Р відносяться: великі фінансові витрати на проведення планових ремонтів; значні величини невикористаних ресурсів складових частин комплексів обладнання;

нераціональне використання засобів на високовитратні регламентовані капітальні ремонти (КР).

Під час розробки відповідні значення призначених доремонтних і міжремонтних термінів служби (ресурсів) встановлювалися за результатами розрахунків показників довговічності комплексів обладнання, що експлуатуються при регламентованій стратегії ТО і Р і встановлювалися однаковими для обладнання всього парку. Але, не дивлячись на істотну відмінність обладнання в елементній базі були прийняті однакові початкові призначені терміни служби електрообладнання – 10 років і призначені ресурси – 10000 год. Після вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів) розробник за узгодженням із замовником встановив однакові призначені терміни служби до першого КР – 15 років, при цьому початкові призначені терміни служби виявилися заниженими в 1,5 рази. При цьому призначені терміни служби (ресурси) проектного обладнання встановлювалися, як правило, за найближчими виробами-аналогами в припущенні, що надалі проводитимуться роботи по продовженню призначених термінів служби (ресурсів), а завдання продовження призначених термінів служби (ресурсів) вирішувалося стосовно регламентованої системи ТО і Р.

Заводський ремонт всіх комплексів обладнання проводився по закінченню призначених термінів служби (ресурсів) незалежно від фактичного технічного стану конкретного обладнання і рівня його надійності, що приводило до невикористання ресурсів елементів, пристроїв, підсистем і складових частин і нераціональному використанню засобів на їх ремонті.

Проте, в результаті проведення досліджень системи ТО і Р встановлено, що періодичність та обсяги ТО, які визначені для сукупності зразків обладнання на підставі статистичних даних, не враховують реальний стан окремо взятого зразку.

В результаті огляду світових тенденцій розвитку стратегій ТО і Р

встановлено, що більш тісний зв'язок між станом об'єкта та станом процесу його експлуатації забезпечує стратегія ТО і Р за станом. Головною особливістю цієї стратегії є те, що потрібні стани процесу експлуатації виробів і обсяги робіт з обслуговування та ремонту призначаються не відповідно до наробітку виробів, а відповідно до виникаючих у них технічних станів.

Вибір стратегії ТО визначається експлуатаційно-технічними характеристиками зразка обладнання, впливом його відмов на безпеку експлуатації та економічну ефективність, можливістю використання під час експлуатації засобів контролю.

Впровадження стратегії ТО і Р за технічним станом на парку комплексів обладнання передбачає проведення контролів граничного стану, за результатами якого визначаються групи комплексів обладнання на ЕТС (через ТО великої періодичності та поточний ремонт, через контрольно-відновлювальні роботи, через заводський ремонт) [92-96]. Планування подальшої експлуатації та ремонту комплексів обладнання здійснюється у відповідності до розподілу парку за цими групами. Дана стратегія ТО і Р є економічно більш вигідною, у порівнянні з регламентованою стратегією при штатній експлуатації ЗРМТ (своєчасне проведення всіх видів ТО та КР згідно нормативних документів). Крім того, переведення комплексів обладнання на ЕТС забезпечується відповідністю дійсних значень показників їх функціонального призначення, надійності, експлуатаційної технологічності, значенням встановленим нормативною документацією.

Таким чином, в основу стратегії ТО при ЕТС покладені такі вимоги: забезпечення технічної готовності комплексів обладнання до використання за призначенням і безвідмовності при застосуванні; підтримання працездатності і запасу технічного ресурсу в процесі експлуатації; мінімальні витрати часу, сил і засобів на виконання ТО і Р.

Розглянемо можливості використання існуючих науково-методичних підходів до прогнозування технічного стану обладнання ЗРМТ в умовах

застосування стратегій технічної експлуатації за станом.

1.3. Дослідження існуючих науково-методичних підходів до прогнозування технічного стану обладнання

Характерною особливістю стратегії ТО і Р за станом є те, що в процесі експлуатації здійснюється контроль технічного стану конкретного об'єкту з метою своєчасного ухвалення рішень про необхідність проведення відновлювальних робіт та їх об'єму. При цьому здійснюється контроль і оцінка показників надійності обладнання, зниження величини яких за межі встановлених норм є однією з ознак переходу цих об'єктів в граничний стан.

Показники надійності, що використовуються для оцінки технічного стану комплексів обладнання ЗРМТ, та вирази для їх розрахунку докладно наведені в літературі [1,3,4,9,14 та ін.]. Вимоги з надійності дозволяють підійти до проблеми оцінки довговічності комплексів обладнання при переведенні на ЕТС. Тому, з метою прогнозування довговічності обладнання ЗРМТ при ЕТС доцільно основні зусилля зосередити на дослідженні питань зміни технічного стану (рівня надійності) його засобів в процесі експлуатації [32,78-90].

Проведемо аналіз відомих науково-методичних підходів до прогнозування технічного стану (показників довговічності та безвідмовності) технічних систем для оцінки можливості їх використання в умовах застосування стратегій технічної експлуатації за станом.

Відомі в науково-технічній літературі методи оцінки показників довговічності і, зокрема, показників залишкового ресурсу (терміну служби), можуть бути розділені на параметричних і непараметричних. Параметричні методи [1,2,6,13,14,75] 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. Непараметричні методи застосовують 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 прогнозування технічного стану об'єктів, що досліджуються.

До існуючих методів дослідження процесів зміни технічного стану обладнання ЗРМТ, які в якості об'єкту дослідження розглядають складні технічні системи, можуть бути віднесені: експериментально-статистичні, прискорених випробувань, прогнозування, статистичних випробувань і ін.

До методів прискорених випробувань, призначених для оцінки збережувості і довговічності, належать однофакторні і багатфакторні випробування, які можуть проводитися у форсованому або нормальному режимах [31,14]. Випробування дають значний вигаиш в часі. Проте зіставлення отриманих результатів з результатами, досягнутими в реальних умовах, викликає серйозне ускладнення при встановлені залежностей перерахунку. Крім того, застосування методів прискорених випробувань складних технічних систем вимагає значних економічних витрат і у ряді випадків практично нездійсненно. Тому ці методи знаходять найбільше розповсюдження для оцінки збережуваності і довговічності комплектуючих елементів, деталей, окремих блоків і складових одиниць [66-73].

У основі методу статистичних випробувань [61,62] лежить математичне моделювання фізичних процесів, можливих при експлуатації і багатократна реалізація їх за допомогою обчислювальних засобів з подальшою статистичною обробкою отриманих результатів (реалізацій). Метод не накладає обмежень на кількість факторів, що враховуються; прийнятний як для елементів, так і для складних технічних систем; дозволяє в короткі терміни виконати масові і трудомісткі розрахунки. Основними недоліками є складність і сумнівність оцінки адекватності математичної

моделі реальному процесу, оскільки для процедури оцінки використовується той же статистичний матеріал, який використовується для вибору моделі.

Експериментально-статистичні методи є найбільш поширеними і в порівнянні з іншими більшою мірою ґрунтуються на процесах, що реально відбуваються [6, 9, 40, 41, 108]. Початковою інформацією для застосування цих методів служать результати експлуатації і випробувань зразків обладнання ЗРМТ.

За досвідом експлуатації встановлені міжремонтні ресурси обладнання ЗРМТ. Суть використаного при цьому методу, в спрощеному вигляді, зводиться до оцінки наробітку на відмову (T_0) виробу в i -му і в $(i-1)$ -му роках експлуатації

$$T_{0i} = \frac{T_{0(i-1)}}{\alpha}, \alpha > 1, i = 1, 2, \dots, n, \quad (1.6)$$

де α – коефіцієнт, що характеризує зменшення середнього наробітку на відмову за інтервал експлуатації. Зниження T_{0i} може відбуватися до мінімально допустимого значення

$$T_{0i}^{доп} = \frac{T_{0i}}{\gamma}, \gamma > 1, \quad (1.7)$$

де γ – коефіцієнт, що характеризує допустиму величину зниження наробітку на відмову.

Перевагою методу є простота і зручність в застосуванні; основним недоліком – по-перше, ігнорування того, що середній наробіток на відмову є випадковою величиною; по-друге, в (1.6) не враховується вплив на коефіцієнт α різних факторів і витрата запасів ресурсів. В результаті, галузь застосування методу обмежена, а достовірність отримуваних результатів невисока.

Істотним недоліком експериментально-статистичних методів є необхідність проведення випробувань протягом тривалого проміжку часу із залучанням для випробувань великої кількості зразків.

Набагато проблематичне застосування експериментально-статистичних методів до оцінки довговічності недавно нового обладнання або що знаходяться на етапі продовження експлуатації після проведення відновлювальних робіт. Об'єм статистичної інформації, що враховується в цьому випадку, не є достатнім для застосування експериментально-статистичних методів, тому неминуче звернення до методів прогнозування.

Інший варіант рішення задачі оцінки довговічності (уточнення призначених термінів служби (ресурсів)) комплексів обладнання ЗРМТ запропонований в методиці [57]. Суть його полягає в тому, що першим кроком для вибірки комплексів, що досягли граничного стану, формується впорядкований варіаційний ряд: $T_1 < T_2 < T_i < \dots < T_{N_{виб}}$, де T_i – ресурс i -го обладнання, $N_{виб}$ – об'єм вибіркової сукупності та формується гістограма розподілу наробітку зразків до ресурсних відмов і визначається їх емпірична функція розподілу $F_e(t)$ та залежність $P_e(t)$ “ймовірність збереження неграничного стану зразка обладнання ЗРМТ” протягом часу t його експлуатації $P_e(t) = 1 - F_e(t)$;

другим кроком по знайденій емпіричній функції розподілу наробітку обладнання ЗРМТ до ресурсної відмови $F_e(t)$ знаходиться γ -відсотковий термін за співвідношенням $T_\gamma = \max\{t \mid P_e(t) \geq \gamma\}$;

третім кроком визначається односторонній довірчий інтервал „ймовірності збереження неграничного стану зразка обладнання ЗРМТ” шляхом вирішення рівняння Клоппера – Пірсону

$$1 - \alpha = \sum_{K=0}^{\eta(t)} C_{N_{виб}}^K \times (P_n(\alpha, t))^{N_{виб}-K} \times (1 - P_n(\alpha, t))^K, \text{ де } \eta(t) = F_e(t) \cdot N_{виб}, \alpha - \text{величина}$$

довірчої ймовірності для призначеного терміну експлуатації t ;

четвертим кроком обчислюється уточнений призначений термін

служби $T_{сл.приз}$ досліджуваного комплексу обладнання ЗРМТ за співвідношенням

$$T_{сл.приз} = \max\{t \mid P_n(\alpha, t) \geq \gamma\} \text{ при } T_{сл.приз} - \tau \geq T_\partial \quad (1.8)$$

де τ – початковий призначений термін служби комплексу обладнання; T_∂ – мінімальна величина продовження призначеного терміну служби, яка має практичне значення.

При невиконанні умови (1.8) збільшення призначеного терміну служби комплексу обладнання ЗРМТ неможливе.

До недоліків цієї методики відносяться: по-перше, невизначеність механізму контролю технічних станів обладнання і необхідна точність прогнозування їх граничних станів; по-друге, для оцінки показників залишкового терміну служби (ресурсу) зразків потрібна тривала експлуатація великої сукупності комплексів обладнання ЗРМТ (об'ємом вибірки не менше 40); по-третє, побудована емпірична функція розподілу наробітку комплексів обладнання ЗРМТ до ресурсних відмов є усередненою за великою вибіркою комплексів і тому оцінки показників залишкового терміну служби (ресурсу) з використанням цієї функції розподілу є усередненими, а не індивідуальними, як це потрібно для вирішення завдань продовження призначеного терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ.

На практиці, стосовно обладнання ЗРМТ та їх складових частин, що перебувають в експлуатації, застосування параметричних методів ускладнене, 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 виробів і не може бути ефективно використана при індивідуальному вирішенні завдань визначення

залишкового ресурсу (терміну служби).

При виборі апарату оцінки зміни технічного стану можливе використання ряду методів прогнозування, які далеко не рівноцінні за своїм значенням. На даний час налічується понад 150 методів прогнозування [1,45,48,49 та ін.].

За ступенем формалізації всі методи діляться на інтуїтивні (експертні) і формалізовані. З класу формалізованих застосування для вирішення поставленого завдання можуть знайти методи прогновної екстраполяції. До них відносяться: метод найменших квадратів, експоненціального згладжування, ймовірнісного моделювання, адаптивного згладжування і метод групового урахування аргументів (МГУА).

Метод найменших квадратів [45] є основою створення моделей множинної регресії. Його суть полягає у відшукуванні параметрів моделі тренда, що мінімізують її відхилення від точок початкового часового ряду. Відмітимо, що ідея методу з'явилася дуже корисною при розробці інших прогнозних методик. Недоліки методу полягають в тому, що модель тренда жорстко фіксується, а початкова інформація не диференціюється за важливістю. Крім того, особливу складність при застосуванні методу представляє правильний вибір виду моделі.

Вирішення завдання оцінки і індивідуального прогнозування технічного стану рідко контрольованих технічних виробів з урахуванням режимів і умов їх експлуатації розглядається в [66-73], при цьому використовується велика вибірка рідко контрольованих виробів та враховується неможливість локалізації моментів виникнення відмов. Для її вирішення розроблена модель надійності рідко контрольованих технічних виробів у вигляді множинної регресійної залежності [65,74]

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

де $\lambda(\varepsilon, t)$ – інтенсивність відмов; t – тривалість експлуатації або “вік” виробу; d – ступінь апроксимуючого полінома; $b_i(\varepsilon)$ – багатofакторний

регресійний поліном, який має вигляд

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

де $(f_1, f_2, \dots, f_n)$ – набір чисельних значень факторів, які визначають режим експлуатації ε ; $b_{i_1, i_2, \dots, i_d}$ – коефіцієнт, що характеризує ступінь впливу на інтенсивність відмов взаємодії факторів $f_{i_1}, f_{i_2}, \dots, f_{i_d}$.

В якості факторів для деякого обладнання ЗРМТ в наведеній регресійній моделі використовуються: середнє число вимкнень - увімкнень за визначений період експлуатації; середній наробіток під струмом протягом даного періоду експлуатації; середній час знаходження в різних режимах зберігання та ін.

Для оцінки параметрів моделі в [53,75] запропонована сумісна обробка даних результатів контролів технічних станів всіх технічних виробів, а не окремих груп однорідних вибірок виробів з урахуванням їх режимів і умов експлуатації. Далі, для індивідуальних режимів експлуатації конкретних виробів і у виразі, що описує наведену модель, вирішується завдання індивідуального прогнозування технічних станів конкретних виробів.

Крім того, в [78] започатковані підходи до вирішення завдання оцінки і прогнозування технічного стану обладнання, розподіленого на групи, або його окремих складових частин, при цьому використовується велика вибірка узагальнених статистичних даних виробів та враховується неможливість локалізації моментів виникнення відмов. Для її вирішення були розроблені моделі зміни технічного стану відповідних груп зразків у вигляді множинної регресійної залежності [59,60], при цьому завдання прогнозування довговічності складної технічної системи з ієрархічно розгалуженою структурою не вирішувалось в загалі, розрахунки проводились під час полігонних випробувань лише для уточнення відповідності призначених

термінів проведення капітальних ремонтів в умовах існуючої регламентованої стратегії ТО і Р для всього парку однотипних виробів.

Такий підхід недоцільно застосовувати для вирішення завдання уточнення показників довговічності та корегування призначених термінів служби (ресурсів) комплексів обладнання ЗРМТ, тому що для побудови багатofакторної регресійної моделі безвідмовності потрібні вибірки великого об'єму, а парк ЗРМТ відповідного типу налічує порядком до 20 – 30 засобів; наведені моделі будуються для інтенсивності відмов (параметру потоку відмов), тобто для невідновного виробу, а досліджуваний об'єкт в цілому – відновлюваний; наведені моделі будуються або для рідко контрольованих виробів, наприклад, Р, або для окремих складових частин зразка обладнання ЗРМТ, а комплекс досить часто контролюється (в порівнянні з швидкістю зміни його показників безвідмовності), тобто за наслідками контролів параметрів технічного стану комплексу є можливість побудови моделей зміни технічних параметрів в області їх допуску за наслідками їх контролю при періодичних ТО.

Прогнозування з використанням ймовірнісних моделей і моделей адаптивного згладжування базується на методі експоненціального згладжування, який дозволяє врахувати ваги S початкової інформації (пізніше отриманим спостереженням додаються великі ваги в порівнянні з раніше отриманими спостереженнями, причому ваги спостережень убують за експонентною залежністю) і виявити не середній рівень процесу, а тенденцію, що склалася до моменту останнього спостереження. У розрахунках для визначення експоненціальною середньою k -го порядку ($S[k]$) для ряду y_t користуються формулою [44]

$$S_t^{[k]}(Y) = \alpha S_{t-1}^{[k-1]}(Y) + (1 - \alpha) S_{t-1}^{[k]}(Y), \quad (1.9)$$

де y – залежна змінна досліджуваного процесу;

α – параметр згладжування, який визначається, наприклад, із

співвідношення $\alpha = \frac{2}{N+1}$, де N – число точок ряду.

Оцінки коефіцієнтів прогнозуючого полінома визначаються вирішенням системи рівнянь, що зв'язує параметри прогнозуючого полінома з початковою інформацією. Так, для лінійної моделі отримаємо $a_0 = 2S_t^{[1]} - S_t^{[2]}$, $a_1 = \frac{\alpha}{\beta}(S_t^{[1]} - S_t^{[2]})$, де $\beta = 1 - \alpha$, і прогноз на період τ здійснюється відповідно моделі $Y_{t+\tau} = a_0 + a_1\tau$.

Недоліками методу є неоднозначність в наборі параметра згладжування і порядку полінома, що прогнозує його, що негативно впливає на якість прогнозу. Особливістю ймовірнісних моделей є те, що на відміну від екстраполяційних моделей часових рядів за наслідками спостережень оцінці підлягають не коефіцієнти моделі, а ймовірність подій.

Таким чином, відомі методи оцінки та прогнозування процесу зміни технічного стану (показників безвідмовності) не можуть бути достатньо ефективно використані в умовах застосування стратегій технічного обслуговування за станом для індивідуального вирішення завдань продовження призначених ресурсів (термінів служби) обладнання ЗРМТ, оскільки: розроблені, як правило, стосовно регламентованих стратегій експлуатації і планового ремонту обладнання і застосовуються для всього парку однотипного обладнання ЗРМТ; недостатньо повно враховують індивідуальні особливості умов і режимів експлуатації конкретних комплексів ЗРМТ та їх складових частин і особливості побудови комплексів як об'єктів випробувань на надійність.

При цьому значне зниження витрат на ТО і Р комплексів може бути досягнуте шляхом індивідуального рішення задачі продовження призначених термінів служби (ресурсів) обладнання конкретних експлуатованих комплексів з урахуванням їх фактичного технічного стану і надійності. Це, у свою чергу, передбачає вирішення ряду завдань, таких як контроль граничного стану обладнання комплексів на місцях експлуатації, а, у разі

ухвалення рішення про неграничний стан, оцінки показників довговічності з урахуванням конкретних режимів і умов їх експлуатації, ступеню впливу цих режимів і умов експлуатації на стан комплексу для обґрунтованого ухвалення рішення про можливість подальшої експлуатації (необхідності проведення відповідного ремонту, списання) і ін. При цьому для вирішення завдання оцінки цих показників необхідне застосування розрахунково-експериментальних методів, які передбачають розрахунок показників, що досліджуються, у тому числі і показників довговічності, за початковими даними, визначеними експериментальними методами.

Проте, основним вихідним моментом при розробці робочої методики є етап вибору методу прогнозування, що найбільшою мірою відповідає суті і особливостям вирішуваного завдання. Проведений аналіз апарату прогнозування з оцінкою переваг і недоліків, які можуть мати місце у разі застосування згаданих методів для вирішення завдання оцінки процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) та показників довговічності, дозволяє сформулювати наступні основні вимоги, що застосовуються до моделей та методів:

можливість індивідуальної оцінки технічного стану і показників довговічності як на стадії розробки, випробувань та прийнятті до експлуатації, так і за результатами перебування в експлуатації понад призначений термін служби (ресурс);

облік деструктивних впливів у вигляді витрати ресурсів комплексів обладнання;

здатність гнучкого реагування на зміни, що відбуваються в об'єкті прогнозування, особливо під час зміни умов експлуатації та спостережень;

зведення до мінімуму ступеня участі дослідника у виборі моделі прогнозу, тобто об'єктивність прогнозу;

оцінка можливих помилок, що виникають під час рішення поставленої задачі, використання тільки достовірного статистичного матеріалу, зовнішнього по відношенню до початкового, простота і можливість

автоматизації процесу контролю.

Таким чином, на підставі проведених досліджень існуючих науково-методичних підходів до прогнозування технічного стану обладнання ЗРМТ та можливості їх використання в умовах застосування стратегій ТЕС встановлено, що запропонованій сукупності вимог, що пред'являються, найповніше задовольняють методи теорії самоорганізації та індукційного моделювання, реалізовані в *алгоритмах МГУА*.

1.4. Напрями впровадження системи технічної експлуатації за станом. Формування наукового завдання

З метою реалізації завдання щодо відновлення, утримання та розвитку ЗРМТ, яке передбачає перебування в експлуатації протягом тривалого часу переважної кількості суден, виникає потреба у негайному вжитті заходів щодо забезпечення нормативного рівня безаварійності і надійності під час експлуатації, враховуючі, що деякі зразки мають достатній запас надійності для продовження призначених термінів служби [107].

Для здійснення супроводження реалізації даного напрямку технічної політики передбачається вирішення широкого кола наукових та практичних задач. Під час їх вирішення на основі результатів проведеного аналізу виявлені невідповідності у практиці між тим, що: з одного боку – існуючі нормативні значення показників надійності та річних витрат ресурсів обладнання ЗРМТ, та тим, що з іншого боку – існує негативна динаміка зниження показників надійності та фактичної витрати ресурсів; з одного боку – існуюча потреба в ЗРМТ, що утримуються в готовності до ефективного застосування, та тим, що з іншого боку – наближення технічного стану ЗРМТ до граничного, збільшення кількості відмов комплексів обладнання; з одного боку – існуючі фіксовані періодичність та обсяг робіт ТО і Р комплексів під час виконання заходів технічного забезпечення, та тим, що з іншого боку –

недостатнє інформаційне забезпечення планування попередження відмов обладнання ЗМРТ.

Невідповідності у теорії між тим, що: з одного боку – виникла необхідність вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів) комплексів обладнання ЗМРТ при експлуатації за технічним станом, та тим, що з іншого боку – існуючі методики не враховують вплив змін технічного стану на ефективність функціонування комплексу як складної технічної системи з ієрархічно розгалуженою структурою в цілому; з одного боку – виникла необхідність прогнозування термінів досягнення граничних станів комплексів обладнання ЗМРТ поза межами призначених термінів служби, та тим, що з іншого боку – існуючий науково-методичний апарат прогнозування показників надійності базується на груповому аналізі та не враховує індивідуальні особливості експлуатації обладнання ЗМРТ, більшою мірою відповідає умовам розробки, виробництва та штатної експлуатації та не враховує індивідуальні особливості експлуатації кожного окремого комплексу та його підсистем та комплектуючих.

Таким чином, під час проведення аналізу визначені окремі протиріччя у теорії і практиці розробки, виробництва і експлуатації комплексів обладнання ЗМРТ, основним з яких є протиріччя між існуючим постійним зниженням показників надійності (безвідмовності) парка ЗРМТ (в першу чергу в зв'язку з експлуатацією поза межами призначених термінів служби) і зростаючим рівнем вимог до технічної готовності комплексів обладнання ЗМРТ.

Аналіз існуючих науково-методичних підходів до прогнозування технічного стану ЗРМТ і можливості їх використання в умовах застосування стратегій ТЕС дозволив зробити висновок, що найбільш доцільними методами оцінки та прогнозування процесів зміни технічного стану досліджуємого класу засобів на теперішній час є методи теорії самоорганізації та індукційного моделювання, покладені в основу алгоритмів МГУА. Але практична реалізація цього методу загальновідомими підходами

в умовах індивідуальної інтенсивності витрат ресурсів окремими складовими частинами комплексів обладнання ЗРМТ та нерівноточних спостережень на даний час не дозволяє побудувати оптимально складну математичну модель з точки зору мінімуму дисперсії помилки прогнозу.

Виходячи з цього, метою дисертаційної роботи є підвищення достовірності прогнозу показників довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом за рахунок впровадження запропонованих моделей та методів. А результати прогнозування показників довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом дозволяють обґрунтувати рекомендації щодо продовження призначених термінів служби (ресурсів) відповідних комплексів.

Для розв'язання протиріч в теорії і практиці між існуючим постійним зниженням показників надійності обладнання ЗРМТ (в першу в зв'язку з експлуатацією поза межами призначених термінів служби) і зростаючим рівнем вимог до технічної готовності комплексів до застосування за призначенням та досягнення мети дисертаційної роботи необхідно вирішити актуальне наукове завдання, яке полягає в удосконаленні моделей та методів прогнозування довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів). Схема формування мети та наукового завдання надана на рис.1.4.

Для розв'язання наукового завдання необхідно вирішити наступну сукупність часткових взаємопов'язаних задач:

проаналізувати систему технічної експлуатації ЗРМТ в сучасних умовах, оцінити технічний стан комплексів обладнання та деградаційні процеси зміни технічного стану його зразків, дослідити існуючі науково-методичні підходи до прогнозування процесів зміни технічного стану;

провести вибір методу прогнозування, його розвиток з урахуванням умов завдання, що вирішується та розробити математичну модель процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ;

удосконалити метод прогнозування довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом, а саме удосконалити метод прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання з використанням результатів експлуатаційних спостережень; удосконалити методи оцінки показників довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом з метою вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів);

обґрунтувати рекомендації щодо використання моделей та методів прогнозування довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів).



Рис. 1.4. Схема формування мети та наукового завдання

Під час рішення першої задачі проведений пошук найбільш раціональних шляхів підвищення якісного стану ЗРМТ з урахуванням

довговічності за умови перебування в експлуатації комплексів обладнання понад нормативно визначені терміни служби та застосування стратегії ТО і Р за станом. Метою рішення другої задачі є вибір методу прогнозування, його розвиток з урахуванням умов завдання, що вирішується та розробка математичних моделей процесу зміни технічного стану комплексів обладнання. Результатом рішення третьої задачі є удосконалення методу прогнозування довговічності комплексів при ЕТС, основою якої є метод прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) комплексів обладнання, в якій розробляються математичні моделі процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) відповідних комплексів оптимальної складності, використання якої забезпечить можливість удосконалення методу оцінки показників довговічності комплексів при ЕТС для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів) з урахуванням індивідуального характеру витрати ресурсів його комплектуючих. Результати рішення вищеперерахованих задач є основою рішення четвертої задачі – розробки рекомендацій щодо використання запропонованих в роботі моделей та методів прогнозування довговічності обладнання при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів).

Висновки до розділу 1

1. Дослідження аварійності на річковому та морському транспорті показали, що не зважаючи на щорічні коливання її показника у сторону значного росту або зниження, загальний стан аварійності на водному транспорті в Україні продовжує залишатися на високому рівні. За офіційними даними за 2019 рік технічні причини аварійності складають 23% (неналежна організація виконання правил технічного обслуговування і експлуатації та ін.) а це підкреслю актуальність теми дослідження.

2. Проведено аналіз існуючого парку обладнання ЗРМТ та деградаційних процесів зміни технічного стану його зразків, системи технічної експлуатації та її впливу на ефективність водного транспорту, існуючих науково-методичних підходів до прогнозування технічного стану зразків, в результаті якого встановлено, що сучасний етап експлуатації характеризується перебуванням в експлуатації обладнання, яке практично вичерпали призначені розробником і виробником терміни служби (ресурси), існуючою регламентованою системою їх ТО і Р, малою чисельністю парку однотипних комплексів, відсутності статистичних даних щодо моментів переходу обладнання ЗРМТ у граничний стан, обмеженими можливостями підприємств промислового комплексу щодо проведення усіх видів відновлювальних робіт. Отримані результати дозволили визначити основні недоліки та відмінності стратегій технічного обслуговування і ремонту та окреслити основні шляхи і перспективи щодо їх застосування для відповідних зразків обладнання ЗРМТ.

2. На основі узагальнення досвіду застосування регламентованої стратегії технічного обслуговування і ремонту визначена неможливість підтримання нормативного рівня технічної готовності існуючого парку комплексів обладнання ЗРМТ через обмежені виробничі можливості організацій-експлуатантів і виробничі потужності ремонтних підприємств промисловості.

3. Виявлена низка недоліків, невідповідностей та протиріч у теорії і практиці підтримання засобів водного транспорту в належному стані та визначене основне протиріччя між існуючим постійним зниженням показників надійності обладнання ЗРМТ (в першу чергу в зв'язку з експлуатацією поза межами призначених термінів служби) і зростаючим рівнем вимог до галузі водного транспорту за результатами вивчення існуючих стратегій технічного обслуговування і ремонту та можливостей їх застосування.

4. Обґрунтована актуальність роботи, що пов'язана з необхідністю визначення фактичного рівня надійності комплексів обладнання ЗРМТ в сучасних умовах експлуатації з метою науково-методичного забезпечення вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів) як на рівні вирішення наукового завдання, так і перевіреними в реальній дійсності обґрунтованих рекомендацій. В практичній сфері це призводить до недостатньої інформаційної основи та виключає можливість підтримання нормативного рівня ефективності обладнання ЗРМТ при переведенні на експлуатацію за технічним станом. Це в сукупності складає зміст наукового завдання, що має суттєве значення для науки і практики та полягає в удосконаленні моделей та методів прогнозування довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом.

5. Для вирішення наукового завдання і досягнення мети дисертації поставлені часткові наукові задачі дослідження, вирішення яких у сукупності приведе до досягнення мети дисертації – підвищення достовірності прогнозу показників довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом за рахунок впровадження запропонованих моделей та методів.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ЗАГАЛЬНИХ ПОЛОЖЕНЬ ЩОДО УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ЗРМТ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ

Нижче, відповідно до розглянутих в розділі 1 існуючого обладнання ЗРМТ та деградаційних процесів зміни технічного стану його зразків, системи технічної експлуатації та її впливу на ефективність водного транспорту, існуючих науково-методичних підходів до прогнозування технічного стану зразків обладнання ЗРМТ розглядаються загальні положення щодо удосконалення методу прогнозування довговічності обладнання при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів), здійснюється вибір методу прогнозування процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання комплексів та розробляються математичні моделі процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) засобів для вирішення завдань прогнозування показників довговічності.

Обґрунтування методу прогнозування проводиться з урахуванням можливості використання нерівноточних результатів оцінювання показників безвідмовності обладнання ЗРМТ за даними експлуатації та уточненого способу розподілу експлуатаційних спостережень на вибірки для побудови математичних моделей процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання оптимальної складності.

Основні результати, викладені в розділі, опубліковані в [21-23,42,43,58,113,114].

2.1. Концептуальний підхід до прогнозування довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом з метою вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів)

Для реалізації стратегії ТО і Р комплексів обладнання ЗРМТ за станом необхідне індивідуальне вирішення завдань продовження призначеного терміну служби (ресурсу), яке, як було показано в розділі 1, доцільно реалізовувати відповідно до основних положень щодо контролю технічного (граничного) стану, уточненню призначених термінів служби засобів з проведенням підконтрольної експлуатації та контролю граничного стану (КГС).

При цьому етапи підконтрольної експлуатації розбиті на інтервали фіксованої тривалості, а результати експлуатаційних спостережень за їх тривалість розглядаються як результати випробувань на надійність (безвідмовність). При виконанні передбачені [123-129] суміщені випробування за показниками функціонального призначення і показниками надійності (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 терміну служби (ресурсу) та приймається рішення щодо можливості подальшої експлуатації обладнання ЗРМТ з продовженням призначеного терміну служби (ресурсу) або про припинення експлуатації і доцільності проведення відновлювальних робіт встановленого виду у разі прийняття рішення про граничний стан.

Для індивідуального вирішення завдань можливості продовження призначеного терміну служби (ресурсу) необхідно проводити експериментальну оцінку показників довговічності обладнання ЗРМТ, яку можливо проводити шляхом організації ресурсних випробувань; шляхом організації експлуатаційних спостережень; комбінованим методом, що

використовує два вищеназвані напрями або сумісно.

У розділі 1 показано, що на практиці оцінка показників довговічності комплексів обладнання ЗРМТ за результатами ресурсних випробувань або експлуатаційних спостережень ускладнена через відсутність статистики моментів переходів комплексів та їх підсистем в граничні стани, відсутня вибірка значень термінів служби (ресурсів) комплексів обладнання та їх складових частин, що не дозволяє встановлювати закони розподілу цих випадкових величин.

Таким чином, в моделі, що удосконалюється, передбачаються процедури прогнозування змін показників надійності (безвідмовності) за результатами експлуатаційних спостережень за фіксовані інтервали експлуатації і випробувань на безвідмовність, що проводяться підчас КГС з подальшою оцінкою показників довговічності (залишкового терміну служби (ресурсу)).

З вищевикладеного і результатів аналізу існуючого парку обладнання ЗРМТ та деградаційних процесів зміни технічного стану його зразків, системи технічної експлуатації та її впливу на ефективність, існуючих науково-методичних підходів до прогнозування технічного стану обладнання ЗРМТ обладнання, проведеного в розділі 1, витікає, що в моделі прогнозування довговічності обладнання при ЕТС, що удосконалюється, необхідно, по-перше, передбачити проведення контролю показників надійності (безвідмовності) в процесі підконтрольної експлуатації та КГС. При цьому, у разі прийняття рішення про відповідність показника надійності (безвідмовності) встановленим вимогам, доцільно додатково проводити оцінку величини показника надійності (безвідмовності). Далі, за сукупністю отриманих статистичних даних про відмови обладнання ЗРМТ і оцінок показника надійності (безвідмовності) здійснюється прогнозування безвідмовності і довговічності (залишкового терміну служби (ресурсу)) обладнання, що, у свою чергу, повинно бути реалізовано в удосконаленому методі прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) комплексів

обладнання в якості складової методу, що розробляється.

В зв'язку зі зміною в процесі експлуатації безвідмовності комплексу обладнання ЗРМТ, а вихід показників безвідмовності за межі встановлених вимог є одним з ознак переходу об'єктів в граничний стан, то оцінку показників залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ доцільно проводити з використанням залежностей зміни відповідного показника надійності від факторів, що характеризують ступінь їх зміни, наведених в розділі 1, наприклад, через витрату ресурсу (тривалість експлуатації, сумарний наробіток і ін.).

Внаслідок того, що вигляд і кількість аргументів наведених залежностей, як правило, невідомо, то потрібно їх встановлювати з використанням накопичених результатів експлуатаційних спостережень і випробувань на безвідмовність. Методичним апаратом, який може бути використаний для вирішення даного завдання, є методи ідентифікації та самоорганізації [25,54,55]. Виключення взаємозалежності аргументів (частину з них носять випадковий і неубиваючий характер зміни в часі) і врахування отриманих результатів в умовах нерівноточних спостережень результатів підконтрольної експлуатації і випробувань на безвідмовність пропонується здійснювати відповідно з використанням *методу групового урахування аргументів* (МГУА).

Розроблену математичну модель процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ після перевірки їх якості пропонується використовувати для прогнозування значень показника безвідмовності на майбутньому етапі експлуатації [29] в припущенні, що умови і режими експлуатації на інтервалах спостереження (прогнозої ретроспекції) і випередження прогнозу істотно не розрізнятимуться. Оцінки показників довговічності (залишкового терміну служби (ресурсу)) обладнання за технічним критерієм визначаються за відомими гранично допустимим значенням показника безвідмовності і моделям зміни їх величин в процесі експлуатації. Вирішенню цих завдань присвячений підрозділ 3.1.

Метод прогнозування довговічності комплексів обладнання ЗРМТ при ЕТС використовує наступні основні положення і допущення:

при виконанні завдань продовження призначеного терміну служби (ресурсу) можуть бути отримані кількісні оцінки показників надійності (безвідмовності) обладнання ЗРМТ, які відповідають різним інтервалам експлуатації фіксованої тривалості;

перед початком вирішення завдань продовження призначеного терміну служби (ресурсу) визначений існуючий експлуатаційний (“життєвий”) цикл обладнання ЗРМТ за результатами його експлуатації протягом первинного, встановленого розробником та виробником, призначеного терміну служби (ресурсу). При цьому проводиться уточнення нормованих показників надійності комплексу обладнання ЗРМТ, які встановлені в технічних умовах на виготовлення нових зразків;

надійність нових комплексів обладнання ЗРМТ, та, відповідно, і вимоги до їх показників надійності, встановлюються розробником з деяким “допуском”, який повинен забезпечувати ефективність функціонування за призначенням не нижче заданою в межах первинного встановленого призначеного терміну служби (ресурсу). При цьому для обладнання ЗРМТ, яке експлуатуються за технічним станом, на інтервалах продовження призначеного терміну служби (ресурсу), вимоги до показників надійності уточнюються;

режими функціонування під час випробування виробів комплексів обладнання на надійність (тривалість перебування в увімкненому стані, періодичність увімкнень і ін.) виробів повинні задовольняти вимогам експлуатаційної документації, а інтенсивність експлуатації при випробуваннях на безвідмовність може бути вище, ніж при штатній експлуатації;

режими функціонування комплексів обладнання ЗРМТ в процесі підконтрольної експлуатації відповідають режимам функціонування в умовах штатної експлуатації виробів.

При цьому результати підконтрольної експлуатації розглядаються як результати пасивного експерименту;

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

прогнозована оцінка показників довговічності (залишкового терміну служби (ресурсу)) проводиться за результатами сумісної обробки результатів експлуатації і випробувань на безвідмовність на відповідних інтервалах експлуатації;

результати експлуатаційних спостережень і випробувань на безвідмовність, що накопичені на сукупності інтервалів експлуатації фіксованої тривалості, розглядаються в якості початкових даних для оцінки показників довговічності (залишкового терміну служби (ресурсу)) і, після статистичної обробки, використовуються для побудови залежностей зміни величини показника безвідмовності відповідного комплексу обладнання ЗРМТ від тривалості експлуатації і інших факторів та подальшої оцінки показників довговічності;

зміною величини показника безвідмовності, який контролюється (оцінюється) за фіксовану тривалість інтервалу експлуатації або випробувань на безвідмовність можна нехтувати, оскільки ця тривалість несумірна мала в порівнянні з величиною призначеного терміну служби (ресурсу) об'єкту випробувань. При цьому відновлення безвідмовності обладнання ЗРМТ після відмов передбачаються мінімальними, тобто безвідмовність комплексу 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 [85], величини показника безвідмовності, який контролюється (оцінюється), змінюються істотно, причому характер цієї зміни заздалегідь невідомий і повинен

встановлюватися у вигляді моделей їх зміни залежно від витрати ресурсів (тривалості експлуатації і інших факторів) за накопиченими значеннями оцінок показника безвідмовності.

З урахуванням викладених загальних основних положень та обмежень щодо удосконалення методу прогнозування довговічності комплексів ОВТ при ЕТС проведемо вибір методу прогнозування процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ для подальшої побудови математичних моделей за результатами експлуатаційних спостережень.

2.2. Вибір методу прогнозування процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання

Враховуючи характерні особливості стратегії ТО і Р за станом, що розглянуті в розділі 1, основною метою контролю технічного стану комплексів обладнання ЗРМТ у сучасних умовах експлуатації є своєчасне виявлення моментів виникнення граничних станів його підсистем, обумовлених деградаційними процесами під впливом різноманітних факторів.

Моменти початку процесів деградації є випадковими та індивідуальними для кожного типу виробів, що вносить певну долю невизначеності стосовно термінів ефективної експлуатації засобів комплексів обладнання ЗРМТ. Одним з важливих етапів контролю технічного стану є прогнозування відповідних показників.

В результаті аналізу існуючих науково-методичних підходів до прогнозування технічного стану складних технічних систем та ЗРМТ, проведеного в підрозділі 1.3, серед існуючих методів самоорганізації та індукційного моделювання умовно визначено три групи методів, кожна з яких характеризує один з трьох основних підходів до вибору кращої структури математичної моделі, таких, як класичний, сучасний і нетрадиційний.

Класичний підхід, представлений в роботах [1,2,37,38,56 та ін.], ґрунтується на апараті перевірки статистичних гіпотез. На відміну від класичного, сучасний підхід передбачає дотримання принципу компромісу між точністю і складністю (числом оцінюваних параметрів) моделі; найбільш відомими тут є напрями, представлені в [3, 15] та присвячені мінімізації ентропії моделі, гарантованому оцінюванню величини середнього ризику та незміщеному оцінюванню теоретичної помилки моделі.

Нетрадиційний підхід „перехресного обґрунтування”, представлений в роботах [33, 35, 36, 41, 119] заснований на розподілу вибірки даних для отримання додаткової інформації та присвячений можливостям застосування МГУА та методу “джекнайф” при розв'язанні широкого спектру задач ідентифікації, прогнозування та розпізнавання.

Таким чином, з наведеного в [44, 46, 95] огляду основних методів моделювання за статистичними даними можна зробити висновок про наявність основних спільних для них етапів, які формують основні компоненти методів побудови моделей:

вибір класу базисних функцій та відповідне перетворення вихідних даних;

генерація різних структур моделей у вибраному класі;

оцінювання параметрів кожної генерованої структури;

мінімізація значення заданого критерію селекції та вибір кращої моделі.

Очевидно, що деякі етапи в конкретному методі моделювання можуть бути відсутніми, залежно від наявної апіорної інформації. Так, скажімо, якщо істинна структура моделі (набір аргументів, що реально формують вектор виходу) відома, то відпадає необхідність в етапах генерації різних структур та мінімізації значення критерію селекції.

Враховуючи факт подачі даних результатів обробки первинної інформації, яка зафіксована у формулярах (додатках до формулярів) на виробі та журналах технічного обслуговування, за звітами про експлуатацію

комплексів обладнання ЗРМТ та його складових частин, зведених відомостях результатів підконтрольної експлуатації на комплекси обладнання ЗРМТ у вигляді дискретної часової послідовності, яку прийнято називати динамічним рядом, та практичної відсутності апріорної інформації про предмет дослідження, в зв'язку з тим, що після проведення КВР на комплексах обладнання ЗРМТ в його складі будуть знаходитись одночасно декілька видів конструктивних елементів (конструктивні елементи, які знаходяться в експлуатації тривалий час та не замінювались; конструктивні елементи, які тривалий час зберігались у ЗІП та були встановлені замість несправних під час проведення робіт з відновлення працездатності; конструктивні елементи, які розроблені і виготовлені місцевими підприємствами промисловості на заміну іноземних аналогів), доцільніше для синтезу математичної моделі використовувати методи самоорганізації (тобто нетрадиційного підходу), одним з яких є МГУА.

Метод групового урахування аргументів є основою математичного забезпечення для прямого моделювання складних систем за експериментальними даними в умовах невизначеності.

Під “математичною моделлю” розуміється [44, 56, 57, 117] система регресійних рівнянь, призначених для опису і прогнозу процесу зміни технічного стану відповідних зразків обладнання ЗРМТ.

Таке формулювання вимагає порівняння традиційних поглядів на наведені методи регресійного аналізу зі змістом МГУА в частині його застосування і розвитку для досягнення мети дослідження.

Застосування методів регресійного аналізу засноване на використанні таблиці початкових даних, проте при цьому структура моделі призначається довільно. Пояснюється це тим, що критерій середньоквадратичної похибки, розрахований за всіма точками таблиці, є внутрішнім критерієм, тобто його визначення засноване на використанні тієї ж інформації, яка використовується і для самої моделі. Будь-який внутрішній критерій порівняння приводить до помилкового виводу: чим складніше модель – тим

вона точніша [34]. Складність моделі, наприклад поліноміальної, оцінюється числом з вищим ступенем доданків і чим більше членів полінома – тим менше середньоквадратична похибка.

В якості математичних моделей зміни показників безвідмовності в [59] запропоновані парні регресійно-часові залежності параметра потоку відмов, $\tilde{\omega}(T)$ обладнання досліджуваного (досліджуваних) комплексу(-ів) від тривалості експлуатації T_e або сумарного наробітку, які будуються за даними експлуатації лідерних і досліджуваного комплексу обладнання (або груп однорідних комплексів). При відборі лідерних комплексів з використанням відомих методів математичної статистики [2] перевіряється відповідність результатів експлуатації їх приналежність однієї генеральної сукупності. Недоліками вищеназваного підходу до побудови математичної моделі зміни показників безвідмовності експлуатованого комплексу, що ускладнюють їх застосування для вирішення поставленого завдання, є: опис процесу зміни безвідмовності за допомогою парних регресійно-часових залежностей показника безвідмовності (тільки від тривалості експлуатації або від сумарного наробітку) істотно спрощує фактичну залежність цих показників безвідмовності від інших різних параметрів, що характеризують режими експлуатації комплексів, і їх кореляцій; спостережувані величини, використовувані як фактори при побудові множинних лінійних регресійних моделей, передбачаються незалежними, що не виконується для вибраної сукупності параметрів, що характеризують режими експлуатації комплексів обладнання. Вказані недоліки можуть приводити до помилок в оцінці показників залишкового ресурсу (терміну служби) і, як наслідок, до ухвалення помилкових рішень про передчасний ремонт або про можливість (доцільність) експлуатації комплексу обладнання ЗРМТ, що знаходиться в граничному стані, яка характеризуватиметься зниженою його безвідмовністю і підвищеними витратами на усунення наслідків виникнення додаткових відмов.

В [56, 57] пропонується закономірності зміни показників

безвідмовності визначати з використанням методів множинного лінійного регресійного аналізу. При цьому визначаються залежності показників безвідмовності “ймовірність безвідмовного увімкнення” і “середній наробіток на відмову” від параметрів, що характеризують режими експлуатації (тривалість експлуатації, сумарний наробіток, сумарна кількість вмикань). Передбачається оцінювати коефіцієнти множинних лінійних регресійних моделей з декількома параметрами. Недоліками вищезазначеного підходу до побудови математичної моделі зміни показників безвідмовності комплектуючих експлуатованого комплексу, що ускладнюють їх застосування для вирішення поставленого завдання, є: залежність точності і достовірності оцінок показників довговічності від точності побудови моделі зміни безвідмовності комплексів обладнання ЗРМТ, яка, у свою чергу, характеризується точністю оцінок невідомих коефіцієнтів регресії, яка при збільшенні кількості невідомих коефіцієнтів регресії при обмеженому об'ємі експлуатаційних спостережень призводить до зниження точності їх оцінок [2, 14, 17]; можлива наявність вихідних факторів, які несуттєво впливають на величину показників безвідмовності (тобто є надлишковими) або виявляються лінійно залежними, що призводить до необґрунтованих витрат при обробці даних з використанням всієї кількості вихідних (включаючи надлишкові і лінійно залежних) факторів; велика розмірність факторного простору не допускає наочного представлення даних, а також ускладнює інтерпретацію отриманих результатів, при цьому застосування відомих способів виключення надлишкових вихідних факторів [2, 17, 25, 63] ускладнюється тим, що зниження розмірності факторного простору дуже часто може приводити до ускладнень в інтерпретації результатів моделювання; встановлення за результатами прогнозування величини призначених ресурсів і термінів служби, які безпосередньо пов'язані з параметрами, що характеризують режими експлуатації (сумарний наробіток і тривалість експлуатації), потребує для визначення структури моделі в новому факторному просторі повернення у вихідний факторний простір, що може

спричинити виникнення нових помилок, пов'язаних з переходами з одного факторного простору в інший і назад, яке, у свою чергу, може понизити точність і достовірність прогнозування безвідмовності комплексів обладнання ЗРМТ.

Структура моделі в загальному вигляді представлена [36, 44] таким чином: $u = f(v, \theta)$; $v \in V$, $u \in U$, де f – параметричне сімейство відображень, залежне від параметра θ .

Значення параметра θ можуть розглядатися як математичні моделі, задані на множині $V \times U$. Завданням методів регресійного аналізу є визначення коефіцієнтів θ_0 , θ_1 , θ_2 і так далі для виразів визначеного вигляду, наприклад: $u = \theta_0 + \theta_1 v_1 + \theta_2 v_1 v_2$. Проте функція u може бути представлена в іншому вигляді: $u = \theta_0 + \theta_1 v_2 + \theta_2 v_1 v_2$; $u = \theta_0 + \theta_1 v_1 + \theta_2 v_2 + \theta_3 v_1 v_2$, і так далі.

Методами регресійного аналізу така задача не може бути вирішена, хоча є очевидним, що потрібно не тільки знаходити коефіцієнти, але і бути впевненим в правильності вибору структури моделі.

Таким чином, рішення задачі методами регресійного аналізу з призначенням структури моделі може бути виправданим, якщо довільно обрана структура надмірна, тобто навмисно переускладнена. Проте при цьому, по-перше, використання навіть навмисно переускладнених моделей вимагає докази їх адекватності досліджуваному процесу (що не завжди можливо методами регресійного аналізу) і, по-друге, відшукування переускладнених моделей, як правило, викликає серйозні практичні ускладнення при реалізації цього процесу. У разі, коли у складі обраної моделі є структурна недостатність або ступінь членів моделі менше потрібної, то це, мабуть, приведе до зсуву оцінок коефіцієнтів і, як результат – до значних помилок прогнозу, тобто, довільний вибір структури моделі практично на перших етапах дослідження приводить до невизначеності і ставить під сумнів правильність отриманих результатів.

На відміну від методу регресійного аналізу МГУА виходить з наявного об'єму потрібної для моделювання апріорної інформації. На її основі і в результаті послідовної оцінки великої кількості моделей – претендентів здійснюється пошук моделі оптимальної складності, найбільш адекватно тієї, що відображає зміст досліджуваного процесу. При цьому оцінки моделей знаходяться за допомогою порівняно невеликій частини початкових даних, решта даних застосовується для отримання оцінок коефіцієнтів і з'ясування оптимальної структури моделі [59].

Відомо, що МГУА заснований на застосуванні зовнішніх критеріїв, які визначаються за допомогою нової інформації, яка не використовується при синтезі моделей. Це положення підтверджується висновками математичної логіки [60] про необхідність зовнішнього доповнення, оскільки тільки зовнішні критерії дозволяють обрати єдину (для кожного критерію) модель оптимальної складності.

Структура моделі оптимальної складності відповідає мінімуму зовнішнього критерію. Основний принцип теорії самоорганізації полягає в тому, що при поступовому ускладненні моделей деякі критерії (властивості, що мають зовнішнє доповнення) проходять через свій мінімум. Проводячи перебір моделей, знаходимо цей мінімум і вказуємо єдину раціональну модель мінімальної складності.

Характеристику широких можливостей, що представляються до МГУА, можна істотно доповнити, враховуючи необхідність оцінки точності отриманого прогнозу. Якщо для побудови звичайних моделей апроксимації існує цілком надійні критерії: дисперсія, кореляційне відношення, критерії Фішера і Ст'юдента, то застосування цих критеріїв для оцінки якості прогнозу викликає серйозні заперечення, оскільки не дає підстав вважати, що в майбутньому ці оцінки будуть правомірні [117].

Викладене дає підставу вважати за доцільне використання МГУА для вирішення завдань дослідження прогнозування процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності), принципову можливість чого показали виконані

в цьому руслі дослідження [44, 117]. Разом з тим, застосування МГУА ускладнене, оскільки апарат методу не може бути повною мірою використаний і вимагає певного уточнення, що зумовило подальше його опрацювання і перш за все – в плані адекватності змісту процесу досягнення граничного стану обладнання ЗРМТ в умовах експлуатації поза межами призначених термінів служби при переведенні на експлуатацію за технічним станом.

З урахуванням викладених загальних основних положень та обмежень до методу прогнозування довговічності обладнання ЗРМТ при ЕТС, обраного методу прогнозування процесу зміни технічного стану (рівня довговічності) розглянемо процедуру розробки математичних моделей процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання за результатами експлуатаційних спостережень.

2.3. Розробка математичної моделі процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ за результатами експлуатаційних спостережень

2.3.1. Визначення напрямів формування математичної моделі. Процес зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ може бути представлений у вигляді часового ряду (Y_t), що складається з впорядкованих в часі наборів вимірювань відповідних характеристик досліджуваного процесу: $y_t = x_t + \xi_t$, де x_t – детермінована компонента процесу; ξ_t – стохастична компонента процесу. При цьому наявність детермінованої складової пояснюється процесами деградації, зношування і старіння обладнання ЗРМТ, обумовленими витратою ресурсів, передбаченою нормативно-експлуатаційною документацією, впливом кліматичних і інших чинників, а також виконаними заходами з технічного обслуговування і ремонту. Стохастична компонента обумовлена помилками, що виникають під

час вимірювання параметрів, відхиленнями у виборі початку відліку та іншими причинами [34, 36].

Основою будь-якого прогнозу є деякий об'єм початкової інформації, наприклад, за час T_1 (рис.2.1), протягом якого в дискретні моменти часу $t_i = t_0, t_n$ досліджуваний показник приймає випадкові значення $Y(t_i) = Y_0, Y_n$.

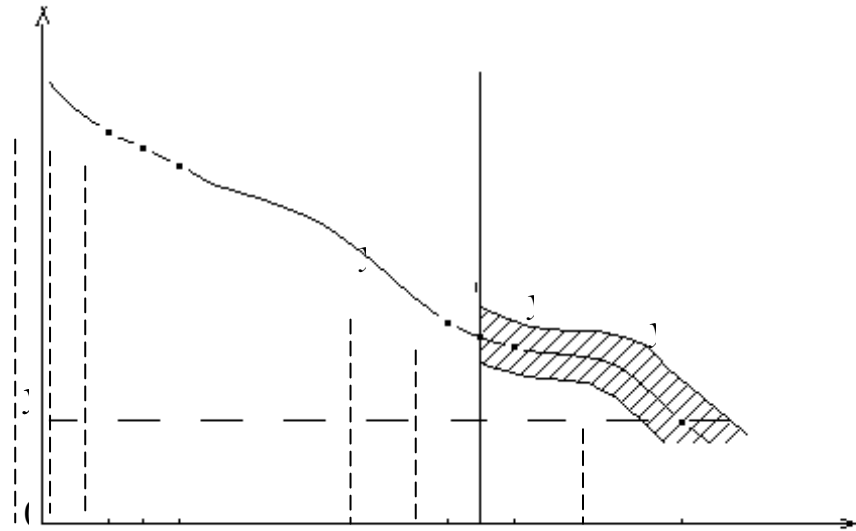


Рис. 2.1. Випадковий процес зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ

Аналітичний вираз функції математичного сподівання $M[Y(t)]$ контрольованого показника повинен в області T_1 задовольняти такій умові

$$\begin{cases} M[Y(t_0)] = Y(t_0); \\ M[Y(t_1)] = Y(t_1); \\ M[Y(t_2)] = Y(t_2); \\ \dots\dots\dots \\ M[Y(t_n)] = Y(t_n). \end{cases} \quad (2.1)$$

Вважаємо, що відхилення контрольованого показника від загальної тенденції його зміни відповідає нормальному закону розподілу. При цьому в

подальшому шляхом формального і логічного аналізу процесу можемо стверджувати про збереження тенденції зміни показника $Y(t)$ і в області T_2 з деякою погрішністю $\varepsilon(t)$, тобто показник набуває значення $M[Y(t_{n+1})] \pm \varepsilon(t_{n+1}), M[Y(t_{n+2})] \pm \varepsilon(t_{n+2})$ і так далі до моменту, коли функція $Y(t)$ досягне допустимого (граничного) значення

$$M[Y(t_{n+j})] \pm \varepsilon(t_{n+j}) \geq Y_{don}. \quad (2.2)$$

Далі визначення допустимого значення Y_{don} розглядається вторинним завданням, оскільки про пошук її рішення має сенс говорити у випадку вирішення завдання визначення регулярної складової компоненти та на її основі отримання коректного уявлення процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) в часі [59].

Необхідно відмітити, що якщо закон розподілу контрольованого показника невідомий, то виникає завдання опису випадкового процесу і прогнозування його значень на інтервалі T_2 , яке може бути з успіхом вирішено шляхом застосування МГУА. Таке завдання відповідно до МГУА може бути зведена до пошуку екстремуму деякого критерію CR на множині різних моделей f

$$f^* = \arg \min_{f \in F} CR(f). \quad (2.3)$$

В якості основних критеріїв відбору моделей використовуються, як правило, критерії регулярності – $AR_B(s)$ або $\Delta^2(B)$ та мінімуму зсуву – CB або n_{cm}^2 , які в найбільш загальному вигляді [36, 118] можна записати

$$AR_B(s) = AR_{B/A}(s) = \Delta^2(B) = \|Y_B - X_B \theta_A\|^2, \quad (2.4)$$

$$CB = CB_{W|A,B} = n_{cm}^2 = \|X\theta_A - X\theta_B\|^2, \quad (2.5)$$

де запис $AR_{B|A}(s)$ означає “помилка на B моделі складності s , коефіцієнти якої отримано на A ”;

X, Y – матриці, що містять всю вихідну інформацію;

X_A, X_B, Y_A, Y_B – матриці, відповідно, $(n_A \times m), (n_B \times m), (n_A \times l)$ і $(n_B \times l)$;

n_A, n_B – натуральні числа, сума яких дорівнює n ;

A, B – множини, які згруповані на вибірках $(X_A \vdots Y_A)$ і $(X_B \vdots Y_B)$;

θ_A, θ_B – коефіцієнти, знайдені, відповідно, на множинах A, B ;

Надалі опустимо в формулах залежність від s , пам’ятаючи, що значення критеріїв розглядаються для конкретної складності s . Очевидно, що (2.3) не містить вичерпного формулювання завдання, тому додатково необхідно:

задати вигляд і об’єм початкової інформації;

вказати клас базисних функцій, з яких формується множина F ;

визначити спосіб генерації моделей f разом з методом оцінювання параметрів;

вибрати критерій порівняння моделей;

вказати метод мінімізації CR .

З метою уточнення постановки завдання застосуємо такі припущення [36, 117]:

1. Процес характеризується m вхідними (незалежними) змінними $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}$ і однією вихідною (залежною) змінною y_i , які пов’язані співвідношенням: $y_i = x_i \Theta + \xi_i$, де Θ – вектор m незалежних параметрів; i – номер спостереження; ξ_i – вектор реалізації випадкової величини (шуму).

2. Вектор реалізації випадкової величини має наступні властивості:

$E\xi_i = 0$, $E\xi_i\xi_i = \sigma^2$, $E\xi_i\xi_j = 0$, $i \neq j$, де σ^2 – кінцева невідома дисперсія при невідомій функції розподілу ξ_i ; E – оператор математичного сподівання.

3. Вважається заданою вибірка W , яка містить n точок спостережень, що створюють матрицю аргументів $X = \{x_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\}$ та вектор вихідної змінної $y = (y_1, \dots, y_n)^T$, причому $n \geq m$.

З урахуванням введених припущень завдання моделювання процесу полягає у формуванні деякої множини моделей різної структури $y_f = f(x, q_f)$ і відшуканні найкращої моделі за умови [36, 118]

$$f^* = \arg \min_{f \in F} CR(y, f(x, \theta_f)). \quad (2.6)$$

Пошук прогнозних значень повинен вестися в області незміщених і ефективних оцінок, що з успіхом вирішується за допомогою МГУА.

Для оцінки прогнозних значень випадкового процесу застосовується критерій передбачувальної здатності, в якому використовується середньоквадратична помилка, розрахована для вибірки Y при параметрах, отриманих на окремій екзаменаційній вибірці C , яка не застосовувалась для знаходження коефіцієнтів θ та під час вибору моделей-претендентів, та має вигляд

$$\Delta^2(Y \setminus C) = \|Y_C - X_C \theta_w\|^2, \quad (2.7)$$

де X_C , Y_C – матриці, отримані на окремій екзаменаційній вибірці C ;

θ_w – коефіцієнт, знайдений на множині W .

Таким чином, завдання оцінки зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ при ЕТС зводиться до пошуку функції опису випадкового процесу з незміщеними, достовірними параметрами і визначення її прогностичних значень. Рішенню цієї задачі присвячені наступні підрозділи роботи.

2.3.2. Формалізація факторів впливу на процес зміни технічного стану (рівня безвідмовності) судового обладнання. Вивчення механізму впливу факторів на параметри надійності обладнання ЗРМТ можливе шляхом організації спеціального експерименту, що дозволяє протягом тривалого періоду часу диференційовано оцінити залежність рівня надійності від того або іншого фактору. Але реалізація цього методу на практиці ускладнена практичною неможливістю визначення впливу будь-якого з факторів в якості самостійно, при цьому метод вимагає певних матеріальних витрат і необхідності усунення підконтрольного зразка обладнання ЗРМТ від виконання завдань.

При цьому відомо, що процес експлуатації обладнання ЗРМТ є складним, багатофакторним і має наступні особливості:

- наявність керованих, некерованих та неконтрольованих факторів, що суттєво впливають на результат процесу;

- велика кількість складних кореляційних зв'язків між факторами;

- значно виражена залежність деградаційних процесів зміни технічного стану та показників надійності від впливу експлуатаційних і інших факторів, наведених в підрозділі 1.2.

Рішення задачі обґрунтування факторів, що впливають на процес зміни технічного стану (рівня надійності), забезпечене наступною інформацією:

- інформація про надійність за результатами приймально-здавальних випробувань після проведення середнього ремонту за технічним станом;

- характеристики показників надійності, отримані за результатами періодичних випробувань окремих засобів комплексів обладнання ЗРМТ;

дані про надійність засобів, отримані за результатами його підконтрольної експлуатації у вигляді даних про відмови (несправності) та наробіток виробів, що отримані за результатами експлуатації (з експлуатаційної документації).

Таким чином, джерелами первинної інформації про відмови та несправності обладнання ЗРМТ за результатами контролів функціонування, контролів граничного стану є формуляри (додатки до формулярів) на вироби та журнали технічного обслуговування.

Названа статистична інформація дає можливість вести оцінку зміни рівня безвідмовності та довговічності обладнання ЗРМТ за допомогою показників: середній наробіток на відмову (T_0) і параметр потоку відмов (μ), при необхідності додатково можливо визначати значення показника безвідмовності ймовірність безвідмовного увімкнення ($P_{увім}$).

Параметр потоку відмов, що характеризує інтенсивність потоку відмов ремонтпридатного засобу обладнання ЗРМТ, визначається [67, 81] з виразу

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M \{r(t + \Delta t) - r(t)\}}{\Delta t},$$

де $M\{r(t + \Delta t) - r(t)\}$ – математичне сподівання числа відмов на відрізок Δt ;

Δt – малий відрізок наробітку;

$r(t)$, $r(t + \Delta t)$ – число відмов, що наступили від початкового моменту часу до досягнення наробітку t і $(t + \Delta t)$ відповідно.

При проведенні досліджень використовувався показник “середній наробіток на відмову”, який означає відношення сумарного наробітку відновлюваного об'єкту до математичного сподівання числа його відмов протягом цього наробітку [67, 81], а його статистична оцінка визначається

$$T_0 = \frac{t}{r(t)}, \quad (2.8)$$

де $r(t)$ – число відмов, що відбулися за сумарний наробіток t .

Для практичних розрахунків співвідношення для визначення точкової оцінки показника “середній наробіток на відмову” має вигляд [85]

$$\hat{T}_0 = \frac{T_\Sigma}{d_m + 1}, \quad (2.9)$$

де T_Σ – сумарний наробіток об'єктів випробувань;

d_m – кількість залікових відмов, виявлених за період випробувань.

Дисперсію точкової оцінки показника “середній наробіток на відмову” розраховують за формулою [71]

$$\hat{D} = \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \left(t_i - \hat{T}_0 \right)^2, \quad (2.10)$$

де $\hat{\sigma}$ – оцінка середньоквадратичного відхилення наробітку між відмовами;

t_i – окремі значення випадкової величини (наробітку між відмовами).

Використання статистичних даних для виявлення залежності рівня довговічності від дії об'єктивних і суб'єктивних факторів вимагає розбиття всього об'єму наявної інформації на частини, що відповідають цілям дослідження.

Першим кроком, що відповідає цій вимозі, є розподіл всієї інформації, отриманої за результатами підконтрольної експлуатації, за роками виготовлення. Таке розбиття дозволяє врахувати фактори, які пов'язані з вдосконаленням технологічного процесу виготовлення, відпрацьованістю конструкторської документації і змінами в конструкції виробів.

Тривалість експлуатації (календарний термін експлуатації), як фактор, що впливає на безвідмовність та довговічність засобу обладнання ЗРМТ, дозволяє врахувати природне старіння виробу, фізико-географічні умови (дію навколишнього середовища, сезонні зміни температур та ін.).

В якості основи формалізації факторів, що характеризують інтенсивність експлуатації обладнання ЗРМТ, доцільно вибрати режими витрати ресурсів. Сукупність параметрів, що характеризують режими експлуатації комплексів обладнання ЗРМТ, з урахуванням форм і механізмів реєстрації результатів експлуатаційних спостережень пропонується вибрати такою: тривалість експлуатації, сумарний наробіток, сумарна кількість увімкнень. Використання наведених факторів дозволяє врахувати вібрації, електричні і механічні навантаження, їх коливання при зміні режимів роботи.

Таким чином, залежність величини відповідного показника надійності (безвідмовності) від значень параметрів, що характеризують режими експлуатації, відповідно до комплексу обладнання ЗРМТ, що розглядається, може бути визначена математичною моделлю, що описує процес зміни технічного стану (рівня безвідмовності) комплексу обладнання ЗРМТ. Для побудови цієї залежності використовуються результати підконтрольної експлуатації комплексів обладнання, починаючи з інтервалу експлуатації, якому належить момент погіршення їх безвідмовності; результати випробувань на безвідмовність при проведенні КГС.

Визначення залежності показника безвідмовності “середній наробіток на відмову” (додатково при необхідності “ймовірність безвідмовного увімкнення”) від параметрів, що характеризують режими експлуатації (тривалість експлуатації, сумарний наробіток, сумарна кількість увімкнень). Передбачається оцінювати коефіцієнти отриманих математичних моделей за декількома параметрами. Для цього тривалість експлуатації розбивається на інтервали експлуатації, протягом яких характеристики безвідмовності вважаються постійними, достатніми для накопичення прийняттого об'єму експлуатаційних спостережень і подальшої оцінки показників

безвідмовності, повинні бути узгоджені з періодичністю технічних обслуговувань і механізмом обліку результатів експлуатаційних спостережень. Для обладнання ЗРМТ в режимі використання за призначенням з річною витратою ресурсу не менше 300 годин запропоновано прийняти її рівною одному кварталу [56].

Збір інформації здійснюється по зафіксованих в експлуатаційній документації відмовах комплексів обладнання ЗРМТ, вмиканнях апаратури з проведенням контролів функціонування і показниках лічильників часу роботи, встановлених на пристроях складових частин комплексу обладнання, в моменти виявлення відмов і в моменти їх усунення (відновлення працездатності пристроїв, що відмовили). При цьому моментом відновлення працездатності пристрою, що відмовив, вважається момент закінчення перевірок (автономних і комплексних), передбачених експлуатаційною документацією після проведення відновлюваних робіт.

Відповідні показники лічильників наробітків складових частин комплексу обладнання ЗРМТ перетворюються в часові інтервали наробітків між відмовами і значення сумарних наробітків складових частин комплексу.

Сформовані вибірки наробітків між відмовами перевіряються на аномальність. Причинами виникнення аномальних значень можуть бути: порушення умов експлуатації або випробувань, порушення умов збору даних, механічні помилки при реєстрації даних і підготовці їх до подальшої обробки. Результати спостережень, що різко виділяються, виключаються на основі змістовного аналізу умов, при яких ці спостереження реєструвалися. Якщо в результаті такого аналізу рішення не ухвалене, то використовуються відомі формальні методи виключення аномальних спостережень [14].

Таким чином, необхідно, використовуючи зібрану і заздалегідь оброблену інформацію, оцінити показники довговічності (залишкового терміну служби (ресурсу)) обладнання конкретних ЗРМТ. За даними експлуатації відповідно до встановленої системи збору і обробки інформації визначаються: дані про число відмов d_{mi} (число відмов при вмиканнях d_{pi}) за

інтервали експлуатації $i = \overline{1, K}$; значення сумарного наробітку $T_{(i)}$, сумарної кількості увімкнень $N_{(i)}$ кожного засобу комплексу обладнання ЗРМТ, відповідні кожному i -му інтервалу експлуатації.

Отримані результати експлуатації обладнання ЗРМТ за кожен інтервал, зафіксовані в експлуатаційній документації, та результати випробувань на безвідмовність, зареєстровані в протоколах випробувань при КГС, використовуються для отримання відповідних кількісних оцінок показників безвідмовності і дисперсій цих оцінок.

Значення отриманих оцінок показників безвідмовності обладнання ЗРМТ при ЕТС і дисперсій цих оцінок далі використовуються при побудові залежностей цих показників від параметрів, що характеризують режими експлуатації. Для цього значення параметрів, що характеризують режими експлуатації на інтервалі “старіння”, і, відповідні ним значення оцінок показників безвідмовності, хронологічно впорядковано заносяться у відповідну таблицю.

Інформація, згрупована таким чином, використовується в якості вихідних даних при побудові математичних моделей зміни показника безвідмовності T_0 (при необхідності $P_{увім}$) за сукупністю точок п'яти вимірному простору $\{Y_i, T_{(i)}, T_{e(i)}, S_{(i)}, N_{(i)}\}$, де $Y_i = \hat{T}_{o.i}$ (або $Y_i = \hat{P}_{увім.i}$). Використовуючи МГУА, будуються залежності оцінок показника безвідмовності засобів комплексу обладнання ЗРМТ від параметрів, що характеризують режими його експлуатації та витрати ресурсів $\{Y = f(T, T_e, S, N)\}$.

Розглядаючи в якості одного з проявів суб'єктивних факторів процес відновлення при виникненні відмов, несправностей і пошкоджень, які усуваються поточним ремонтом, то можна говорити про тенденцію стабілізації середнього часу відновлення комплексу обладнання ЗРМТ. При

цьому в подальших розрахунках використовується постійне значення (задане ТТЗ) середнього часу відновлення $T_e=120$ хвилин.

Далі розглянемо моделювання за експериментальними даними з використанням процедур МГУА з метою визначення основних його етапів при формуванні методу прогнозування довговічності комплексів обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом.

2.3.3. Моделювання за експериментальними даними з використанням процедур МГУА. Як було попередньо встановлено, завдання моделювання полягає у виборі за заданим критерієм найкращої моделі з деякої множини моделей [36].

Для методу, що удосконалюється, необхідно співвіднести зміст перерахованих в підрозділі 2.2 основних етапів з процесом зміни технічного стану (рівня надійності) відповідного обладнання ЗРМТ. У зв'язку з цим процес побудови математичних моделей з використанням процедур МГУА за результатами експлуатаційних спостережень полягає в наступному.

По вибірці спостережень змінних Y і X потрібно вибрати структуру f з деякого класу структур F , вважаючи, що $f \in F$, і оцінити значення параметра θ . Модель досліджуваного процесу визначається у вигляді $y = f(x, \theta)$, де y – скалярна вихідна змінна, x – векторна вхідна змінна. Вся апіорна інформація полягає в тому, що при деяких значеннях $x \in X$ ми спостерігаємо величину y , спотворену шумом.

Вибірку спостережень в ході підконтрольної експлуатації запишемо у вигляді двох матриць X і Y відповідно:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix}, \quad (2.11)$$

$$Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T, \quad (2.12)$$

де x – значення входних змінних (факторів витрати ресурсів);
 y – значення вихідної змінної (визначального показника безвідмовності);

n – число спостережень;

m – число входних змінних.

Існує функція опису процесу зміни рівня надійності обладнання ЗРМТ:

$y_i = f(x_{ij}) + \xi_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$, де x, y – елементи матриць X і Y відповідно; ξ_i – випадкова помилка вимірювань величин.

У розроблених алгоритмах МГУА використовуються одні і ті ж критерії селекції і однакові системи опорних функцій. Відмінність же алгоритмів моделювання визначається структурою генератора моделей, тобто схемою перебору повної або неповної множини часткових моделей, що ускладнюються, у вибраному базисі.

Для вимірюваних значень експлуатаційних чинників $x_1, \dots, x_m$ процесу моделювання і заданого ступеня полінома q число доданків g в повному поліномі ступеня q від m змінних визначається виразом

$$g = \prod_{j=1}^m \frac{q+j}{j}. \quad (2.13)$$

Відповідно повний поліном має вигляд

$$y = \sum_{u=1}^g a_u \prod_{j=1}^m x_j^{q_{uj}}. \quad (2.14)$$

Для формування ступенів аргументів організована процедура отримання послідовності m розрядних чисел $q_u = (q_{u1}, \dots, q_{um})$ з підстановками $1, 2, \dots$ і так далі.

Так, для досліджуваних в ході дослідження засобів комплексів обладнання ЗРМТ чотирьох аргументів ($m = 4$) і $q = 2$ отримана послідовність $g = 15$ чисел q_u , $u = 1, 15$: 0000, 1000, 0100, 0010, 0001, 1100, 1010, 1001, 0110, 0101, 0011, 2000, 0200, 0020, 0002, що відповідає повному поліному

$$y = \alpha_1 + \alpha_2 x_1 + \alpha_3 x_2 + \alpha_4 x_3 + \alpha_5 x_4 + \alpha_6 x_1 x_2 + \alpha_7 x_1 x_3 + \alpha_8 x_1 x_4 + \alpha_9 x_2 x_3 + \alpha_{10} x_2 x_4 + \alpha_{11} x_3 x_4 + \alpha_{12} x_1^2 + \alpha_{13} x_2^2 + \alpha_{14} x_3^2 + \alpha_{15} x_4^2. \quad (2.15)$$

Блок перебору часткових моделей включає виконання таких операцій: формування структури чергової часткової моделі; формування відповідної нормальної системи рівнянь, оцінка коефіцієнтів моделі.

Формування структур часткових моделей в комбінаторному алгоритмі здійснюється за допомогою двійкового структурного вектора $d = (d_1, d_2, \dots, d_g)$: якщо елемент d цього вектора приймає значення 1, то відповідний u -й аргумент включається в часткову модель, якщо 0 не включається ($u = 1, g$).

Зміна стану вектора d організовується розміщенням в ній одиниць: спочатку однієї (всього отримане $C_g^1 = g$ варіантів), потім два (всього $C_g^2 = 1/2 g(g+1)$ варіантів) і так далі. Загальне число різних структур складає

$$p_g = \sum_{u=1}^g C_g^u = 2^g - 1, \quad (2.16)$$

тобто повний перебір.

Ітераційні генератори забезпечують процедуру формування структур моделей, в основі якої лежить правило переходу від s -й ітерації до $(s+1)$ -ої

$$y_l^{s+1} = \alpha_l y_r^s + \beta_l y_{r^*}^s, s = 1, 2, \dots, r, r^* = \overline{(1, F)}, l = \overline{(1, CF_2)}, \quad (2.17)$$

де α, β – коефіцієнти моделі;

F – свобода вибору, рівна числу змінних, що пропускаються з одного ряду в наступний.

З урахуванням початкового базису даних процедура (2.17) має вигляд

$$y_l^{s+1} = \alpha_l y_r^s + \beta_l x_j, j = \overline{1, m}, r = \overline{1, F}.$$

Окрім вказаних лінійних моделей ітераційні генератори структур дозволяють сформувати моделі з нелінійними частковими описами, що мають вигляд

$$y_l^{s+1} = \alpha_{0l} + \alpha_{1l} y_r^s + \alpha_{2l} y_{r^*}^s + \alpha_{3l} y_r^s y_{r^*}^s + \alpha_{4l} (y_r^s)^2 + \alpha_{5l} (y_{r^*}^s)^2.$$

Оцінка параметрів часткових структур моделей, що формуються тим або іншим генератором, проводиться за МНК [61]

$$\hat{\theta} = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (2.18)$$

де матриці повної нормальної системи мають вигляд:

$$X^T X = \begin{vmatrix} x_1^T x_1 & x_1^T x_2 & \dots & x_1^T x_m \\ x_2^T x_1 & x_2^T x_2 & \dots & x_2^T x_m \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_m^T x_1 & x_m^T x_m & \dots & x_m^T x_m \end{vmatrix}. \quad (2.19)$$

$$X^T Y = \begin{vmatrix} x_1^T y \\ x_2^T y \\ \vdots \\ x_m^T y \end{vmatrix} \quad (2.20)$$

Зовнішні критерії відбору математичних моделей процесів призначені для вирішення завдання (2.3) і засновані на розділенні вибірки початкових

даних на дві і більш за частини. При цьому сукупність значень оцінок показника надійності засобів комплексів обладнання ЗРМТ на різних фіксованих інтервалах експлуатації розподіляється на навчальну A і перевірочну B .

Відомо, що в алгоритмах МГУА, які використовувались в роботах [44, 59] цей розподіл здійснювався послідовно або “за дисперсією”, що базуються на ранжируванні спостережень за їхнім розсіюванням навколо середньої точки. Проте, ці способи розподілу не можуть бути застосовані при прогнозуванні показників надійності засобів комплексів обладнання ЗРМТ, особливо при переведенні на ЕТС, оскільки параметри, що характеризують режими експлуатації, мають зростаючий у часі характер і найбільш важливими є останні спостереження, які відображують останні тенденції у зміні властивостей надійності. Тому необхідно, щоб ці останні спостереження були представлені в обох вибірках.

В [119] проблема розподілу розглянута з точки зору мінімізації дисперсії похибки прогнозу. Оптимальним є такий розподіл сукупності, при якому за умови мінімуму дисперсії похибки моделі на кожній з вибірок буде отримана одна й та сама структура [41, 120]. Точне вирішення цієї задачі передбачає планування активного експерименту.

Для пасивного експерименту оптимальним є такий розподіл на вибірки A і B , при якому матриці X_A та X_B , які відповідають експлуатаційним спостереженням навчальної і перевірочної вибірок, при $\text{rank } X_A = \text{rank } X_B = m$ задовольняють умові квадратичної залежності

$$X_A^T X_A = \rho_B^2 X_B^T X_B, \rho_B^2 \neq 0. \quad (2.21)$$

Частковим випадком такого розподілу є лінійно залежний (ρ_B^2 – пропорційний) розподіл.

При цьому необхідно враховувати, що на кожному інтервалі експлуатації величини сумарних наробітків, сумарних пробігів та кількості увімкнень апаратури можуть істотно розрізнятися. Це, у свою чергу, приводить до різної точності отриманих оцінок показників безвідмовності обладнання ЗРМТ і порушенню однієї з основних передумов класичного лінійного регресійного аналізу про рівність дисперсій спостережень.

Тому розгляд результатів експлуатаційних спостережень за різні інтервали експлуатації як рівних з точки зору їх інформаційної цінності призведе до неточної побудови математичної моделі зміни технічного стану (рівня надійності) обладнання ЗРМТ і, як наслідок, до помилок при прогнозуванні значень показників надійності на майбутньому етапі експлуатації. У зв'язку з цим необхідно переходити до нових змінних, які задовольняють класичним припущенням [1, 2, 17, 25, 28]: $X_A^* = \Omega_A^{-1} X_A$, $X_B^* = \Omega_B^{-1} X_B$, де Ω_A , Ω_B – діагональні матриці, елементами головної діагоналі яких є дисперсії оцінок показників надійності (безвідмовності) обладнання ЗРМТ, які належать навчальній і перевіірчній вибіркам відповідно і обчислені безпосередньо за результатами експлуатації за відповідні інтервали експлуатації.

Тоді умова (2.21) приймає вид $X_A^T \Omega_A^{-1} X_A = \rho_B^2 X_B^T \Omega_B^{-1} X_B, \rho_B^2 \neq 0$.

Задача пошуку розподілу може бути записана наступним чином: з усієї множини можливих варіантів розподілу сукупності на вибірки X_{A_n} та X_{B_n} , необхідно обрати такий, що буде відповідати умові

$$\min_{n \in [1, N]} \min_{\rho_B^2 \neq 0} \|X_{A_n}^T \Omega_{A_n}^{-1} X_{A_n} - \rho_B^2 X_{B_n}^T \Omega_{B_n}^{-1} X_{B_n}\|^2 = \min_{n \in [1, N]} \min_{\rho_B^2 \neq 0} \|X_{A_n}^T X_{A_n}^* - \rho_B^2 X_{B_n}^T X_{B_n}^*\|^2, \quad (2.22)$$

де N – кількість можливих варіантів,

$\|\bullet\|$ – визначене матричне перетворення.

Застосування звичайних матричних перетворень ускладнене через те, що необхідно вибрати таке перетворення, яке б було незалежним від величини ρ_B^2 та враховувало симетричність матриць $X_{A_n}^T \Omega_{A_n}^{-I} X_{A_n}$ та $X_{B_n}^T \Omega_{B_n}^{-I} X_{B_n}$. З урахуванням (2.21) та (2.22) для вирішення задачі розподілу перспективним є застосування удосконаленого з [119] критерію: в якості найкращого розподілу слід вибрати такий, що буде відповідати умові

$$H = \arg \min_{n \in [1, N]} \frac{\rho_{max}^2 - \rho_{min}^2}{\rho_{max}^2 + \rho_{min}^2}, \quad (2.23)$$

де, відповідно ρ_{max}^2

$$\rho_{max}^2 = \max_{n \in [1, N]} \frac{X_{A_n}^T \Omega_{A_n}^{-I} X_{A_n}}{X_{B_n}^T \Omega_{B_n}^{-I} X_{B_n}} = \max_{n \in [1, N]} \frac{X_{A_n}^T X_{A_n}^*}{X_{B_n}^T X_{B_n}^*}, \quad (2.24)$$

та ρ_{min}^2

$$\rho_{min}^2 = \min_{n \in [1, N]} \frac{X_{A_n}^T \Omega_{A_n}^{-I} X_{A_n}}{X_{B_n}^T \Omega_{B_n}^{-I} X_{B_n}} = \min_{n \in [1, N]} \frac{X_{A_n}^T X_{A_n}^*}{X_{B_n}^T X_{B_n}^*}. \quad (2.25)$$

Розподіл експлуатаційних спостережень за цим критерієм дозволяє наблизитися до оптимального, який буде найкращим для прогнозування показників надійності (безвідмовності) обладнання ЗРМТ.

В подальшому цілеспрямований пошук оптимальної структури значно полегшується, якщо, по-перше, виходячи з фізичних міркувань, клас структур буде обмежений і, по-друге, будуть привернуті відповідні критерії відбору. В [44] приведено, що найкращі результати показали два перші критерії (2.4) та (2.5), наведені в підрозділі 2.3.1, та їх застосування

виявилось, в основному, достатньо для вирішення завдань. Особливо результативно використання цих критеріїв, перш за все у зв'язку з високим ступенем їх об'єктивності, показало при пошуку відповідності фізичного змісту досліджуваних процесів його математичному уявленню.

Критерій регулярності (2.4) дозволяє отримати найбільш регулярне рішення, тобто вирішення мінімальної за змістом складності, малочутливі до невеликих змін початкових даних. Моделі, знайдені за мінімумом критерію регулярності, при високому рівні шумів є недостатньо точним, оскільки при збільшенні перешкод мінімум критерію регулярності зміщується у бік вибору простіших моделей, а при великій інтенсивності шумів найбільш кращими виявляються лінійні прогнозуючі моделі.

Критерій мінімуму зсуву (або незміщеності) (2.5) компенсує названі недоліки критерію регулярності і дозволяє забезпечити значну відмінність моделей, що отримані при використанні різних частин таблиці початкових даних, що дозволяє говорити про зближення математичного уявлення фізичного змісту досліджуваних процесів зміни технічного стану обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом. У разі відсутності зсуву, моделі, що отримані на різних частинах таблиці, повинні співпадати. Даний критерій дозволяє вирішувати задачу зміни закону, прихованого в експериментальних даних, тому рекомендується при рішенні задачі ідентифікації.

Критерій регулярності для оцінки структури моделі може бути визначений [35] формулою

$$\Delta^2(B) = (Y_B^* - Y_B)^T (Y_B^* - Y_B), \quad (2.26)$$

де Y_B^* – вектор оцінок, отриманих методом найменших квадратів на Y_A і X_A , тобто з урахуванням виразів (2.28) ..(2.30)

$$Y_B^* = X_B^* (X_A^T X_A^*)^{-1} X_A^T Y_A = X_B^* \hat{\theta}_A. \quad (2.27)$$

Критерій мінімуму зсуву відображає вимогу, щоб кращі моделі, отримані на A і B , мінімально відрізнялися. Найпоширеніша форма цього критерію – мінімум незміщеності рішень

$$n_{cm}^2 = (Y_A^* - Y_B^{**})^T (Y_A^* - Y_B^{**}), \quad (2.28)$$

де

$$Y_{A,B}^{**} = X (X_{A,B}^T X_{A,B}^*)^{-1} X_{A,B}^T Y_{A,B}. \quad (2.29)$$

Критерії групи узгодженості є найбільш вагомими для вибору закономірностей, оскільки дозволяють обрати найменш суперечливі моделі. За наявності шуму в даних комп'ютер знаходить все більш прості структури оптимальних моделей.

Залежно від специфіки вирішуваного завдання з урахуванням глибини прогнозування і у разі недостатньої точності отриманої моделі можна ставити питання про розповсюдження пошуку в область структур вищого порядку. Проте при цьому немає підстав стверджувати, що буде знайдене краще рішення порівняно з отриманими, і що воно матиме вигляд, прийнятний для використання, тобто визнано раціональним. Тому на підставі викладеного можна зробити висновок про доцільність зосередження зусиль не на пошуку рішень в області складних нелінійних структур, а на дослідженні вирішення максимальної точності з числа найбільш простих оптимальних структур.

Рішення задачі вибору структури моделі зазвичай ускладнюється невеликим об'ємом інформації, яка міститься у матрицях X , Y . Тому для підвищення якості прогнозу та отримання обґрунтованого рішення щодо вигляду отриманої моделі виникає необхідність застосування модифікації критерію регулярності, або критерію здатності, що передбачає (2.14).

Для цього здійснюється розбиття вхідної та вихідної вибірок на три підвибірки на три непересічні підвибірки A , B , C , причому $A \cup B = W$, відповідно

$$X = \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_W \\ X_C \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} Y_A \\ Y_B \\ Y_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_W \\ Y_C \end{bmatrix}. \quad (2.30)$$

При реалізації прогнозів важливо встановити відповідність обраного критерію якості отриманих прогнозних результатів. В алгоритмі побудови математичної моделі процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ реалізований комбінований критерій відбору. Загальною складністю безпосереднього застосування комбінованих критеріїв є те, що максимальне значення одне з критеріїв часто виявляється на декілька порядків більше іншого.

У зв'язку з цим в алгоритмі МГУА у відповідності до принципу неостаточних рішень Д. Габора реалізується не двоохкритерійний (реалізований у вигляді суми критеріїв з ваговими коефіцієнтами), а послідовний відбір: на першому етапі спочатку вибираються F_1 найменш зміщених моделей за критерієм незміщеності, далі із них за критерієм регулярності $\Delta^2(B) - F < F_1$ найточніших моделей на перевіірочній послідовності, на другому етапі відбір F_2 найкращих – з метою підвищення перешкодостійкості та достовірності – як правило, із застосуванням інформації екзаменаційної вибірки C . Таке послідовне застосування критеріїв підвищує ефективність моделювання, зокрема перешкодостійкість. При цьому обходиться проблема нормування.

Таким чином, найбільш прийнятними для вирішення задачі побудови моделей процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ при ЕТС є поетапне застосування комбінованого критерію (послідовне

використання критеріїв “регулярність та незміщенність”) та критерію передбачувальної здатності, які достатньо апробовані при вирішенні завдань подібного класу та дозволяють успішно вирішувати завдання середньострокового прогнозування в заданих умовах [34, 36].

Вирішуючи задачу (2.3), на основі достовірних даних випробувань на надійність проводиться пошук математичної моделі вигляду $Y = f(x)$ і в подальшому проводиться оцінка залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ після досягнення ними мінімально допустимого рівня безвідмовності $Y \geq Y_{пред}$.

Процес побудови моделей припиняється при відшуканні моделі вигляду

$$\begin{cases} Y = f(x); \\ \sigma = \min; \\ Y \geq Y_{пред}; \end{cases} \quad (2.31)$$

де σ – середньоквадратична помилка.

Алгоритм моделювання процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ допрацьований в плані розподілу експлуатаційних спостережень на вибірки для побудови математичних моделей раціональної складності та вибору кращої прогнозуючої моделі за комбінованим критерієм, представлений на рис. 2.2.

Після проведення специфікації та оцінки параметрів розробленої математичної моделі, модель, вона може бути застосована для прогнозування безвідмовності обладнання ЗРМТ та моменту переходу їх у граничний стан. За допомогою процедури виконаний великий об'єм обчислювальних робіт. Початковою інформацією для вирішення поставлених завдань з'явилися результати проведених експериментів і статистична інформація у вигляді

вибірок початкових даних, які дозволили дослідити процес зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ і представити у формалізованому вигляді тенденцію зміни відповідних цьому процесу факторів.

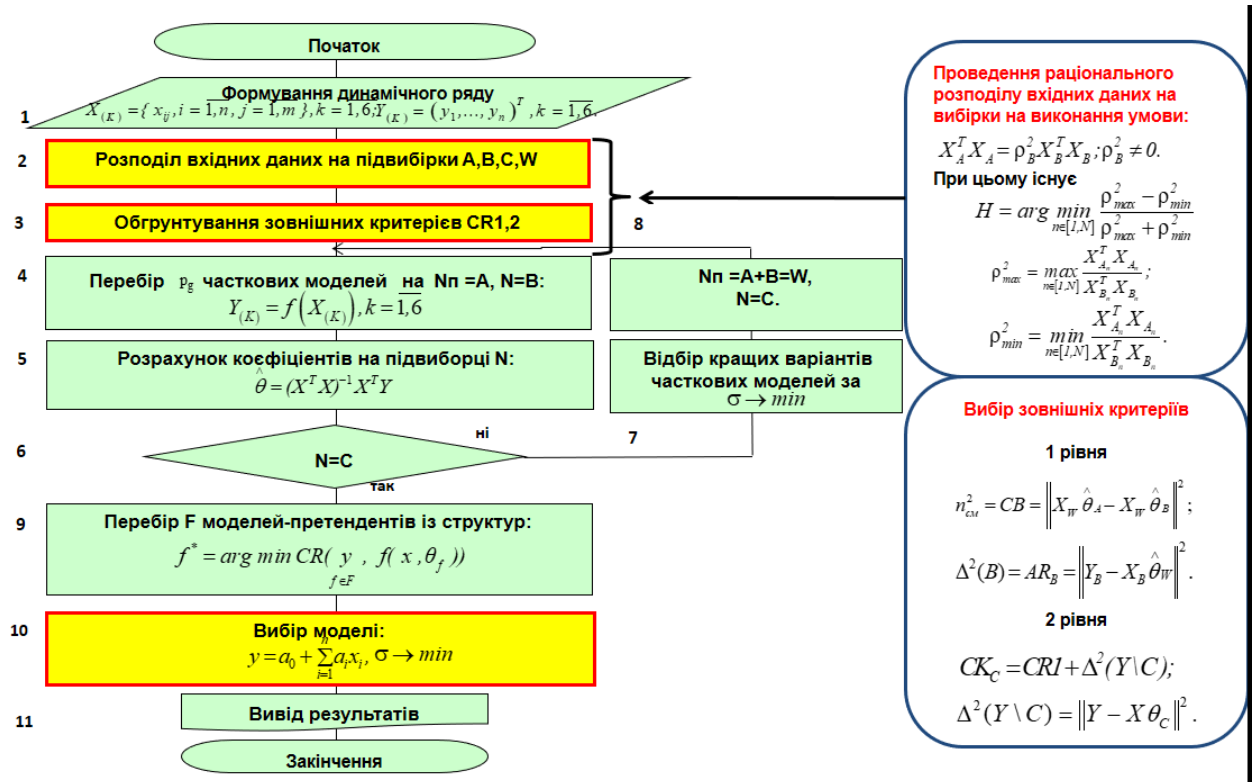


Рис. 2.2. Алгоритм моделювання процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ

Таким чином, запропонована процедура побудови математичної моделі процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ розширює відомі аналогічні процедури [20, 39, 44, 59, 68, 70, 108, 117], в якій, на відміну від інших враховано, що в якості вихідних даних для побудови моделей можуть використовуватися нерівноточні результати оцінювання показників безвідмовності за даними експлуатації, залежність дисперсії похибки прогнозу від способу розподілу експлуатаційних спостережень на вибірки, що дозволяє отримати достовірні оцінки показника

надійності в умовах обмеженої кількості даних експлуатаційних спостережень і відсутності контролю граничного стану.

Розглянемо основи перевірки адекватності моделей та оцінки якості прогнозу, які використовуються при моделюванні за експлуатаційними даними при використанні процедур МГУА.

2.3.4. Перевірка адекватності моделей та оцінка якості прогнозу. Питання перевірки адекватності моделей, що отримані в результаті рішення задачі (2.3), розглядається по-різному в умовах застосування того або іншого підходу, і в основному визначається типом критерію, використовуваного при порівнянні моделей. Проте при цьому приймаються два істотні допущення: що шум підкоряється нормальному розподілу (чого немає в нашій постановці завдання) і що структура розробленої моделі є незміщеною (а це по відношенню до оптимальних моделей виконується лише при достатньо великому числі точок вибірки початкових даних). Крім того, статистичні оцінки достовірності відносяться тільки до точок вибірки і не характеризують якість моделі поза цими точками – на інтервалі прогнозу.

Для порівняння і вибору моделей в МГУА застосовуються зовнішні критерії, засновані на розділенні вибірки на дві і більш за частини, причому оцінювання параметрів і перевірка якості моделей по цих критеріях виконується на різних підвибірках [36]. Це дозволяє обійтися без апріорних припущень про властивості шумів і рівні довіри (критерій Фішера) [33]

$$\Phi(S_f) = \frac{n-1}{n-S_f} \frac{RSS(S_f)}{\|y - \bar{y}\|^2} = \frac{n-1}{n-S_f} \frac{\|y - \bar{y}_f\|^2}{\|y - \bar{y}\|^2}, \quad (2.32)$$

а також без оцінок дисперсії шумів або функції розподілу (критерії Маллоуза, Акаїке) [3]

$$C_s = \frac{1}{\hat{\sigma}^2} \text{RSS}(S_f) + 2S_f - n, \quad (2.33)$$

де $\hat{\sigma}^2$ – оцінка невідомої дисперсії;

S_f – складність моделі f рівна числу ненульових компонент;

$$AIC(S_f) = -2 \ln \varphi(X, \theta_f) + 2 S_f, \quad (2.34)$$

де φ – значення функції правдоподібності.

При цьому в умовах порушення основних припущень, які відображені у вибірці даних, досягається їх автоматичний облік, за рахунок чого виходить ефект перешкодостійкого моделювання зважаючи на відбір моделі оптимальної складності (у сенсі обліку неповноти даних і наявності шумів у вибірці).

В рамках сучасного підходу, заснованого на критеріях з явним обмеженням складності, які-небудь спеціальні процедури перевірки якості отримуваних моделей не застосовуються. Це вважається виправданим, оскільки той або інший критерій (Акаїке, Баррона, Вапника, Маллоуза та ін.) є обґрунтованим в рамках прийнятих припущень, а якість моделі характеризується величиною самого критерію, мінімуму якого відповідає як найкраща модель. При цьому тільки в методі Вапника [15] само значення критерію є одночасно статистичною оцінкою середньої точності моделі в довільних крапках поза вибіркою. Проте в [3] указується про необхідність застосування в програмних засобах перевірки на незалежній вибірці для контролю прогнозуючих властивостей побудованих моделей.

Таким чином, окрім специфічних засобів, характерних для тих або інших методів, в рамках як класичного, так і сучасного підходів для перевірки прогнозуючих властивостей моделей активно застосовується прийом “перехресного підтвердження”, що зводиться до розбиття вибірки.

Саме на цьому прийомі принципово засновані методи МГУА [36]. Зокрема, у застосованих алгоритмах МГУА вибірка ділиться на три частини: на першій (навчальній) обчислюються параметри моделей, що генеруються, на другій (перевірочній) вони порівнюються за точністю з відбором однієї або декількох кращих, на третій, незалежній (екзаменаційній), перевіряється якість відібраних моделей в режимі прогнозування. Отже, отримана модель характеризується трьома значеннями помилок (на кожній з трьох частин вибірки), по яких можна зробити достатньо обґрунтований висновок про її якість: якщо всі вони близькі між собою, то модель не суперечлива (адекватна по структурі).

Завдання забезпечення адекватності моделей вирішується перш за все по відносних значеннях основного критерію і помилки прогнозування (екстраполяції) на екзаменаційній частині вибірки C [35]. Для стандартизації запису формул введемо наступні позначення: оцінка параметрів по МНК на деякій підвибірці G дорівнює

$$\hat{\theta}_G = (X_G^T X_G)^{-1} X_G^T Y_G, \quad G = A, B, W, \quad (2.35)$$

а значення помилки на деякій підвибірці Q по моделі, оцінки параметрів якої розраховані на G , дорівнює:

$$\Delta(Q \setminus G) = \left\| Y_Q - X_Q \hat{\theta}_G \right\|^2, \quad Q = A, B, W, C \quad (2.36)$$

При цьому розбиття вхідної та вихідної вибірок на три підвибірки здійснюється відповідно (2.30).

З урахуванням (2.35-2.36), всі критерії і показники точності відібраних моделей приводяться до безрозмірного вигляду за допомогою обчислення нормуючих дільників вигляду

$$\overline{y_{Qi}} = \frac{1}{NQ} \sum_{i=1}^{NQ} y_{Qi}, \quad (2.37)$$

де $\overline{y_Q} = \{\overline{y_{Qi}}\}$ – середнє значення вектору y_Q на підвибірці Q довжиною NQ , причому Q відповідає підвибірці, де обчислюється відповідний показник якості.

Ступінь адекватності моделі залежить від величини відносного значення критерію селекції.

Наприклад, відносне значення критерію першого рівня CrI_Q має вигляд

$$\overline{CrI_Q} = \sqrt{\frac{CrI_Q}{\delta_Q}}. \quad (2.38)$$

Обчислюються також відносні середньоквадратичні помилки на підвибірці W

$$\overline{RSS_W} = \sqrt{\frac{RSS_W}{\delta_W}}, \quad (2.39)$$

і відносний критерій регулярності на підвибірці C

$$\overline{\Delta^2(Q \setminus C)} = \overline{AR_C} = \sqrt{\frac{AR_C}{\delta_C}}. \quad (2.40)$$

Якість моделі в алгоритмах МГУА оцінюється по значеннях величин (2.38-2.40). Модель при цьому неадекватна досліджуваному процесу у явному вигляді, якщо хоч би одна з величин більше 0,8 [35].

Крім того, оцінка адекватності моделі досліджуваному процесу проводиться за допомогою критерію здатності, що передбачає $\Delta^2(Y \setminus C$

(підрозділ 2.3.3). В результаті, зі всієї множини моделей вибирається та, яка має кращі прогнозуючі властивості.

При реалізації прогнозів необхідно також встановлювати відповідність критеріїв, які застосовуються в якості отриманих результатів прогнозування. В [34, 118] наведена послідовність критеріїв прогнозу, які застосовуються в залежності від глибини прогнозування. Так, для процедури короткострокового прогнозування в якості критерію селекції математичних моделей використовується критерій регулярності – значення середньоквадратичної помилки, отриманої на точках перевірконої послідовності, яка не використовується для розрахунку оцінок коефіцієнтів. Для середньострокових прогнозів пропонується використовувати критерій незміщеності, як найбільш ефективний, який реалізований в комбінованому критерії в алгоритмі оцінки зміни технічного стану (рівня надійності) обладнання ЗРМТ.

Таким чином, за результатами загальних методичних підходів визначено, що критерії, які застосовуються, відповідають періоду випередження прогнозу задачі, що вирішується. В якості інтервальної оцінки точності прогнозу виступає похибка математичної моделі, отримана на екзаменаційної послідовності. Наведена процедура не дає підставу вважати, що інтервальна оцінка точності в подальшому буде більшою або меншою (у порівнянні з отриманою) для будь-якого періоду упередження прогнозу та, відповідно, можливо вважати таку оцінку постійною для всього періоду прогнозування.

При цьому, розглядаючи процедуру МГУА, існує спосіб оцінки якості прогнозу в цілому [34, 44], який дозволяє отримати показник якості прогнозу за допомогою виразу

$$RR = \frac{\sum_{i=NC}^N (y_i - y_i^*)^2}{\sum_{i=NC}^N (y_i - y_E)^2}, \quad (2.41)$$

де y_i – реальні значення функції на екзаменаційній послідовності довжиною NC , тобто від $N - (NA + NB)$ до N ;

y_i^* – значення функції, що прогнозуються, та визначені за допомогою математичної моделі на екзаменаційній послідовності ;

y_E – середнє значення функції на екзаменаційній послідовності.

Вирази для визначення y_i^* мають вигляд

$$y_i^* = a_0 + a_1 x_{1(NC)} + \dots + a_m x_{m(N-NC)}, \quad (2.42)$$

де m – номер змінної математичної моделі;

$$y_E = \frac{\sum_{i=NC}^N y_i}{N - NC}. \quad (2.43)$$

Ступінь якості прогнозу вважається високим, у якій значення RR менше 0,5 [34]. Відмінністю приведенного показника якості прогнозу (2.41) є оперування зовнішньою інформацією по відношенню до даних, використовуваним при отриманні математичної моделі.

Таким чином, реалізація достовірних прогнозів досягається сукупністю методичних підходів до забезпечення адекватності моделей і оцінки якості прогнозу (підрозділ 2.3.4).

Висновки до розділу 2

1. Наведені основні положення і допущення, які приймаються під час розробки методу прогнозування довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів).

2. Проведено теоретичне обґрунтування можливості застосування МГУА для вирішення завдання оцінки технічної справності обладнання

ЗРМТ шляхом дослідження процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) його комплектуючих. На його основі сформована процедура побудови математичних моделей, що описують процес зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ з урахуванням прямого впливу визначених експлуатаційних факторів (тривалість експлуатації, сумарний наробіток, сумарна кількість увімкнень).

3. Запропонована процедура побудови математичної моделі процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) під час експлуатації обладнання ЗРМТ розширює відомі аналогічні процедури, в якій, та на відміну від них:

передбачено врахування нерівноточних результатів оцінювання показника безвідмовності в якості вихідних даних для побудови моделей за результатами експлуатаційних спостережень;

передбачено врахування залежності дисперсії похибки прогнозу від способу розподілу експлуатаційних спостережень на вибірки, що дозволяє отримати достовірні оцінки показника безвідмовності в умовах обмеженої кількості даних експлуатаційних спостережень;

запропоновано побудову множинної регресійної моделі, що описує залежність зміни рівня безвідмовності від сукупності параметрів, які характеризують режими експлуатації об'єктів, з поетапним застосуванням комбінованого критерію та критерію здатності, що передбачає, які достатньо апробовані при вирішенні задач подібного класу, та забезпечують вирішення задачі середньострокового прогнозування.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ЗРМТ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ

Нижче, відповідно до викладеними в розділі 2 основними положеннями і допущеннями, які приймаються під час удосконалення методу прогнозування довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів), процедури побудови математичних моделей процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) під час експлуатації засобів раціональної складності за результатами експлуатаційних спостережень при використанні нерівноточних результатів оцінювання показників безвідмовності з урахуванням запропонованого способу розподілу експлуатаційних спостережень на вибірки удосконалюється метод прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ з використанням результатів експлуатаційних спостережень.

Далі, на підставі викладених у дисертації основних положень і допущень, у тому числі з урахуванням удосконаленого методу прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ з використанням результатів експлуатаційних спостережень удосконалюється метод оцінки показників довговічності комплексів обладнання при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів).

Основні наукові результати, викладені в розділі, опубліковані в [22,113,114].

3.1. Метод прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ з використанням результатів експлуатаційних спостережень

Метод, що пропонується нижче, заснована на розглянутих існуючих науково-методичних підходах до прогнозування технічного стану (підрозділ 1.3), математичних моделях процесу зміни технічного стану (рівня надійності) обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом (підрозділ 2.3).

Вихідні дані. Для застосування методики передбачаються відомими: номенклатура контрольованих показників надійності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом та їх гранично допустимі значення, сукупність факторів, що впливають на зміну технічного стану та показники надійності (безвідмовності та довговічності) обладнання при експлуатації за технічним станом, уточнені допустимі значення показників надійності (безвідмовності), які визначені до відповідних комплексів обладнання ЗРМТ під час переведення на експлуатацію за технічним станом.

Область застосування методу. Метод призначене для оцінки показників залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом з метою ухвалення рішень про доцільність їх подальшої експлуатації з продовженням призначеного терміну служби (ресурсу) або про припинення експлуатації і доцільності проведення ремонту визначеного виду. Побудовані в рамках методу залежності зміни показника безвідмовності T_0 обладнання ЗРМТ в процесі експлуатації використовуються при прогнозуванні значень відповідних показників на майбутньому етапі експлуатації (рис.3.1). Даний метод використовується в якості часткового у складі методу прогнозування довговічності ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів).

Етапи методу. В запропонованому удосконаленому методі

прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом можна виділити основні етапи (див. рис. 3.1).

1. Аналіз вихідних даних про результати експлуатації обладнання ЗРМТ, режими і умови експлуатації, номенклатуру і вимоги до величини нормованих показників надійності, сукупності факторів, що впливають на зміну технічного стану, показників надійності (безвідмовності та довговічності) обладнання при експлуатації за технічним станом, уточнених показників надійності (безвідмовності), які визначені до обладнання ЗРМТ під час переведення на ЕТС. Обчислення сукупності оцінок величин нормованих показників надійності, відповідних результатам експлуатаційних спостережень за інтервали визначеної тривалості (блоки 1–3).

2. Побудова математичних моделей процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ при ЕТС (блоки 4–10).

2.1. Вибір алгоритму моделювання процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ при ЕТС, визначення класу математичних моделей (блок 4);

2.2. Формування блоку опорних функцій, застосування наведеного способу розподілу експлуатаційних спостережень на вибірки для побудови математичної моделі оптимальної складності (врахування нерівноточних результатів оцінювання показників безвідмовності за даними експлуатації при експлуатації комплексів обладнання ЗРМТ, що розглядаються та залежності дисперсії похибки прогнозу від способу розподілу експлуатаційних спостережень на вибірки) (блок 5);

2.3. Обґрунтування зовнішніх критеріїв відбору математичної моделі процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ при ЕТС (застосування комбінованого критерію та критерію здатності, що передбачає) (блок 6);

2.4. Генерація та перебір структур часткових математичних моделей процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ при

ЕТС (блок 7);

2.5. Селекція розроблених математичних моделей процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ при ЕТС (блок 8);

2.6. Перевірка адекватності моделі та, при необхідності, розширення робочого базису (формування додаткових аргументів) (блоки 9–10);

2.7. Ухвалення рішення про використання відібраної математичної моделі для подальшого прогнозування (блок 9);

3. Прогнозування значень показників безвідмовності обладнання ЗРМТ при ЕТС на майбутній інтервал їх експлуатації (блок 11).

4. Оцінка якості прогнозу відібраних моделей (блок 12).

5. Відбір інших зовнішніх критеріїв для математичної моделі процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ при ЕТС (перехід до блоку 6) (блок 13).

6. Обчислення прогнозованих оцінок показників довговічності (залишкового терміну служби (ресурсу)) обладнання ЗРМТ при ЕТС (блок 14).

7. Обробка отриманих результатів прогнозування довговічності (залишкового терміну служби (ресурсу)) обладнання ЗРМТ при ЕТС (блок 15).

Пояснимо окремі положення методики.

Зміст робіт, які проводяться на 1 – 3 етапах, розглянутий в підрозділі 1.1, 1.2, 2.3. Теоретичні положення щодо вирішення завдання оцінки довговічності обладнання ЗРМТ за допомогою МГУА наведені в підрозділі 2.2. Нижче розглянемо практичну реалізацію етапу 2, та зміст етапів 3 – 6.

З використанням методичного апарату, викладеного в підрозділі 2.3, відкривається можливість, по-перше, опису в динаміці об'єктивних зв'язків між технічним станом (рівнем безвідмовності) з одного боку і факторами впливу з іншого, по-друге, накладенням обмежень за мінімально допустимим рівнем надійності на розвиток процесу, отримати рішення щодо оцінки рівня безвідмовності та довговічності.

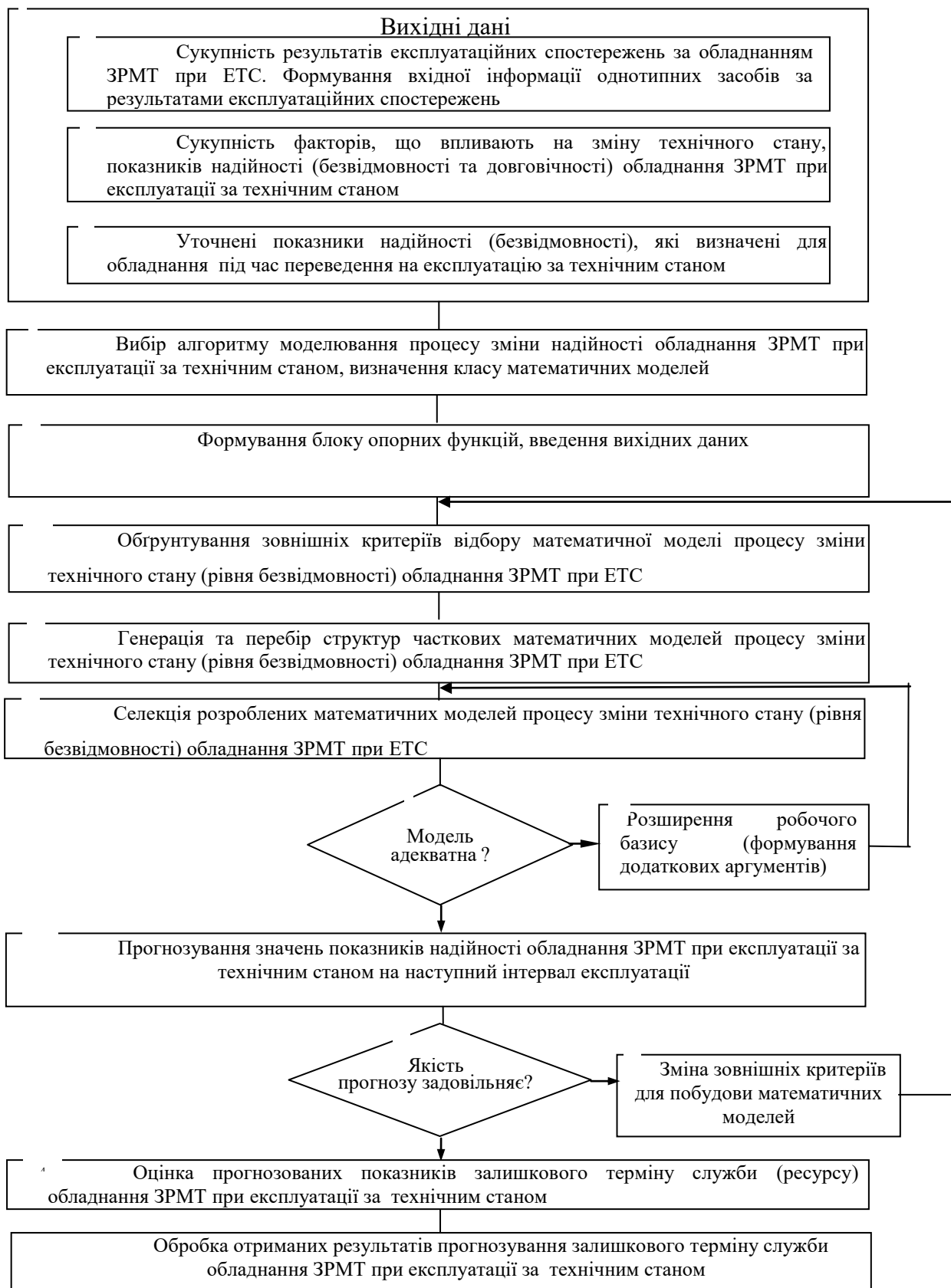


Рис. 3.1. Блок-схема методу прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом

Пошук математичних моделей, що представляють закономірності протікання процесів, здійснювався за єдиною схемою, спільність якої була викликана прагненням отримати адекватні для кожного окремого обладнання ЗРМТ, максимально точні і найбільш прості, прийнятні для практичних розрахунків залежності.

З метою порівняння структури та складності моделей побудова математичних моделей процесу зміни технічного стану (рівня надійності) обладнання ЗРМТ здійснювалася з використанням комбінаторного і багаторядного алгоритмів МГУА.

Рішення задачі здійснювалося шляхом отримання залежностей, що мають вигляд, який найбільш відповідає

$$Y = f(x), \quad (3.1)$$

де Y – вихідна змінна – визначальний показник надійності (середній наробіток на відмову);

x – вхідна змінна – експлуатаційні фактори, що впливають на процес зміни технічного стану (рівня безвідмовності) засобів обладнання ЗРМТ.

При цьому комбінаторний алгоритм реалізував процедуру побудови моделей залежності вихідний змінної від M вхідних змінних за даними спостережень в N точках в класі поліноміальних базисних функцій, лінійних за параметрами, методом повного перебору часткових моделей. Моделі будуються для вихідної величини на основі початкової інформації у вигляді матриці вхідних аргументів X розмірності $N \times M$ і розрахованого вихідного вектору функції Y розмірності $N \times 1$.

Процес рішення включає перетворення даних до одного з можливих варіантів полінома від початкових аргументів

(3.2)

$$y_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^M \alpha_j x_{ij}, \quad i = \overline{1, N},$$

з подальшим обчисленням оцінок параметрів та відбором $F1$ кращих структур за критерієм першого рівня, перерахунок коефіцієнтів і відбір $F2$ кращих моделей за критерієм другого рівня.

Всі початкові дані результатів експлуатаційних спостережень в алгоритмі розділені на три підвибірki A, B, C (навчальну, перевірочну і екзаменаційну послідовності) довжини NA, NB і NC точок. При цьому розподіл експлуатаційних спостережень за критерієм (2.23) дозволяє наблизитися до раціонального, який буде найкращим для прогнозування показників надійності (безвідмовності) засобів обладнання ЗРМТ.

На першому рівні використовувалися послідовно зовнішні критерії: регулярності (2.4) або (3.3):

$$\Delta^2(B) = AR_B = \left\| Y_B - X_B \hat{\theta}_W \right\|^2, \quad (3.3)$$

незміщенності (мінімуму зсуву) (2.5) або (3.4):

$$n_{cm}^2 = CB = \left\| X_W \hat{\theta}_A - X_W \hat{\theta}_B \right\|^2. \quad (3.4)$$

На другому рівні оцінки параметрів всіх відібраних структур обчислюються знов, але вже на підвибірці $W = A \cup B$, і вибирається $F2 \leq F1$ моделей, кращих за критерієм другого рівня.

В якості критерію другого рівня використовувався критерій, комбінований на C

$$CK_C = CR1 + \Delta^2(Y \setminus C), \quad (3.5)$$

де $\Delta^2(Y \setminus C)$ – значення критерію передбачуваної здатності (2.7)

$$\Delta^2(Y \setminus C) = \|Y_C - X_C \theta_w\|^2. \quad (3.6)$$

Алгоритм багаторядності реалізував ітераційну процедуру селекційного типу. На першому ряду отримані часткові моделі виду

$$y^1 = \alpha_0 + \alpha_1 x_j + \alpha_2 x_{j+1} + \alpha_3 x_j x_{j+1} + \alpha_4 x_j^2 + \alpha_5 x_{j+1}^2, \quad (3.7)$$

де $j+1, j = \overline{1, m}$;

m – число початкових аргументів;

x_j, x_{j+1} – робочі аргументи.

З моделей (3.7) відбиралися кращі, які задовольняють зовнішньому критерію селекції і заданому значенню свободи вибору. На другому і подальших рядах отримані часткові моделі виду

$$y^s = \alpha_0 + \alpha_1 y^{s-1} + \alpha_2 z_l^s + \alpha_3 y^{s-1} z_l^s + \alpha_4 (y^{s-1})^2 + \alpha_5 (z_l^s)^2, l = \overline{1, F}, \quad (3.8)$$

де s – номер поточного ряду;

y – k -а проміжна модель, відображена на $(s-1)$ -му ряду;

$$z_l^s = y^{s-1}, \forall l < k;$$

$$z_l^s = x_j, \forall l \geq k.$$

Процес нарощування складності моделі припинявся, коли починало збільшуватися значення критерію.

У алгоритмі використовувався комбінований критерій відбору

$$CK = AR_B + CB = \Delta^2(B) + n_{cm}^2, \quad (3.9)$$

Для кожної моделі підбиралася структура часткового опису, що доставляє мінімум критерію. Це означає, що в конкретний частковий опис не обов'язково входять всі доданки часткової моделі.

Вибір F проміжних моделей s -го ряду проводився за правилом

$$y^s = y_{j^*}^{s-1}; \quad j^* = \arg \min_j CR^s, \quad (3.10)$$

тобто для кожного x підбирався якнайкращий ансамбль аргументів при поступовому його ускладненні.

У кожному ряду вибиралося мінімальне значення критерію і процес нарощування складності припинявся, якщо $CR^{s-1} < CR^s$. Краща модель вибиралася з $(s-1)$ -го ряду.

В питаннях дослідження процесу зміни рівня довговічності обладнання ЗРМТ і побудови прогнозуючих моделей важливим моментом є побудова динамічних моделей, оскільки статичні моделі вигляду $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ придатні для розбиття вибірки початкових даних на відповідні послідовності і визначення величини прогнозованої ретроспекції.

Для вирішення поставленого завдання здійснена процедура побудови динамічних моделей, які дозволяють математично описати динаміку процесу і врахувати взаємні зв'язки факторів, а також фактори, що бракують, які впливають на процес зміни технічного стану (рівня безвідмовності).

Важливим моментом моделювання динаміки процесу є розділення змінних на координати стану та на зовнішні збурюючі і регулюючі впливи. В наведених моделях координатами станів служать значення змінної T_0 – показника безвідмовності “середній наробіток на відмову” обладнання ЗРМТ.

Зовнішніми впливами є: x_1 – тривалість експлуатації (T_e), вимірювана в роках, крок дискретизації часу $t = 1$ квартал; x_2 – сумарний наробіток апаратури обладнання ЗРМТ (T); x_3 – сумарна кількість увімкнень обладнання (N).

В окремих випадках рівняння для моделі процесу зміни рівня надійності обладнання ЗРМТ, що розглядається, для вказаної множини змінних приймали вигляд

$$y = \psi(y_{-\tau}) + f(x_m), \quad (3.11)$$

де $\psi(y_{-\tau})$ – функція станів;

$f(x_m)$ – функція збурюючих дій;

$-\tau$ – індекс, що вказує на запізнення, з яким вимірюються вихідні змінні.

При цьому число запізнювань, що враховуються, оптимізується за допомогою послідовного порівняння ряду варіантів. Під час пошуку математичних моделей та після проведення аналізу вибірки початкових даних, з врахуванням числа тактів ретроспекції, яке забезпечує найбільш глибокий мінімум критерію селекції рівнянь [36, 117], встановлено, що найбільш прийнятним є використання числа запізнювань, рівного двом. Стосовно вирішуваного завдання рівняння (3.11) прийме вигляд:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6), \quad (3.12)$$

де $x_5 = y-1$;

$x_6 = y-2$.

Найбільш узагальнені математичні моделі, що описують процес зміни технічного стану (рівня надійності) обладнання ЗРМТ i -го типу та представляють всю спостережувану кількість виробів мають вигляд:

за комбінаторним алгоритмом:

$$T_0(t) = T_{0C} (0_i + 1_i x_{1i} + 2_i x_{2i} + 3_i x_{3i} + 4_i x_{4i}), \quad (3.13)$$

або в окремих випадках:

$$T_0(t) = T_{0C} (0_i + 1_i x_{1i} + 2_i x_{2i} + 3_i x_{3i} + 4_i x_{4i} + 5_i x_{5i} + 6_i x_{6i}), \quad (3.14)$$

за багаторядним алгоритмом:

$$T_0(t) = T_{0C} (0_i + 1_i x_{1i} + 2_i x_{2i} + \dots + 4_i x_{4i} + 1_i x_{1i} x_{2i} + \dots + 3_i x_{1i} x_{4i} + 4_i x_{1i} x_{3i} + \dots + 10_i x_{2i} x_{4i} + 11_i x_{4i} x_{3i} + \dots + 12_i x_{1i}^2 + \dots + 15_i x_{4i}^2), \quad (3.15)$$

або в окремих випадках:

$$T_0(t) = T_{0C} (0_i + 1_i x_{1i} + 2_i x_{2i} + \dots + 6_i x_{6i} + 1_i x_{1i} x_{2i} + \dots + 11_i x_{1i} x_{6i} + 12_i x_{1i} x_{3i} + \dots + 15_i x_{2i} x_{6i} + 16_i x_{4i} x_{3i} + \dots + 19_i x_{4i} x_{5i} + \dots + 21_i x_{5i} x_{6i} + 22_i x_{1i}^2 + \dots + 27_i x_{6i}^2), \quad (3.16)$$

де $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ та відповідає виробам 1, 2 та 3(1-4);

$$T_{0C} = \text{const} = 1 \text{ година.}$$

Математичні моделі процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) виробів 1, 2, 3(1-4), отримані за результатами експлуатаційних спостережень за комбінаторним алгоритмом мають вигляд

$$\begin{cases} T_{01}(t) = T_{0C1} (2,0086 * 10^{-7} x_{11} + 9,7832 * 10^{-4} x_{21} - 0,0008 * 10^{-6} \\ - 3,4237 * 10^{-3} x_{41} + 8,7358 * 10^{-1} x_{51} - 0,0028 * 10^{-7} x_{61}); \\ \sigma = 0,35741. \end{cases} \quad (3.17)$$

$$\begin{cases} T_{02}(t) = T_{0C2} (-1,0743 * 10^1 x_{12} + 1,0757 * 10^{-1} x_{22} - 1,0084 * 10^{-6} \\ + 3,4449 * 10^{-2} x_{42}); \\ \sigma = 0,11840. \end{cases} \quad (3.18)$$

$$\begin{cases} T_{03}(t) = T_{0C3} (5,6569 * 10^{-2} + 4,1275 x_{13} + 1,5494 * 10^{-2} x_{23} \\ - 2,1543 * 10^{-1} x_{33} + 0,0014 * 10^{-6} x_{43}); \\ \sigma = 0,34512. \end{cases} \quad (3.19)$$

$$\begin{cases} T_{04}(t) = T_{0C4} (2,8967 * 10^2 - 2,5584 * 10^1 x_{14} - 7,2340 * 10^{-3} x_{34} + 8,6320 * 10^{-2} x_{34} - 0,1012 * 10^{-6} x_{44}); \\ \sigma = 0,13310. \end{cases} \quad (3.20)$$

$$\begin{cases} T_{05}(t) = T_{0C5} (-2,4411 * 10^1 x_{15} + 1,8122 * 10^{-2} x_{25} + 1,8144 * 10^{-1} x_{45}); \\ \sigma = 0,14821. \end{cases} \quad (3.21)$$

$$\begin{cases} T_{06}(t) = T_{0C6} (4,3201 * 10^2 - 0,0132 * 10^{-8} x_{16} - 1,8576 * 10^{-2} x_{36} - 2,2774 * 10^{-1} x_{36} + 4,4269 * 10^{-2} x_{46}); \\ \sigma = 0,47852. \end{cases} \quad (3.22)$$

Виявлені закономірності (3.17 – 3.22) процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом є основою для подальшого дослідження довговічності.

Відповідно математичні моделі для виробів 1, 2, 3(1–4) за багаторядним алгоритмом мають вигляд

$$\begin{cases} T_{01}(t) = T_{0C1} (-3,302 + 1,0786 y_3(5) + 4,9893 * 10^{-4} x_{21}); \\ y_3(5) = -2,1266 * 10^{-2} + 4,8607 * 10^{-1} y_2(5) + 5,1504 * 10^{-1} y_2(6); \\ y_2(5) = 1,1005 * 10^{-3} + 4,6452 * 10^{-2} y_1(5) + 9,5349 * 10^{-1} y_1(1); \\ y_2(6) = -3,2336 * 10^1 + 2,3106 * 10^{-3} y_1(6) + 9,9525 * 10^{-2} x_{41} - 3,1947 * 10^{-3} y_1(1); \\ y_1(1) = -7,8471 * 10^1 + 3,4721 x_{12} + 1,0495 * 10^1 x_{61} - 3,6219 * 10^{-1} x_{11} x_{61} - \\ - 6,8977 * 10^{-2} x_{61}^2; \\ y_1(5) = 2,3950 * 10^1 + 8,4379 * 10^{-2} x_{51} - 1,2290 * 10^{-3} x_{31} - 1,7237 * 10^{-4} x_{51} x_{31}; \\ y_1(6) = 2,7234 * 10^1 - 6,1038 * 10^{-2} x_{61} + 1,8823 * 10^{-3} x_{41} - 1,1893 * 10^{-3} x_{61} x_{41}; \\ \sigma = 0,33159. \end{cases} \quad (3.23)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
T_{02}(t) = T_{0C2} (8,9959 + 1,8396y_3(2) + 6,4489 * 10^{-3}x_{32}); \\
y_3(2) = 4,3186 * 10^{-5} - 2,4679 * 10^{-1}y_2(2) + 1,2467y_2(1); \\
y_2(1) = 1,0876 * 10^{-2} + 3,8485 * 10^{-2}y_1(1) + 8,8069 * 10^{-1}y_1(2) + \\
+ 9,8168 * 10^{-2}y_1(1)y_1(2); \\
y_1(1) = 5,2938 - 1,5181 * 10^{-1}x_{12} - 6,0984 * 10^{-4}x_{32}; \\
y_1(2) = 1,3828 * 10^3 - 1,1407x_{22} + 8,7423 * 10^{-2}x_{42} - 3,6194 * 10^{-5}x_{22} \cdot \\
+ 2,3535 * 10^{-4}x_{22}^2; \\
\sigma = 0,11868.
\end{array} \right. \quad (3.24)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
T_{03}(t) = T_{0C3} (3,8856 * 10^2 - 1,2431 * 10^{-1}x_{33} - 0,0132 * 10^{-6} \cdot \\
+ 1,5610 * 10^{-2}x_{23} + 0,0411 * 10^{-7}x_{43}); \\
\sigma = 0,32809.
\end{array} \right. \quad (3.25)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
T_{04}(t) = T_{0C4} (2,5303 * 10^1 + 1,3034y_3(4) + 7,1087y_3(4)y_3(2) \\
y_3(2) = -4,7429 * 10^{-5} + 3,5401 * 10^{-3}y_2(2) + 9,9659 * 10^{-1}y_2 \\
y_3(4) = -1,4135 * 10^{-6} + 9,8485 * 10^{-1}y_2(4) + 1,5156 * 10^{-2}y_1(4) \\
y_2(1) = 2,8853 * 10^{-3} + 1,6250y_1(1) - 6,2506 * 10^{-1}y_1(3); \\
y_2(3) = -1,6520 * 10^{-3} + 9,0007 * 10^{-1}y_1(3) + 1,0458 * 10^{-1}y_1(4) \\
y_2(4) = -1,5984 * 10^{-3} + 7,0876 * 10^{-2}y_1(4) + 9,3362 * 10^{-1}y_1(3) \\
y_1(1) = 1,0061 * 10^2 - 4,6308 * 10^{-1}x_{14} + 1,7381 * 10^{-3}x_{44}; \\
y_1(2) = 8,5486 * 10^{-1} - 9,4394 * 10^{-4}x_{24} - 4,0678 * 10^{-4}x_{44}; \\
y_1(3) = 6,0687 - 1,7398 * 10^{-3}x_{34} + 1,7729 * 10^{-3}x_{44}; \\
y_1(4) = 7,5240 * 10^{-1} - 1,3563 * 10^{-3}x_{44} + 5,6155 * 10^{-7}x_{44}^2; \\
\sigma = 0,12382.
\end{array} \right. \quad (3.26)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{05}(t) = T_{0C5} (2,2698 * 10^1 + 2,0402 * 10^1 y_3(2) + 1,6375 * 10^{-6} x_4 \\ y_3(2) = 5,8229 * 10^{-5} + 9,9992 * 10^{-1} y_2(2) - 6,3794 * 10^{-8} x_{35}; \\ y_2(2) = -1,1039 * 10^{-2} + 1,0142 y_1(2) + 1,2186 * 10^{-4} x_{25}; \\ y_1(2) = 7,9082 * 10^{-1} - 7,9221 * 10^{-4} x_{25} - 2,2365 * 10^{-7} x_{15} x_{25}; \\ \sigma = 0,15328. \end{array} \right. \quad (3.27)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{06}(t) = T_{0C6} (2,7973 * 10^1 - 1,5994 * 10^1 y_3(1) + 3,2602 * 10^1 y_3(2) - \\ - 1,4708 * 10^2 y_3(1) y_3(2) + 1,4472 * 10^2 y_3^2(1)); \\ y_3(1) = -3,1093 * 10^{-4} + 4,3191 * 10^{-1} y_2(1) + 5,6898 * 10^{-1} y_2(2) \\ y_3(2) = 2,6237 * 10^{-2} + 9,6582 * 10^{-1} y_2(2) - 3,9411 * 10^{-5} x_{26}; \\ y_2(1) = 2,7524 * 10^{-3} + 9,2295 * 10^{-1} y_1(1) + 5,3998 * 10^{-2} y_1(4) \\ - 1,2775 * 10^1 y_1(1) y_1(4) + 6,3222 y_1^2(2) + 6,9598 y_1^2(4); \\ y_2(2) = -1,9114 * 10^{-3} + 8,3771 * 10^{-1} y_1(2) + 1,6115 * 10^{-1} y_1(4) \\ - 1,4182 * 10^1 y_1(2) y_1(4) + 7,1358 y_1^2(2) + 6,9598 y_1^2(4); \\ y_1(1) = 9,9835 * 10^1 - 9,1297 x_{16} + 2,4238 * 10^{-2} x_{26} - \\ - 1,0824 * 10^{-3} x_{16} x_{26} + 2,0915 * 10^{-1} x_{16}^2; \\ y_1(2) = 4,6220 * 10^2 + 3,0269 * 10^{-2} x_{26} - 5,1680 * 10^{-1} x_{36} - \\ - 1,6194 * 10^{-5} x_{26} x_{36} - 1,3021 * 10^{-6} x_{26}^2 + 1,4384 * 10^{-4} x_{36}^2; \\ y_1(4) = 8,2936 * 10^{-1} + 4,2835 * 10^{-5} x_{46} - 1,9816 * 10^{-3} x_{26} + \\ + 1,0912 * 10^{-6} x_{26} x_{46}; \\ \sigma = 0,47275. \end{array} \right. \quad (3.28)$$

Розрахунки показали, що моделі, отримані за обома алгоритмами, практично однаковим чином описують процес зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ і мають майже рівну точність, на що вказують значення середньоквадратичним відхиленням моделей.

На підставі порівняння побудованих моделей можна зробити висновок, що для подальших розрахунків переважно застосування моделей, отриманих за комбінаторним алгоритмом, оскільки вони дозволяють уникнути переускладнення і відповідають принципу “леза Оккама”, що дуже широко

використовується в теорії самоорганізації (з множені моделей, що описують процес, вибирається найбільш проста) [10].

Відмітимо, що модель, отримана за комбінаторним алгоритмом, лінійна і описує нелінійний процес.

Прогнозування процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом на майбутньому інтервалі експлуатації здійснюється методом екстраполяції побудованих залежностей показника безвідмовності “середній наробіток на відмову” в межах інтервалу попередження [36]. При цьому передбачається, що фактичні умови і режими експлуатації обладнання ЗРМТ на інтервалі попередження не відрізнятимуться від тих, які спостерігалися впродовж інтервалу спостереження [44, 118]. Тривалість інтервалу попередження в загальному випадку визначається вимогами до точності прогнозу, яка кількісно визначається шириною довірчих інтервалів регресії, що характеризують можливу помилку прогнозу, і для обладнання ЗРМТ складає, як правило, від 1 до 5 років.

Завдання оцінки показників довговічності (залишкового терміну служби (ресурсу)) обладнання ЗРМТ вирішується з використанням методу зворотного прогнозування, тобто визначаються моменти виходу прогнозованого значення відповідного показника безвідмовності “середній наробіток на відмову” за його гранично допустимий рівень. Для цього величина прогностичної оцінки показника безвідмовності обладнання ЗРМТ порівнюється надалі з гранично допустимим значенням $T_{0\text{дон}}$ (визначеного відповідно для кожного окремого обладнання ЗРМТ) для прийняття рішення про прогнозований момент переходу відповідних обладнання ЗРМТ в граничний стан.

Величина середнього залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ за технічним критерієм розраховується за результатами рішення нерівностей, кожне з яких співвідносить побудовану раніше математичну модель зміни показника безвідмовності з його гранично

допустимим значенням, тоді з урахуванням (2.18) ці вирази в матричному вигляді записуються наступним чином

$$T_{0\text{ доп}} \leq \theta X. \quad (3.29)$$

Далі, по відомій матриці θ розраховуються значення параметрів T_e, T , N , що відповідають прогнозованому моменту переходу в граничний стан.

В рамках досліджуваного завдання прогнозування процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ при ЕТС з метою поглиблення достовірності прогнозу як усередині, так і за межами періоду попередження виникає необхідність з отриманням наступних даних експлуатаційних спостережень здійснювати адаптацію коефіцієнтів моделі, зберігаючи незмінною її структуру.

При цьому з метою адаптації коефіцієнтів математичної моделі та уточнення якості прогнозу необхідно використовувати останні фактичні значення показників безвідмовності в якості точок екзаменаційної послідовності. Для стабілізації моделі необхідно з отриманням кожної нової точки спостережень використовувати не всю вибірку, а останні 7 – 8 точок, чим досягається можливість усувати згладжуючий вплив попередніх спостережень.

Такий підхід доцільно використовувати після вичерпання призначеного терміну служби (ресурсу) під час підконтрольної експлуатації з метою порівняння прогнозованих та фактичних показників надійності та корегування нормативної документації, яка визначає порядок експлуатації ЗРМТ, зокрема ресурси, норми витрати ресурсів і терміни служби обладнання ЗРМТ.

Новизна методу. Представлений метод прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ при ЕТС на відміну від відомих [37, 38], орієнтований на застосування для обладнання при переведенні на ЕТС з урахуванням взаємопов'язаного проведення підконтрольної експлуатації та випробувань на надійність (під час проведення контролю

граничного стану), сумісного використання їх результатів при дослідженні зміни безвідмовності з урахуванням режимів експлуатації, а також їх впливу на здатність об'єкту до збереження неграничного стану.

Таким чином, удосконалений метод прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ розширює відомі методики оцінки показників залишкового терміну служби (ресурсу) з використанням регресійно-часових моделей та в якій, на відміну від існуючих, запропоновано замість використовуваних раніше парних лінійних регресійних моделей зміни показника надійності від тривалості експлуатації (сумарного наробітку) здійснювати побудову множинної регресійної математичної моделі, що описує залежність зміни показника безвідмовності від сукупності параметрів, які характеризують режими експлуатації об'єктів, та забезпечує більш повне врахування специфічних особливостей обладнання ЗРМТ.

Застосування удосконаленого методу прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ при ЕТС при вирішенні завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів) відповідного обладнання ЗРМТ при ЕТС дозволить отримати з достатньою ймовірністю відповідні рішення про їх подальшу експлуатацію.

3.2. Удосконалений метод оцінки показників довговічності комплексу обладнання при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів)

Нижче пропонується процедура оцінки показників довговічності обладнання ЗРМТ з урахуванням зміни технічного стану (рівня безвідмовності) його комплектуючих за результатами підконтрольної експлуатації і випробувань на надійність. Далі удосконалюється метод

оцінки показників довговічності комплексу обладнання ЗРМТ при ЕТС, що передбачає послідовне вирішення наступних завдань: побудова математичних моделей зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ; прогнозування значень показників безвідмовності на майбутній етап експлуатації з використанням побудованих моделей їх зміни і обчислення оцінок показників залишкового терміну служби (ресурсу) шляхом застосування удосконаленого методу прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ з використанням результатів експлуатаційних спостережень, розробка ієрархічної структурної схеми комплексу обладнання ЗРМТ, оцінка довговічності комплексу обладнання ЗРМТ з урахуванням зміни технічного стану (рівня безвідмовності) його комплектуючих та інтенсивності їх експлуатації, прогнозування довговічності комплексу обладнання ЗРМТ для вирішення завдань продовження призначеного терміну служби (ресурсу).

3.2.1. Оцінка показників довговічності комплексу обладнання ЗРМТ з урахуванням зміни технічного стану (рівня безвідмовності) його складових частин. Відомо, що вимоги до допустимого рівня довговічності зразків та систем річкового та морського транспорту задаються на основі аналізу процесу зміни їх ефективності. Проведений аналіз робіт, присвячених цій проблемі, показав, що показники, пов'язані з ефективністю виконання завдань, а також показники типу “ефективність – вартість” в тому або іншому вигляді враховують і надійність [66].

Таким чином, існує можливість рішення поставленої задачі шляхом дослідження залежності змін показників ефективності. Реалізація такого рішення досягається розробкою методичного апарату за оцінкою допустимого рівня ефективності і обґрунтуванням універсальності отриманого результату в плані вибору показника ефективності.

В роботі [44] запропонований найбільш узагальнений варіант рішення задачі, заснований на порівняльній оцінці реальної (W_p) і ідеальної (W_o)

ефективностей. Вважаючи незмінними ті компоненти показників ефективності, які не належать до досліджуваних, використовується вираз, який за своїм фізичним змістом відповідає відомому “коефіцієнту збереження ефективності”(2.7):

$$W_{відн} = \frac{W_P(K_{БГ}(t))}{W_0(K_{БГ\max})}, \quad (3.30)$$

де $W_{відн}$ – відносна ефективність;

$K_{БГ}(t)$ – коефіцієнт готовності.

Кількісна оцінка допустимого рівня надійності може бути виконана за допомогою комплексних показників: коефіцієнта готовності і коефіцієнта оперативної готовності, наведених в додатку А. В [44] отримана залежність $K_z(t)$ від $T_0(t)$ або $K_{oz}(t)$ від $T_0(t)$, за умови, що ймовірність безвідмовної роботи підкоряється експоненціальному закону

$$K_{oz}(t) = K_z(t)P(t_{op}) = \frac{T_0(t)}{[T_0(t) + T_e(t)]} e^{-\left(\frac{t_{op}}{T_0(t)}\right)}. \quad (3.31)$$

Графіки залежностей $K_z(t) = f(T_0(t))$ і $K_{oz}(t) = f(T_0(t))$ мають три ділянки: круту, перехідну і ділянку практично незмінного рівня $K_z(t)$ та $K_{oz}(t)$, що починається при $T_0(t) = T_{0\text{дон}}$. Відповідно відбувається зміна співвідношення W_P/W_0 , яке враховує той або інший показник ефективності. З аналізу графічних залежностей встановлено, що надійність і готовність до виконання завдань засобів комплексу обладнання ЗРМТ при $T_0(t) > T_{0\text{дон}}$ робить незначний вплив на ефективність; при $T_0(t) < T_{0\text{дон}}$ відбувається різке зниження ефективності застосування ЗРМТ.

Наведена динаміка процесу зміни ефективності дає підставу прийняти в якості допустимого рівня надійності $K_{\varepsilon \text{ доп}} = 0,87 \dots 0,91$; $K_{\text{ог доп}} = 0,82 \dots 0,86$ при допустимому рівні середнього наробітку на відмову $T_{0 \text{ доп}} = 9 \dots 10$ годин.

Відповідно до вимог з надійності зразків обладнання ЗРМТ, в [117] для будь-якого судна в якості гранично допустимого рівня надійності запропоновано прийняти значення $K_{\text{ог доп}} = 0,8$.

З урахуванням викладеного в додатку А оцінку гранично допустимого рівня надійності (довговічності) комплексу обладнання ЗРМТ в якості складної технічної системи будемо проводити за допомогою коефіцієнта збереження ефективності, який також заснований на оцінці процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) ЗРМТ. В процесі експлуатації ЗРМТ досягне гранично допустимого рівня надійності (довговічності) у разі, коли величина коефіцієнта збереження ефективності прийме значення $K_{\text{еф}} < K_{\text{еф доп}}$. Для забезпечення прийнятої ефективності обладнання та вирішення завдань продовження призначених показників обладнання ЗРМТ відповідно до вимог [86, 109] в якості критерію запропоновано значення коефіцієнту збереження ефективності $K_{\text{еф доп}} \geq 0.6$.

Ефективність функціонування ЗРМТ, як і будь-якої складної технічної системи, будемо оцінювати показником – математичне сподівання (МСП) вихідного ефекту.

Функціональну структуру комплексу обладнання ЗРМТ представимо ієрархічною розгалуженою системою з простим підпорядкуванням [64, 77]. У такій структурі між основними об'єктами, що управляють, і безпосередньо виконавчими об'єктами маються в своєму розпорядженні допоміжні об'єкти. Взаємодія між об'єктами здійснюється на основі “передачі сигналів і їх перетворення” через працездатні “проміжні об'єкти” і “канали зв'язку”. Відмова каналу не дозволяє використовувати тільки сам цей канал, а відмова об'єкту – і всі підлеглі йому канали.

Відмови елементів вважаються взаємно незалежними.

При цьому розглядається ієрархічна система, яка будується рекурентним способом, структурна схема якої наведена на рис 3.2.

Система f -го рангу S_f утворюється приєднанням за визначеним правилам до системи $(f-1)$ -го рангу S_{f-1} множини однакових підсистем s_f , $f \geq 2$ (рис. 3.2,а). Система першого рангу є вихідною, тобто $f=1$, $S_1 = s_1$, а число вихідних елементів складає $N_1 = n_1$.

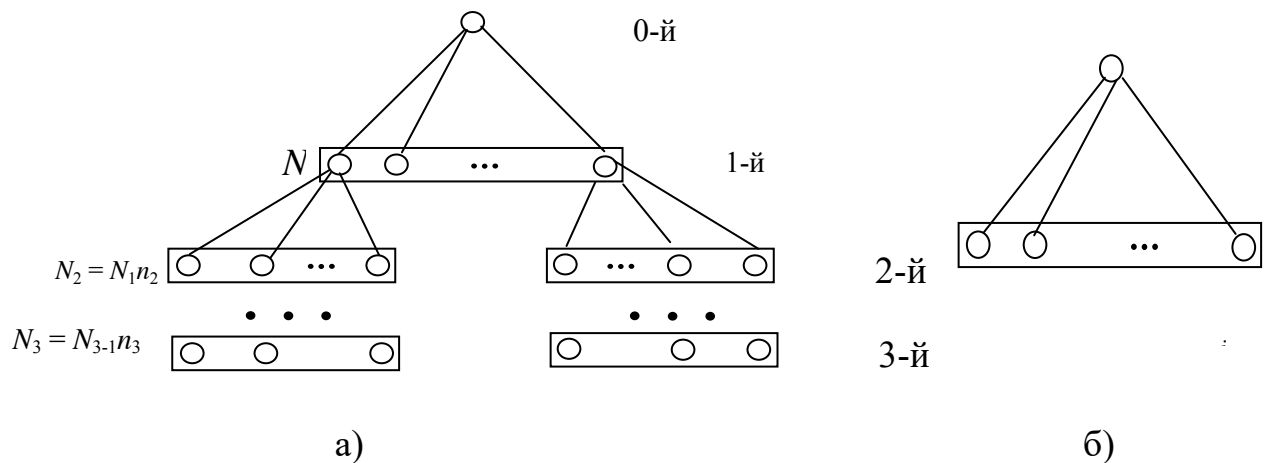


Рис. 3.2. Структура ієрархічної системи S_f (а) і підсистеми S_i (б)

В ієрархічних системах з простим підпорядкуванням підсистема S_i для будь-якого $i = \overline{1, f}$ складається з одного початкового об'єкту O_i та n_i вихідних об'єктів (рис. 3.2,б). Очевидно, що при $f \geq 2$ для ієрархічних систем S_f : $N_f = N_{f-1} n_f = \prod_{i=1, f} n_i$.

Для ієрархічних систем з простим підпорядкуванням, в яких будь-який елемент безпосередньо підпорядкований тільки одному елементу вищестоящого рівня для числа x нормально функціонуючих виконавчих елементів має місце рівність $x = \sum_{i=1}^f \prod_{j \in J_i} y_{ij}$, де J_i – підмножина елементів, що складається з j -го виконавчого елементу і всіх елементів, що управляють, яким він підпорядкований; y_{ij} – індикатор стану j -го елементу i -го рівня, який дорівнює 1, якщо j -й елемент працездатний, і 0 в іншому випадку.

При дослідженні ефективності функціонування комплексу обладнання ЗРМТ з використанням ієрархічних систем введемо наступні допущення.

1. Елементи O_i , $i \geq 1$ не відмовляють. Вихідний j -й елемент підсистеми, $i \geq 1$ вважається працездатним, якщо працездатний сам елемент і лінія зв'язку, що сполучає його з O_i -м елементом. Вважається, що ймовірність даної події $p_{ij} = p_i, \forall j \leq n_i$.

2. Елемент i -го рівня вважається таким, що правильно функціонує, якщо працездатний сам елемент і всі елементи, що сполучають його з нульовим елементом ієрархічної системи S_f . Очевидно, що ймовірність P_i того, що який-небудь елемент i -го рівня виявиться працездатним, дорівнює $P_i = p_1 p_2 \dots p_i$, $i \geq 1$. Без втрати спільності можна вважати, що лінії зв'язки (ребра), що сполучають елементи, абсолютно надійні (інакше, надійність ребер можна врахувати в надійності елементів).

3. Якість функціонування ієрархічної системи залежить від числа правильно функціонуючих елементів на кожному i -м рівні ієрархічної системи $i \leq f$.

Позначимо число правильно функціонуючих елементів на i -м рівні ієрархічної системи S_f через v_i . Очевидно, v_i – цілочисельна випадкова величина, що приймає значення від 0 до $i \leq f$. Нехай $p(y_1, \dots, y_f)$ – щільність сумісного розподілу ймовірності випадкових величин $v_1, \dots, v_f$ (або f -мерного випадкового вектору $\{v\} = (v_1, \dots, v_f)$). При цьому $\varphi(y_1, \dots, y_f)$ – деяка функція від f аргументів y_i , $0 \leq y_i \leq N_i$, $i \leq f$, значення якої $\varphi_{(v)}(y_1, \dots, y_f)$ визначає ефективність функціонування ієрархічної системи S_f в точці $(v_i = y_i, i \leq f)$.

Ефективність функціонування ієрархічної системи оцінюється показником ефективності, який визначається [18, 19, 126] як МСП величини

$$W = \sum_{x_i \in J} \varphi_{(v)}(y_1, \dots, y_f) p(y_1, \dots, y_f), \quad (3.32)$$

де J – множина можливих точок ($v_i = y_i, i \leq f$).

Якщо функція $f_{(v)}(y_1, \dots, y_f)$ задана аналітично, то її можна представляти у вигляді відповідного ряду Маклорена, а завдання оцінки ефективності W ієрархічної системи звести до визначення початкових моментів сумісного розподілу $v_i, i \leq f$ правильно функціонуючих елементів на всіх рівнях ієрархічної системи S_f .

Задача (3.32) була вирішена в [37], де, крім того, передбачалося, що ефективність W залежить лише від числа правильно функціонуючих елементів на f -м рівні ієрархічної системи, тобто $f_{(v)}(y_1, \dots, y_{f-1}, y_f) = f_{(v)}(0, \dots, 0, y_f)$, що вимагало визначення величин $M(v_i), M(v_i^2), M(v_i^3)$.

Для правильного функціонування будь-якого вихідного елементу ієрархічної системи необхідно, щоб були працездатні всі елементи вищих рангів, яким цей елемент підпорядкований, що відбувається з ймовірністю $p_0 \prod_{i=1(1)N_f} n_i p_i$. МСП числа правильно функціонуючих вихідних елементів ієрархічної симетричної структури з простим підпорядкуванням можна знайти за формулою $M[x] = p_0 \prod_{i=1(1)N_f} p_i$, а другий початковий момент $M[x^2] = p_0 \prod_{i=1(1)f} n_i p_i (\prod_{i=1(1)f} n_i p_i + \prod_{i=1(1)f} q_i \prod_{k=i+1(1)f} n_k p_k)$. Моменти вищих порядків також знаходяться методом твірних функцій, проте вони мають громіздкий вигляд і тут не приводяться.

В рамках підходу [37] завдання (3.32) в найбільш загальному вигляді було вирішене в [38] з використанням методів твірних функцій і методів комбінаторного аналізу (з використанням чисел Стірлінга 1-го роду і поліномів Бела). Таким чином, основу сучасних методів аналізу ієрархічних систем, які використовуються далі при розрахунку показників надійності та

ефективності комплексів обладнання ЗРМТ та їх складових частин, складають роботи [1, 37, 38].

Розглянемо комплекс обладнання ЗРМТ у вигляді системи з ієрархічною розгалуженою структурою, в якому кожен елемент цієї структури може знаходитися в одному з двох станів: працездатному або непрацездатному.

При моделюванні в якості вихідних даних для розрахунку коефіцієнту збереження ефективності комплексу обладнання ЗРМТ використовуються відповідні значення показників безвідмовності, отриманих на періодах прогнозної ретроспекції та упередження прогнозу відповідно.

У загальному вигляді, з урахуванням підходу, викладеному в [64], розрахункове співвідношення для визначення величини коефіцієнта збереження ефективності комплексу обладнання ЗРМТ має вигляд

$$K_{ef}(T_{o,j}) = \frac{P_{o,e}}{q_o [1 - (1 - P_1)^{m_{oc}}]} \sum_{q=1}^{q_o} P(q) M[x|q], \quad (3.33)$$

де $T_{o,j}$ – показник безвідмовності елементу j -го рівня ієрархічної структурної схеми надійності комплексу обладнання ЗРМТ;

$P_{o,e}$ – ймовірність того, що основний елемент структурної схеми надійності комплексу ЗРМТ до моменту закінчення інтервалу часу t_{oc} буде в працездатному стані;

$P(q)$ – ймовірність виконання завдань за призначенням;

$M[x|q]$ – умовне МСП випадкової величини x ;

Для обчислення значень добутку $P(q)M[x|q]$ в k -рівневої структурній схемі надійності комплексу обладнання ЗРМТ з урахуванням надійності його комплектуючих засобів з використанням формули повної ймовірності отримано співвідношення [96], яке має наступний вигляд

$$\begin{aligned}
P(q)M[x/q] &= \prod_{j=1}^{k-1} \sum_{i_j=0}^{I_j(q, \{i_1 \dots i_{j-1}\})} C_{N_j^*}^{i_j} P_{j.\bar{o}z}^{N_j^*-i_j} (1 - P_{j.\bar{o}z})^{i_j} \times \\
&\times C_{N_j^*-i_j}^{I_j(q, \{i_1 \dots i_{j-1}\})-i_j} P_{j.\bar{o}p}^{N_j^*-I_j(q, \{i_1 \dots i_{j-1}\})} (1 - P_{j.\bar{o}p})^{I_j(q, \{i_1 \dots i_{j-1}\})-i_j} \times \\
&\times \sum_{i_k=0}^{I_k(q, \{i_1 \dots i_{k-1}\})} C_{N_k^*}^{i_k} P_{k.\bar{o}z}^{N_k^*-i_k} (1 - P_{k.\bar{o}z})^{i_k} \times \\
&\times \sum_{r=0}^{R(i_k)} C_{N_k^*-i_k}^{I_k(q, \{i_1 \dots i_{k-1}\})-i_k-r} (P_{k.\bar{o}p} K_{\bar{o}z})^{N_k^*-I_k(q, \{i_1 \dots i_{k-1}\})+r} \times \\
&\times (1 - P_{k.\bar{o}p} K_{\bar{o}z})^{I_k(q, \{i_1 \dots i_{k-1}\})-i_k-r} \times \\
&\times \left[\sum_{a=1}^{A(q)} a C_{A(q)}^a P_{nop}^a (1 - P_{nop})^{A(q)-a} + (1 - (1 - P_1 K_{\bar{o}p})^{m_{oc}-r}) \right]
\end{aligned} \tag{3.34}$$

де j – рівень ієрархічної структури схеми комплексу обладнання ЗРМТ;

N_j – кількість елементів j -ого рівня одночасно підключених до одного елемента $(j-1)$ -ого рівня;

N_j^* – сумарна кількість працездатних елементів j -ого рівня з урахуванням відмов елементів, які знаходяться на більш високих рівнях;

$P_{j.\bar{o}z}$ – ймовірність того, що елемент j -ого рівня виявиться працездатним в момент часу, який відповідає початку використання за призначенням;

$P_{j.\bar{o}p}$ – ймовірність того, що працездатний до моменту початку роботи елемент j -ого рівня не відмовить протягом усієї її тривалості;

$I_j(q, \{i_1 \dots i_{j-1}\})$ – допустима кількість елементів, що відмовили, j -ого рівня, яка визначається з урахуванням елементів, що відмовили, більш високих ієрархічних рівнів;

$R(i_k)$ – максимально можлива кількість працездатних до моменту початку роботи елементів k -ого рівня, які можуть відмовити в процесі експлуатації;

$A(q)$ – кількість циклів з витратою, що дорівнює $m_{чep}$;

$K_{\text{бг}}$ – ймовірність того, що працездатна до моменту початку роботи обладнання не відмовить під час підготовки в порту.

За своїм фізичним змістом $P_{j,\text{бг}}$ відповідає нестационарному повному коефіцієнту готовності елементу j -го рівня структурної схеми комплексу обладнання ЗРМТ, тому наведений вище підхід (3.32)...(3.34) пропонується використовувати при визначенні величин $P_{j,\text{бг}}$. Величини $P_{j,\text{бр}}$ визначаються за відомим співвідношенням для визначеного закону розподілу наробітку на відмову елементу j -ого рівня. Інші величини, які використовуються в (3.34), визначаються прямими методами з урахуванням особливостей ієрархічної структурної схеми відповідного комплексу обладнання ЗРМТ.

Таким чином, рішення задачі визначення допустимих значень контрольованих показників надійності (безвідмовності) обладнання ЗРМТ, що перебувають в експлуатації, може бути отримано у вигляді інтервалів, які відповідають області, обмеженій зліва і знизу графіком залежності величини коефіцієнту збереження ефективності комплексу обладнання ЗРМТ від показників безвідмовності на відповідному рівні, а зверху і з права – гранично допустимими значеннями цих показників, встановленими в технічних умовах для відповідних зразків обладнання ЗРМТ після проведення відновлювальних робіт (середнього ремонту за технічним станом).

3.2.2. Удосконалення методу оцінки показників довговічності комплексів обладнання при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів). Метод засноване на розроблених загальних положеннях (підрозділ 2.1), удосконаленому методі прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ з використанням результатів експлуатаційних спостережень (підрозділ 3.1), узагальненні і систематизації нормативно-технічної документації.

Вихідні дані. Для застосування методу передбачаються відомими:

структурна схема комплексу обладнання ЗРМТ;

база даних про надійність обладнання ЗРМТ;

характеристика системи технічної експлуатації комплексів обладнання ЗРМТ (стратегія ТО і Р, метод ТО і Р);

техніко-економічні відомості щодо функціонування системи ТО і Р (вартості робіт з відновлення працездатності та проведення ТО і Р);

результати експлуатаційних спостережень і випробувань комплексів обладнання ЗРМТ на надійність.

Область застосування методу. Метод призначене для прийняття рішень про відповідність показників надійності (безвідмовності) обладнання ЗРМТ при ЕТС встановленим вимогам і прогнозуванню величин показників залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ з метою індивідуального вирішення завдань продовження призначеного терміну служби (ресурсу) комплексу обладнання ЗРМТ, що досліджується. При цьому розглядається тільки технічна (фізична) довговічність комплексів, вважається, що комплекси морально не застаріли та стратегія ТО і Р забезпечує економічно-раціональну довговічність. Пропонується використання даного методу в якості складової частини науково-методичного забезпечення вирішення завдань продовження (уточнення) призначених термінів служби (ресурсів) ЗРМТ при переведенні на експлуатацію за технічним станом. Результати, отримані з використанням даного методу, доцільно також використовувати при вирішенні завдань: індивідуального призначення моментів і об'ємів проведення відновлювальних робіт (ремонтів) комплексу обладнання ЗРМТ та окремо його складових, прогнозування моментів переходу у граничний стан як окремими засобами, так і комплексом ЗРМТ в цілому, корегування номенклатури і об'ємів експлуатаційного ЗІП, періодів проведення відновлювальних робіт, і тощо.

Етапи методу. В методі оцінки показників довговічності обладнання

ЗРМТ при ЕТС для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів) визначимо основні етапи, наведені на рис. 3.3.



Рис.3.3. Узагальнена схема методу оцінки показників довговічності комплексів обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом

1-й етап – реєстрація результатів підконтрольної експлуатації обладнання ЗРМТ, проведення процедури контролю і оцінки показників безвідмовності обладнання в процесі їх експлуатації за результатами, отриманими та накопиченими за інтервали фіксованої тривалості. Роботи 1-го етапу виконуються відповідно до вимог експлуатаційної (у частині реєстрації результатів підконтрольної експлуатації) і нормативно-технічної (у частині контролю і оцінки показників безвідмовності) документації.

2-й етап – проведення випробувань обладнання ЗРМТ на безвідмовність, обробка отриманих результатів. Роботи 2-го етапу

проводяться відповідно до програм і методик випробувань відповідних об'єктів.

3-й етап – статистична обробка результатів експлуатаційних спостережень і випробувань обладнання ЗРМТ на надійність, формування динамічного ряду та подальше моделювання з використанням математичних моделей процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ, реалізованих за допомогою програмного продукту “ASTRID” із врахуванням X_j та значення T_0 . Оцінка показників залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ за показниками безвідмовності.

Зміст робіт 3-го етапу викладений в методі прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ з використанням результатів експлуатаційних спостережень (підрозділ 3.1).

4-й етап – збір відомостей щодо вартості робіт з відновлення працездатності та інших видів ремонту комплексу обладнання ЗРМТ.

5-й етап – оцінка показників довговічності (залишкового терміну служби (ресурсу)) обладнання ЗРМТ з урахуванням зміни технічного стану (рівня безвідмовності) його комплектуючих:

1. Побудова ієрархічної структурної схеми комплексу обладнання ЗРМТ та розрахунок коефіцієнта збереження ефективності K_{ef} комплексу обладнання ЗРМТ з урахуванням зміни безвідмовності засобу кожного рівня ієрархії.

2. Оцінка показників довговічності (залишкового терміну служби (ресурсу)) комплексу обладнання ЗРМТ з урахуванням зміни інтенсивності експлуатації його складових.

3. Уточнення річних норм витрат ресурсів.

6-й етап – оцінка отриманих результатів та надання рекомендацій:

1. Адаптація математичних моделей за результатами підконтрольної експлуатації. Koreгування термінів служби.

2. Техніко-економічне обґрунтування доцільності ухвалення рекомендацій.

3. Прийняття рішення щодо доцільності подальшої експлуатації обладнання ЗРМТ з уточненням призначеного терміну служби (ресурсу) за результатами оцінки K_{ef} комплексу обладнання ЗРМТ, або про припинення експлуатації (тимчасове, з подальшим проведенням відновлювальних робіт (ремонтів); повне (розбраковування, списання і тощо)) за результатами оцінки ефективності функціонування комплексу ОВТ ($K_{ef} < K_{ef\ доп}$).

Новизна методу. В методі передбачено оцінювання показників довговічності комплексу обладнання ЗРМТ з урахуванням зміни технічного стану (рівня безвідмовності) його складових за результатами проведення експлуатаційних спостережень з подальшим використанням їх результатів при вирішенні завдань оцінки і прогнозуванню показників надійності обладнання ЗРМТ.

При цьому побудова математичної моделі процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) від параметрів, що характеризують витрату ресурсів під час експлуатації (тривалість експлуатації, сумарний наробіток, сумарна кількість увімкнень) проводиться на підставі значень оцінок показника безвідмовності, які накопичені за тривалість підконтрольної експлуатації і випробувань на надійність під час проведення контролю граничного стану комплексів обладнання ЗРМТ, з урахуванням нерівноточних результатів оцінювання показників безвідмовності внаслідок індивідуальних показників витрат ресурсів під час експлуатації.

Таким чином, удосконалений метод оцінки показників довговічності комплексів обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів), яка дозволяє здійснювати оцінку та прогнозування зміни показника ефективності функціонування комплексу обладнання ЗРМТ, як системи з ієрархічною розгалуженою структурою, з урахуванням зміни технічного стану (рівня безвідмовності) його комплектуючих та отримувати достовірні оцінки коефіцієнту збереження ефективності в умовах обмеженої кількості даних експлуатаційних спостережень.

Застосування методу оцінки показників довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів), дозволить отримати з достатньою ймовірністю відповідні рішення щодо забезпечення нормативного рівня функціонування ЗРМТ.

Висновки до розділу 3

1. Удосконалено метод прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ з використанням результатів експлуатаційних спостережень, в якій, на відміну від існуючої, передбачено врахування залежності похибки прогнозу від способу розподілу експлуатаційних спостережень на вибірки, а також, при порівняльному використанні алгоритмів методу групового урахування аргументів запропоновано використовувати лінійну множинну регресійну модель для отримання достовірних оцінок показника довговічності в умовах використання обмеженої кількості вихідних даних при вирішенні завдань середньострокового прогнозування.

2. Удосконалено метод оцінки показників довговічності комплексів обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів), в якій, на відміну від існуючої, передбачено врахування залежності ефективності обладнання ЗРМТ від зміни технічного стану його комплектуючих засобів, для здійснення оцінки показників довговічності комплексу обладнання ЗРМТ з урахуванням ієрархічно розгалуженої структурної схеми його побудови.

РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ПРОДОВЖЕННЯ ПРИЗНАЧЕНИХ ТЕРМІНІВ СЛУЖБИ (РЕСУРСІВ)

4.1. Оцінка показників довговічності обладнання при експлуатації за технічним станом за результатами розрахунків

4.1.1. Прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ за результатами експлуатаційних спостережень. Досвід підконтрольної експлуатації установочної партії обладнання в частині витрати ресурсів дозволяє за допомогою удосконаленого методу прогнозування довговічності комплексів обладнання ЗРМТ для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів) при експлуатації за технічним станом безпосередньо приступити до рішення задачі прогнозу значень показників безвідмовності та довговічності на етапі експлуатації за технічним станом.

Врахування результатів проведених досліджень дає можливість обґрунтованого підтвердження загальних теоретичних положень, оцінки впливу експлуатаційних факторів (тривалість експлуатації, сумарний наробіток, сумарна кількість увімкнень) в практичній діяльності з метою вироблення відповідних рекомендацій.

В підрозділі 3.1 з використанням методу прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ отриманий загальний вигляд математичних моделей, що описують процес зміни технічного стану (рівня безвідмовності) виробів 1, 2 і 3(1-4) зі складу обладнання ЗРМТ відповідно (3.13 – 3.16). Види апроксимуючих функцій процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) вказаних зразків представлені на рис.4.1...4.6 відповідно.

У відповідності до результатів досліджень, отриманих за в підрозділах 3.1, 3.2 в подальшому необхідно виробити підхід до оцінки та прогнозування зміни ефективності функціонування обладнання ЗРМТ як системи з ієрархічною розгалуженою структурою та оцінки залишкових термінів служби (ресурсів) обладнання ЗРМТ та (або) його окремих складових частин при експлуатації за технічним станом шляхом визначення моменту досягнення відповідними зразками обладнання граничнодопустимих значень показника безвідмовності. Для здійснення прогнозування здійснюється управління факторами x_{jnp} , величина яких визначається, в основному, нормами щорічної витрати ресурсів відповідними зразками. При цьому, з урахуванням наведених в підрозділі 2.3.2 даних, під час проведення математичного моделювання шляхом відбору із отриманих варіантів були відібрані кращі із складу моделей-претендентів, які переважають за адекватністю та задовольняють фізичному змісту процесів, що досліджуються.

Таким чином, для виробів i -го типу при $i = 1, 6$ (1, 2, 3 (1 – 4) відповідно), з урахуванням приведених в підрозділі 2.3.3 обмежень маємо

$$\begin{cases} T_{0i}(t) = T_{0C} (0_i + 1_i x_{1i} + 2_i x_{2i} + 3_i x_{3i} + 4_i x_{4i}); \\ \sigma = \min; \\ T_{0i}(t) \geq T_{0\text{ доп}}, \end{cases} \quad (4.1)$$

або в окремих випадках

$$\begin{cases} T_{0i}(t) = T_{0C} (0_i + 1_i x_{1i} + 2_i x_{2i} + 3_i x_{3i} + 4_i x_{4i} + 5_i x_{5i} + 6_i x_{6i}); \\ \sigma = \min; \\ T_{0i}(t) \geq T_{0\text{ доп}}, \end{cases} \quad (4.2)$$

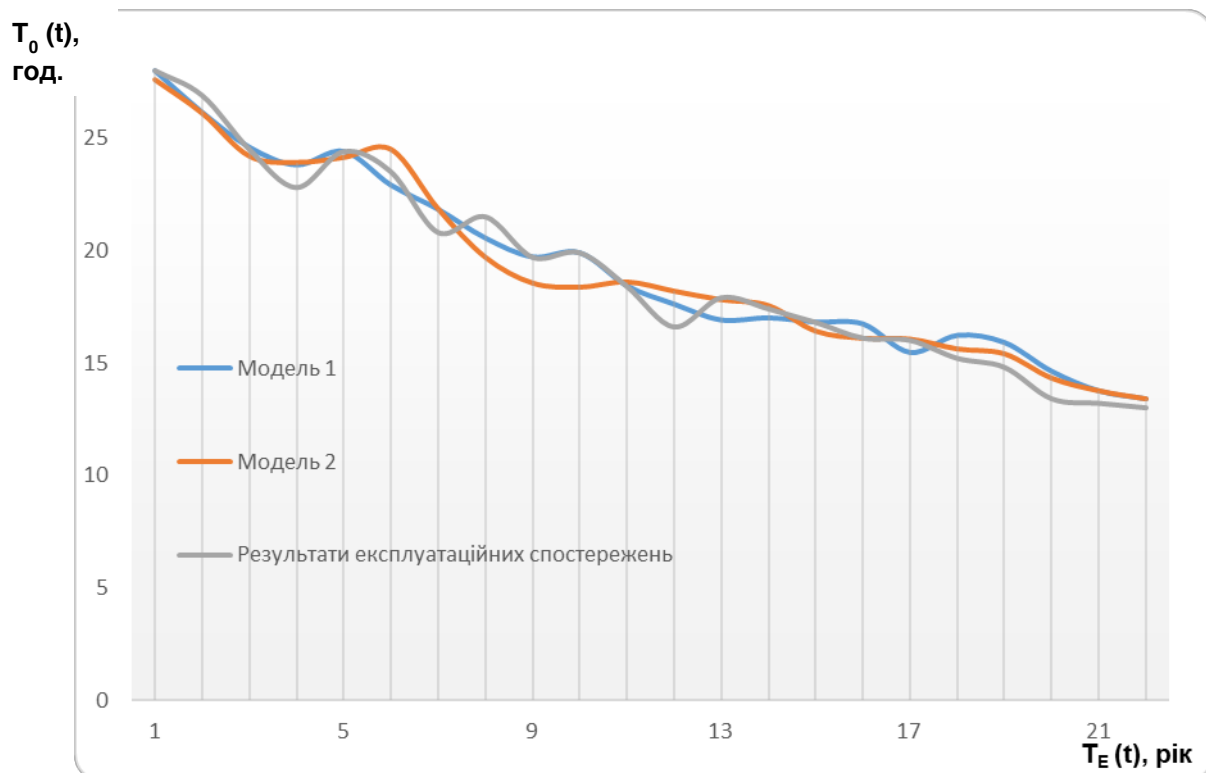


Рис. 4.1. Графік залежності зміни показника безвідмовності виробу 1 від сукупності визначених факторів за результатами експлуатаційних спостережень

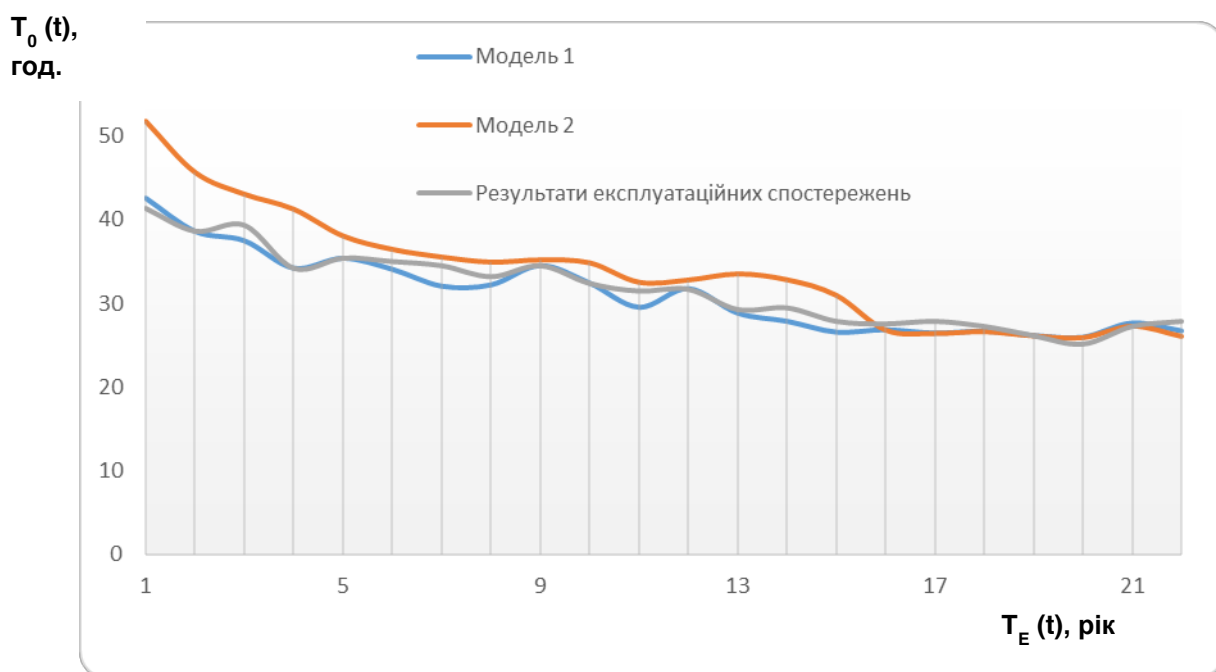


Рис. 4.2. Графік залежності зміни показника безвідмовності виробу 2 від сукупності визначених факторів за результатами експлуатаційних спостережень

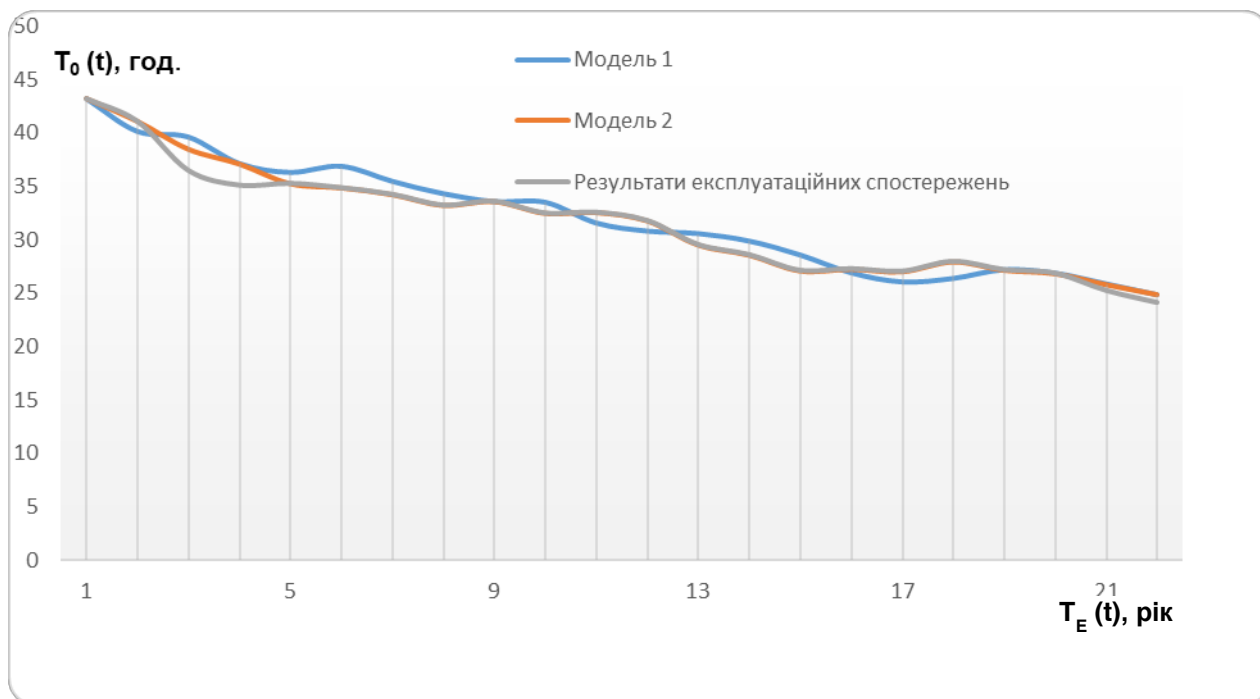


Рис. 4.3. Графік залежності зміни показника безвідмовності виробу 3 (1) від сукупності визначених факторів за результатами експлуатаційних спостережень

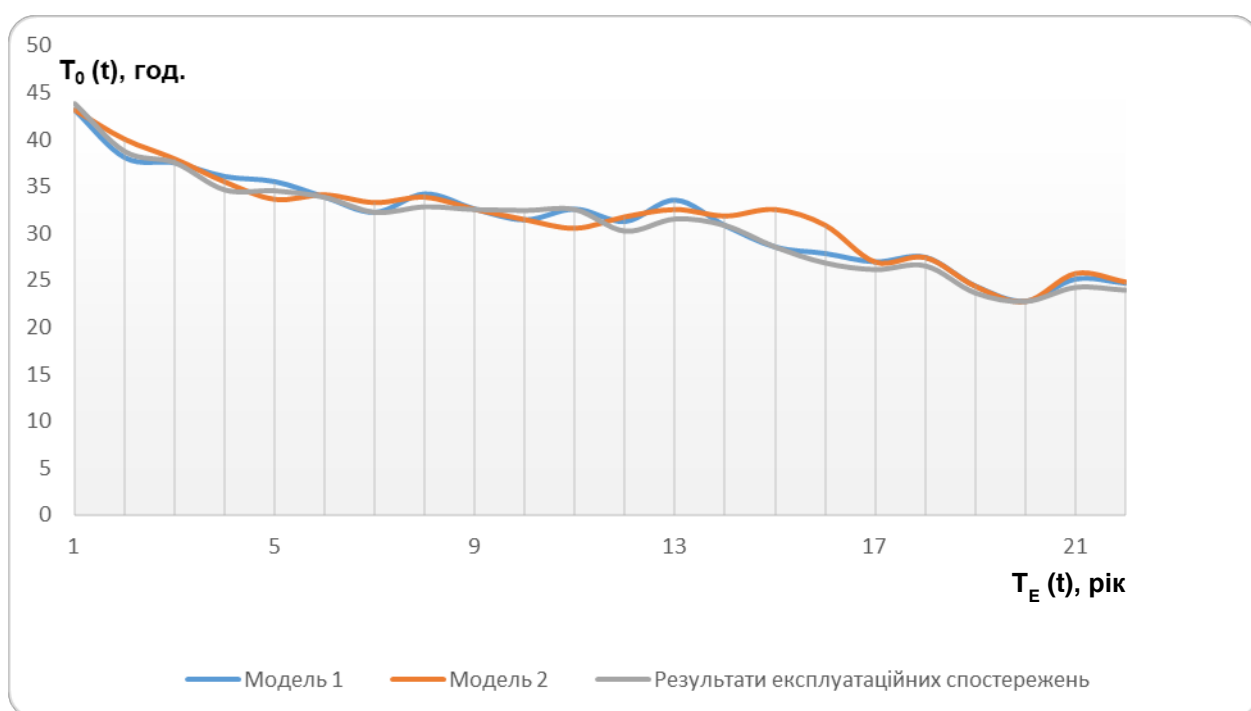


Рис. 4.4. Графік залежності зміни показника безвідмовності виробу 4(2) від сукупності визначених факторів за результатами експлуатаційних спостережень

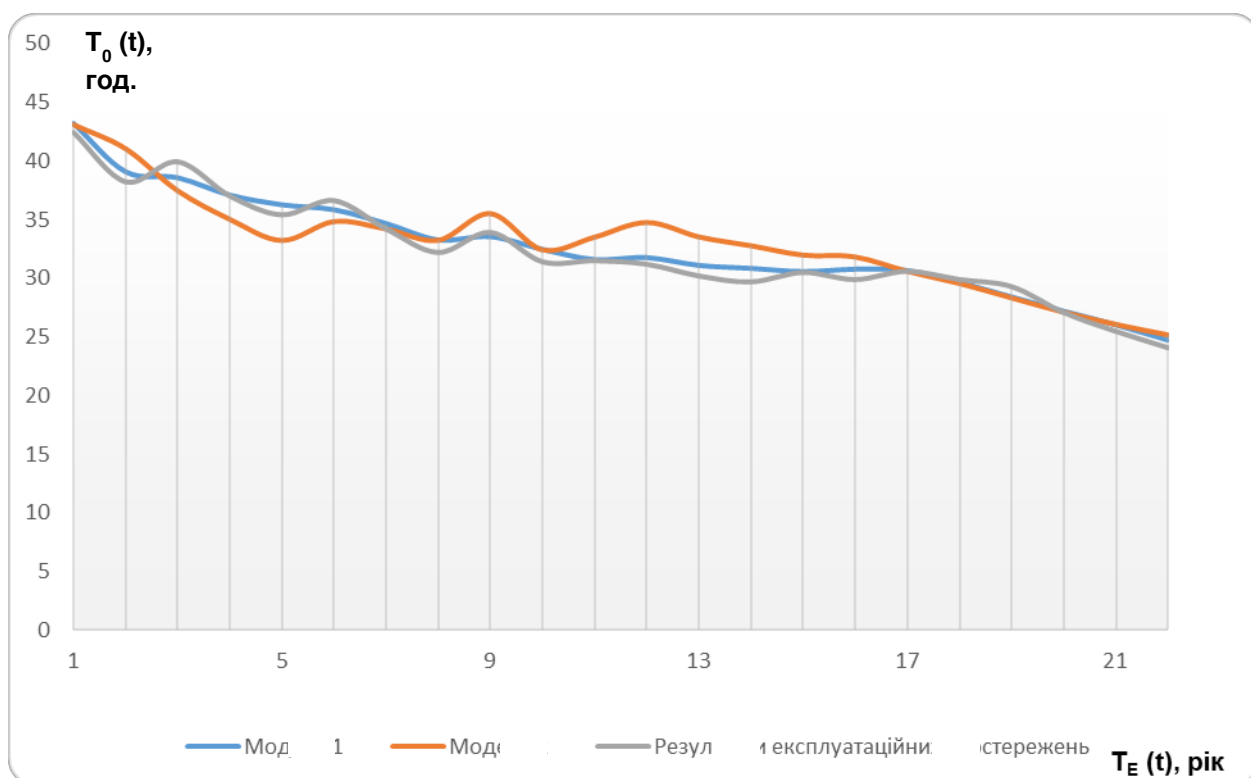


Рис. 4.5. Графік залежності зміни показника безвідмовності виробу 3 (3) від сукупності визначених факторів за результатами експлуатаційних спостережень

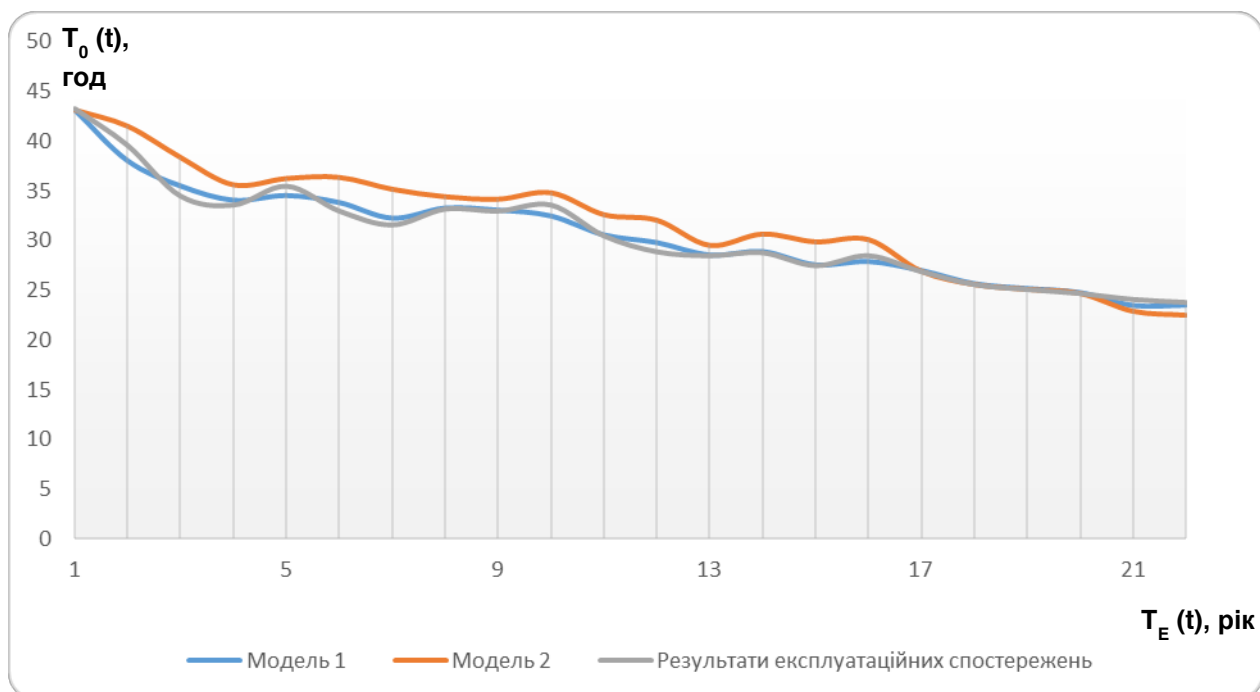


Рис. 4.6. Графік залежності зміни показника безвідмовності виробу 3 (4) від сукупності визначених факторів за результатами експлуатаційних спостережень

Математичні моделі для виробів 1, 2, 3(1-4), отримані за допомогою алгоритму прогнозування, відповідно мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{01}(t) = T_{0C1} (2,0086 * 10^{-7} x_{11} + 9,7832 * 10^{-4} x_{21} - 0,0008 * 10^{-6} x_{31} - \\ - 3,4237 * 10^{-3} x_{41} + 8,7358 * 10^{-1} x_{51} - 0,0028 * 10^{-7} x_{61}); \\ \sigma = 0,35741. \\ T_{01}(t) \geq 12 \text{ год}; \end{array} \right. \quad (4.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{02}(t) = T_{0C2} (-1,0743 * 10^1 x_{12} + 1,0757 * 10^{-1} x_{22} - 1,0084 * 10^{-6} x_{32} + \\ + 3,4449 * 10^{-2} x_{42}); \\ \sigma = 0,11840. \\ T_{02}(t) \geq 25 \text{ год}; \end{array} \right. \quad (4.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{03}(t) = T_{0C3} (5,6569 * 10^{-2} x_{13} + 4,1275 x_{13} + 1,5494 * 10^{-2} x_{23} - \\ - 2,1543 * 10^{-1} x_{33} + 0,0014 * 10^{-6} x_{43}); \\ \sigma = 0,34512. \\ T_{03}(t) \geq 22 \text{ год}; \end{array} \right. \quad (4.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{04}(t) = T_{0C4} (2,8967 * 10^2 - 2,5584 * 10^1 x_{14} - 7,2340 * 10^{-3} x_{24} + \\ + 8,6320 * 10^{-2} x_{34} - 0,1012 * 10^{-6} x_{44}); \\ \sigma = 0,13310. \\ T_{04}(t) \geq 22 \text{ год}; \end{array} \right. \quad (4.6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{05}(t) = T_{0C5} (-2,4411 * 10^1 x_{15} + 1,8122 * 10^{-2} x_{25} + 1,8144 * 10^{-1} x_{35} + \\ + 3,9354 * 10^{-2} x_{45}); \\ \sigma = 0,14821. \\ T_{05}(t) \geq 22 \text{ год}; \end{array} \right. \quad (4.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{06}(t) = T_{0C6} (4,3201 * 10^2 - 0,0132 * 10^{-8} x_{16} - 1,8576 * 10^{-2} x_{26} - \\ - 2,2774 * 10^{-1} x_{36} + 4,4269 * 10^{-2} x_{46}); \\ \sigma = 0,47852. \\ T_{06}(t) \geq 22 \text{ год}; \end{array} \right. \quad (4.8)$$

Таким чином, наведені моделі (4.2,...,4.8) дозволяють провести розрахунки, результати яких зводиться до наступного. Для виробу 1 задіяна модель (4.3). Результати розрахунків по прогнозуванню рівня надійності і оцінці довговічності засобів виробу представлені на рис.4.8, з якого робимо висновок, що прогнозований термін служби до відновлювальних робіт (або середнього ремонту за технічним станом) з довірчою ймовірністю $b = 0,9$ складає 6,25...6,50 років.

Аналогічно до наведеного підходу проведена оцінка показників довговічності решти засобів виробу: використані моделі (4.4,...,4.8), побудовані графіки процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) (рис.4.7,...,4.12), отримані результати розрахунків термінів служби комплексів обладнання ЗРМТ та його засобів до середнього ремонту за технічним станом, що приведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Результати розрахунків термінів служби виробів до середнього ремонту за технічним станом

Виріб	1	2	3 (1)	3 (2)	3 (3)	3 (4)
Термін служби, роки.	6,25...6,50	5,75...6,0	6,25...6,50	5,75...6,0	6,0...6,25	6,25...6,50

Отримані результати дозволяють з достатнім ступенем точності оцінити терміни служби відповідних зразків обладнання ЗРМТ до відновлювальних робіт (середнього ремонту за технічним станом) та залишкові терміни служби (ресурси) засобів комплексів обладнання ЗРМТ після виконання відновлювальних робіт і переведення на експлуатацію за технічним станом, з урахуванням основних експлуатаційних факторів, що впливають на витрату запасу надійності.

Таким чином, з урахуванням вищевикладеного, можливо розрахувати граничні терміни служби (ресурси) зразків обладнання ЗРМТ, які складаються з n міжремонтних термінів служби

$$T_{\text{гсл}} = T_{\text{сл.р}_1} + T_{\text{сл.р}_2} + \dots + T_{\text{сл.р}_N} . \quad (4.9)$$

Граничні терміни служби зразків обладнання ЗРМТ при переведенні на експлуатацію за технічним станом до списання обумовлені настанням граничного стану такого виду, коли чергові відновлювальні роботи (черговий середній ремонт за технічним станом) проводити недоцільно, в першу чергу, унаслідок морального старіння, фізичного зносу або економічних факторів.

Дослідження показують те, що після досягнення обладнанням гранично-нормативних термінів служби є можливість продовження призначеного терміну служби зразка через кожен рік за умови, якщо за технічним станом зразок обладнання ЗРМТ задовольняє вимогам: має експлуатаційну надійність останнього року експлуатації за апаратною частиною $T_{0i} \geq 20$ год.

Оцінка показників залишкового терміну служби до списання засобів виробу обладнання ЗРМТ проведена з використанням моделей (4.4,...,4.8) по побудованим графікам залежності зміни показника безвідмовності від визначених факторів (рис.4.7,...,4.12), отримані результати розрахунків залишкових термінів служби до списання, що приведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

**Результати розрахунків залишкових термінів служби виробу ББ
та його засобів до списання**

Виріб	1	2	3 (1)	3 (2)	3 (3)	4 (4)
Термін служби, роки.	7,0...7,25	8,25...8,5	7,25...7,50	7,0...7,25	7,75...8,0	7,50...7,75

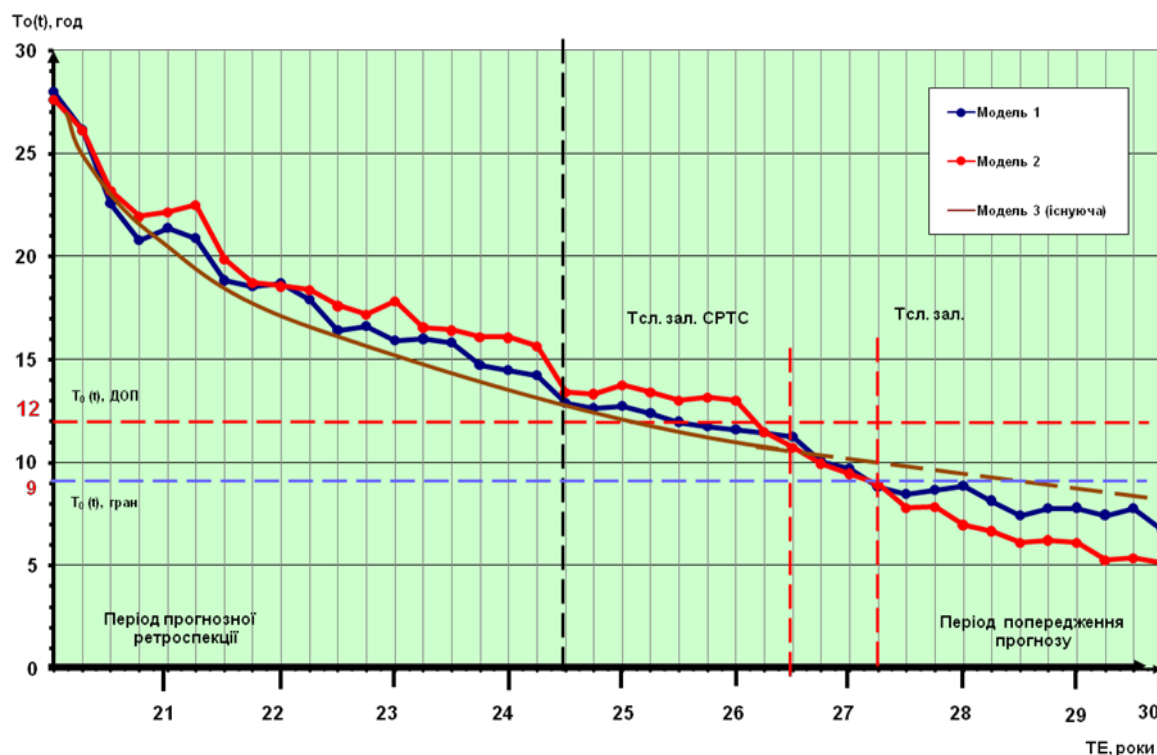


Рис. 4.7. Графік залежності зміни показника безвідмовності виробу 1 від визначених факторів за результатами прогнозування

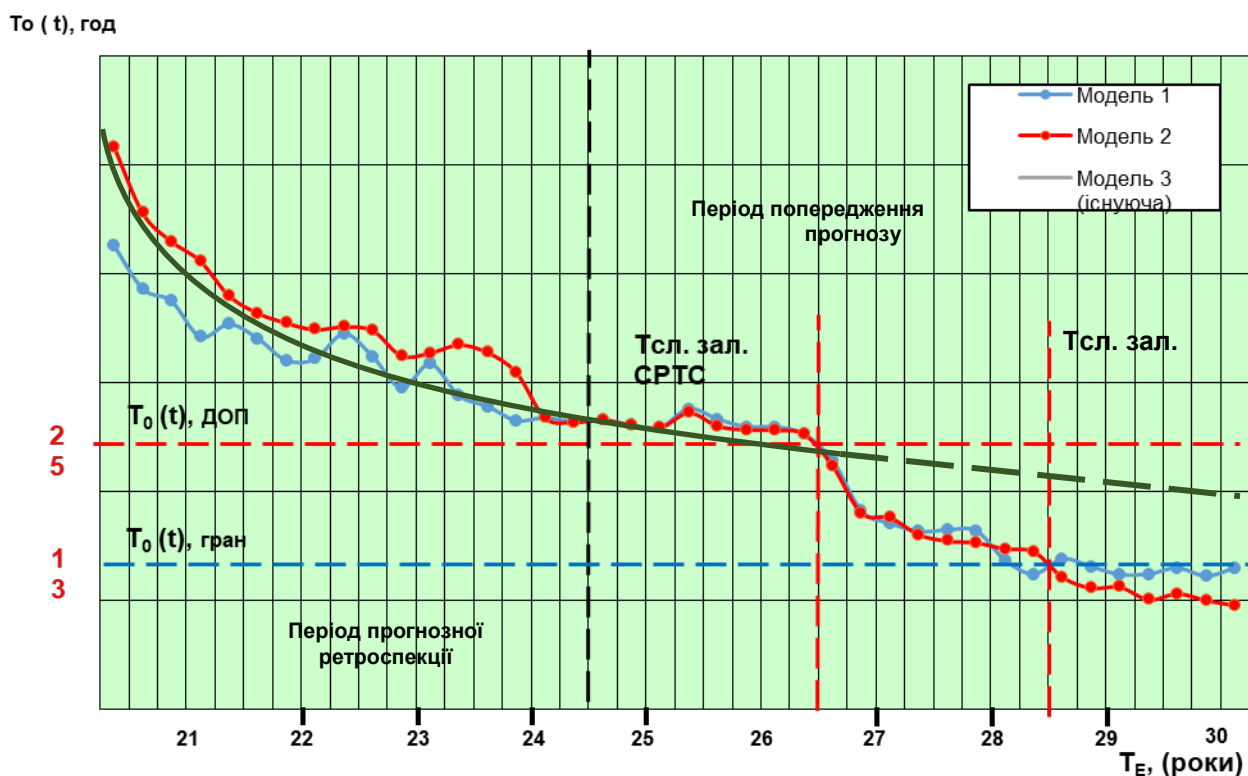


Рис. 4.8. Графік залежності зміни показника безвідмовності виробу 2 від визначених факторів за результатами прогнозування

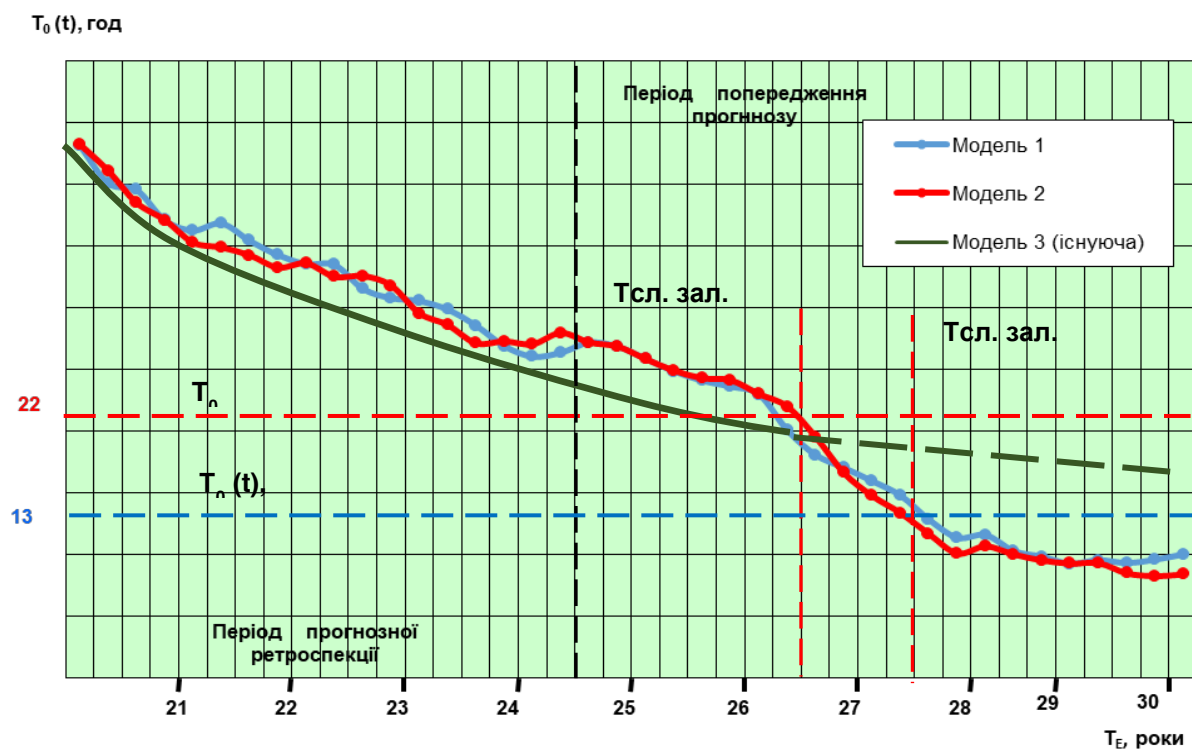


Рис. 4.9. Графік залежності зміни показника безвідмовності виробу 3 (1) від визначених факторів за результатами прогнозування

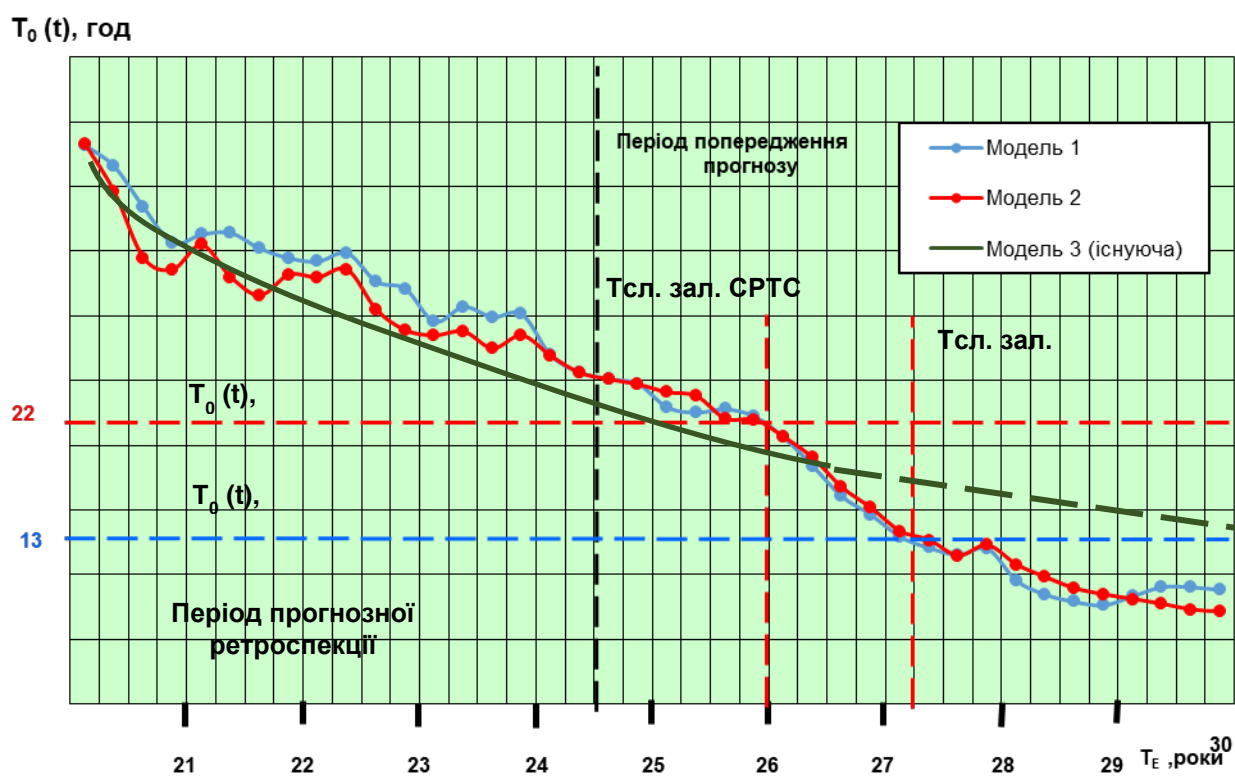


Рис. 4.10. Графік залежності зміни показника безвідмовності виробу 3 (2) від визначених факторів за результатами прогнозування

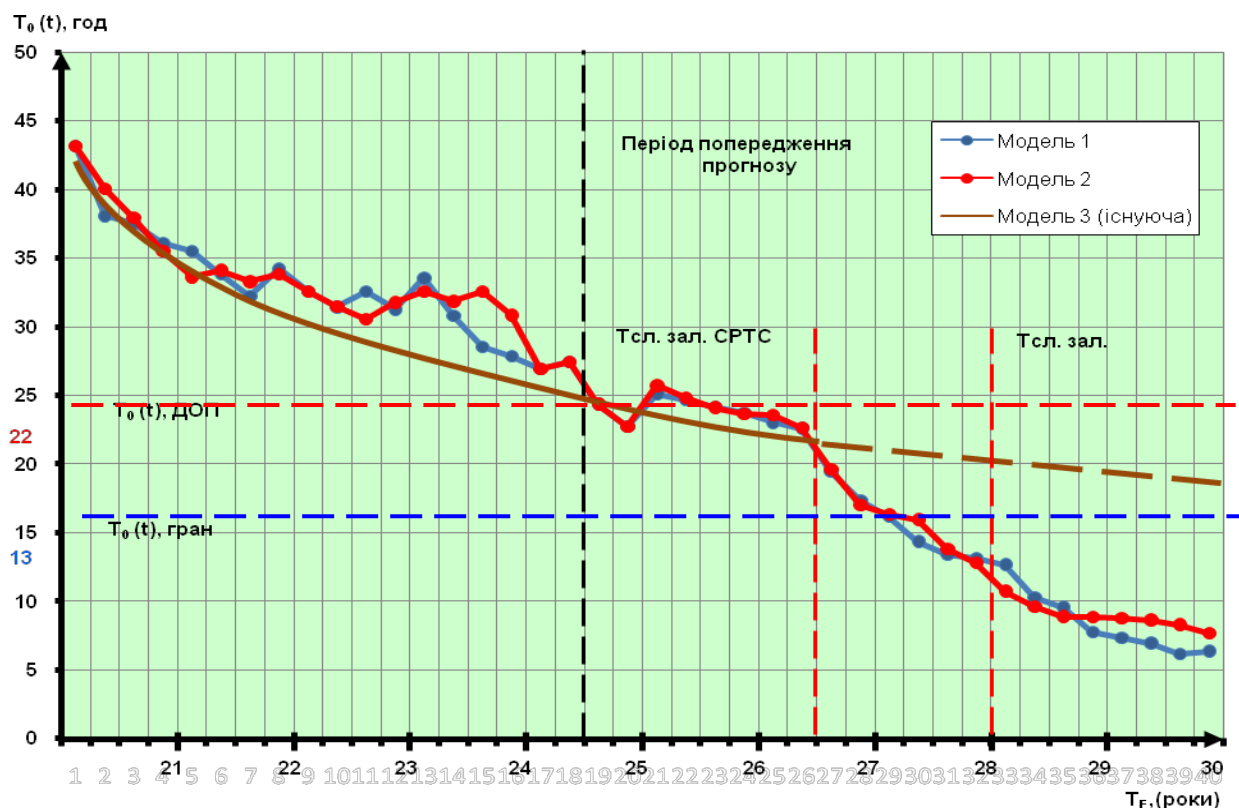


Рис. 4.11. Графік залежності зміни показника безвідмовності виробу 3(3) від визначених факторів за результатами прогнозування

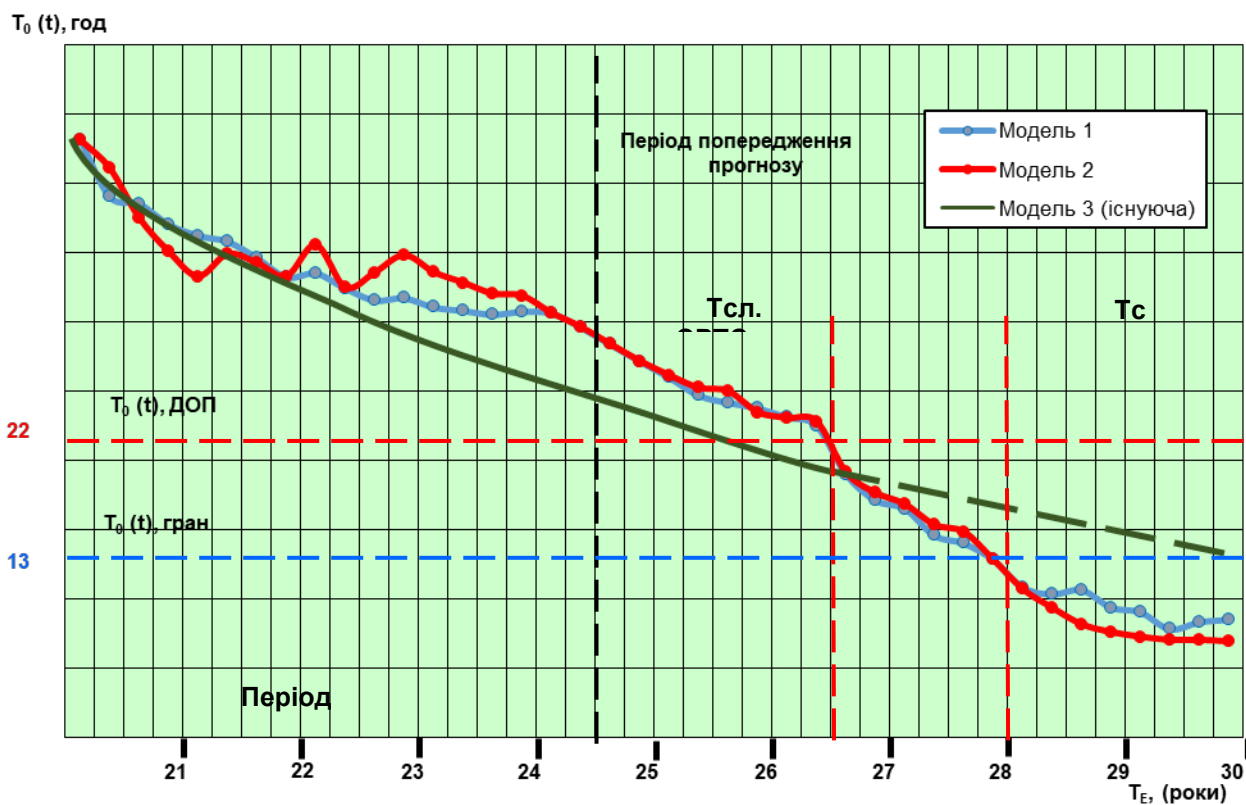


Рис. 4.12. Графік залежності зміни показника безвідмовності виробу 3(4) від визначених факторів за результатами прогнозування

Варте підкреслити те, що в документації на цей виріб обладнання гранично-нормативні терміни експлуатації не визначені. Крім того, в підрозділі 1.1 встановлено, що існуючий парк обладнання характеризується тривалим (більше 20 років) перебуванням в експлуатації у стані нештатної експлуатації при несвоєчасному проведенні заводських ремонтів, незабезпеченістю комплектів ЗПП-1 та ЗПП-2 запасними частинами та матеріалами та з інших причин, вичерпанням призначених ресурси (термінів) експлуатації та за своїм технічним станом потребує заводського ремонту. Все це указує на невідповідність між реальними умовами експлуатації (переведення зразків обладнання на експлуатацію за технічним станом) та існуючими нормативними актами, що регламентують терміни експлуатації комплексів обладнання ЗРМТ в умовах регламентованої системи ТЕ і Р, і вимагає приведення їх у відповідність.

Аналіз показав, що за термін експлуатації комплексу обладнання ЗРМТ за технічним станом потрібне не менш двох середніх ремонтів за технічним станом. Таким чином, можливе рішення задачі визначення термінів служби (залишкового терміну служби та терміну служби до відновлювальних робіт встановленого виду). Доцільність проведення подальших відновлювальних робіт (середніх ремонтів за технічним станом) визначається економічними показниками (вартість заводського середнього ремонту за технічним станом не повинна перевищувати 7 % вартості виробу, вартість капітального ремонту не повинна перевищувати 30 % вартості виробу), проте в умовах, коли придбання нових зразків обладнання ЗРМТ ускладнена, цей шлях є реальним, а поєднання капітального ремонту з проведенням доробок та модернізацією ЗРМТ поза сумнівом буде раціональним.

Але отримані результати вимагають проведення додаткових досліджень в зв'язку з можливими кількісними змінами експлуатаційних факторів в сучасних умовах, тому розглянемо залежність залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ від інтенсивності експлуатації.

4.1.2. Дослідження залежності залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання від інтенсивності експлуатації. Витрати ресурсів обладнання ЗРМТ за показниками – кількістю увімкнень і наробітком апаратури є найбільш конкретними, легко вимірюваними і, разом з тим, регламентованими факторами. Проте найбільший інтерес стосовно вирішуваного завдання представляє оцінка впливу інтенсивності експлуатації на значення показників довговічності.

Відповідно до розробленого комплексу математичних моделей, було проведено дослідження взаємозв'язку між динамікою зміни експлуатаційних факторів і рівнем зміни технічного стану (безвідмовності), виходячи з раніше визначених опорних значень термінів служби i -х комплектуючих підсистем обладнання ЗРМТ. Надалі здійснювалося варіювання прогнозованих значень j -х факторів, тобто кожному із значень x додавалися прирости δx_i , величина яких складала +10, +25, +50 % від номінального.

Вплив тривалості експлуатації та інших факторів обладнання ЗРМТ оцінювалося за допомогою виразів:

$$\begin{cases} T_{0i}^{\delta}(t) = T_{0C} (0_i + 1_i x_{1i} (x_{1i} + \delta x_{1i}) + 2_i x_{2i} + 3_i x_{3i} + 4_i x_{4i}) \\ \sigma = \min; \\ T_{0i}^{\delta}(t) \geq T_{0\text{ don}}, \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\begin{cases} T_{0i}^{\delta x_1}(t) = f(x_{1i} + \delta x_{1i}); \\ \sigma = \min; \\ T_{0i}^{\delta x_1}(t) \geq T_{0\text{ don}}, \end{cases} \quad (4.11)$$

$$\begin{cases} T_{0i}^{\delta x_{ij}}(t) = f(x_{ij} + \delta x_{ij}); \\ \sigma_i = \min; \\ T_{0i}^{\delta x_{ij}}(t) \geq T_{0\text{ don}}, \end{cases} \quad (4.12)$$

В результаті визначалися залишкові терміни служби підсистем обладнання ЗРМТ ($T_{cl}^{\delta x_{ij}}$), які після порівняння з опорними значеннями (T_{cl}) дозволили отримати величину відгуку ΔT_{cl_j} на обурення δx_i , що вносилося

$$\Delta T_{cl_j} = T_{cl} - T_{cl}^{\delta x_j}. \quad (4.13)$$

Результати розрахунків величини відгуку ΔT_{cl_j} виробу 1 представлені в табл.4.3.

Таблиця 4.3

Результати розрахунків величини ΔT_{cl_j} виробу 1

$\delta x_j, \%$	$\Delta T_{cl_1}, \text{р}$	$\Delta T_{cl_2}, \text{р}$	$\Delta T_{cl_3}, \text{р}$	$\Delta T_{cl_4}, \text{р}$
10	0,32	0,24	0,018	0,25
25	0,76	0,65	0,07	0,56
50	1,24	1,14	0,14	0,94

Де δx_i - величина обурення (приросту прогнозованих значень j -х факторів); $\Delta T_{cl_1}, \dots, \Delta T_{cl_4}$ - результати відгуку на обурення в залежності від зміни факторів, що впливають.

З аналізу результатів, представлених в табл.4.3, встановлено, що найбільший вплив на показники довговічності електронних засобів вказаного зразка обладнання ЗРМТ надає наробіток апаратури і тривалість експлуатації. Вплив чинників x_3 та x_4 менш суттєві.

Відмітимо, що прояв факторів x_2 та x_4 пов'язаний з режимом роботи електронних засобів, а фактора x_3 – з переміщенням. При цьому проведені дослідження показують, що розгляд наведених факторів в якості таких, що діють самостійно, дозволяє більш повно і всебічно вивчити процеси зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання та режими його роботи.

У випадку, якщо кожен з режимів роботи представлений одним факторів, моделі спрощуються і стають доступнішими для практичних розрахунків.

Таким чином, з урахуванням наведених міркувань був досліджений взаємозв'язок між інтенсивністю експлуатації та довговічністю електронних засобів для інших засобів виробу, дотримуючись наведеної схеми. Результати розрахунків величини відгуків ΔT_{cl_j} для виробів 2, 3(1-4) наведені в табл.4.4,..., 4.8 .

Таблиця 4.4

Результати розрахунків величини ΔT_{cl_j} виробу 2

$\delta x_j, \%$	$\Delta T_{cl_1}, \text{p}$	$\Delta T_{cl_2}, \text{p}$	$\Delta T_{cl_3}, \text{p}$	$\Delta T_{cl_4}, \text{p}$
10	0,34	0,22	0,02	0,19
25	1,08	0,69	0,093	0,49
50	1,36	1,08	0,12	0,83

Таблиця 4.5

Результати розрахунків величини ΔT_{cl_j} виробу 3(1)

$\delta x_j, \%$	$\Delta T_{cl_1}, \text{p}$	$\Delta T_{cl_2}, \text{p}$	$\Delta T_{cl_3}, \text{p}$	$\Delta T_{cl_4}, \text{p}$
10	0,27	0,18	0,02	0,15
25	0,62	0,43	0,07	0,36
50	1,22	0,78	0,15	0,61

Таблиця 4.6

Результати розрахунків величини відгуку ΔT_{cl_j} виробу 3(2)

$\delta x_j, \%$	$\Delta T_{cl_1}, \text{p}$	$\Delta T_{cl_2}, \text{p}$	$\Delta T_{cl_3}, \text{p}$	$\Delta T_{cl_4}, \text{p}$
10	0,33	0,12	0,02	0,12
25	0,69	0,37	0,08	0,32
50	1,31	0,69	0,17	0,57

Таблиця 4.7

Результати розрахунків величини відгуку ΔT_{cl_j} виробу 3(3)

$\delta x_j, \%$	$\Delta T_{cl_1}, \text{p}$	$\Delta T_{cl_2}, \text{p}$	$\Delta T_{cl_3}, \text{p}$	$\Delta T_{cl_4}, \text{p}$
10	0,25	0,15	0,029	0,21
25	0,61	0,43	0,09	0,45
50	1,27	0,77	0,21	0,72

Таблиця 4.8

Результати розрахунків величини відгуку ΔT_{cl_j} виробу 3(4)

$\delta x_j, \%$	$\Delta T_{cl_1}, \text{p}$	$\Delta T_{cl_2}, \text{p}$	$\Delta T_{cl_3}, \text{p}$	$\Delta T_{cl_4}, \text{p}$
10	0,21	0,21	0,03	0,2
25	0,53	0,56	0,14	0,43
50	1,14	0,82	0,22	0,69

На наступному етапі здійснюється розрахунок коефіцієнта збереження ефективності K_{ef} комплексу обладнання ЗРМТ з урахуванням зміни безвідмовності засобу кожного рівня ієрархії, використовуючи ієрархічну структурну схему комплексу обладнання ЗРМТ, наведених в підрозділі 3.2,

та оцінка показників довговічності (залишкового терміну служби (ресурсу)) комплексу обладнання ЗРМТ з урахуванням зміни інтенсивності експлуатації його комплектуючих підсистем з використанням отриманих даних, наведених в табл. 4.3,...,4.8.

Отримані залежності K_{ef} комплексу обладнання ЗРМТ від показника безвідмовності виробу 1 та 2 та від зміни величини відгуку ΔT_{cl_j} для виробів 1, 2, 3(1-4) представлені на рис. 4.13,...,4.20.

В результаті аналізу одержаних результатів встановлено, що прогнозовані залишкові терміни служби до середнього ремонту за технічним станом комплексу обладнання ЗРМТ знаходяться в інтервалі 4,50...6,50 років, при невиконанні якого прогнозований залишковий термін служби комплексу обладнання ЗРМТ до списання є 7,25...7,75 років.

Отримані результати можливо використовувати в якості вихідних даних для удосконалення інформаційної основи при переведенні комплексів обладнання ЗРМТ на експлуатацію за технічним станом.

Таким чином, отримані результати залежності показників довговічності (залишкового терміну служби (ресурсу)) комплексів обладнання ЗРМТ від інтенсивності експлуатації його комплектуючих підсистем необхідно враховувати під час розробки рекомендацій щодо використання методу прогнозування довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів).

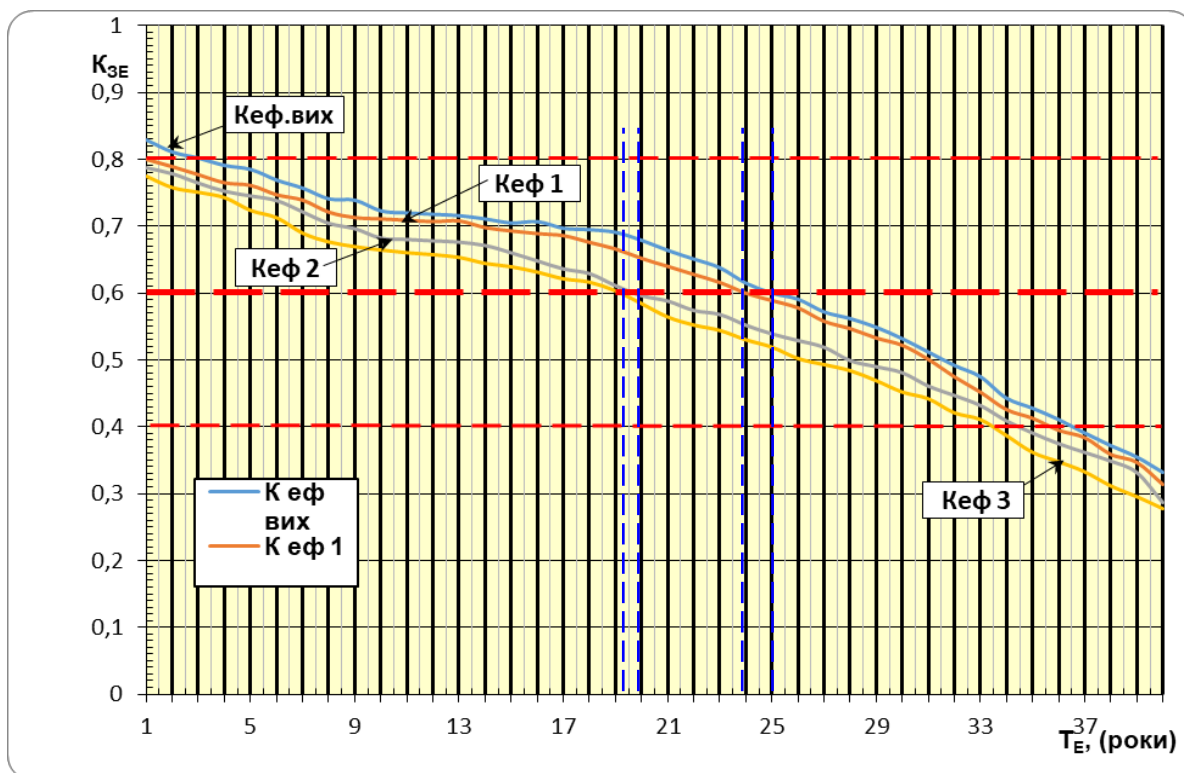


Рис. 4.13. Графік залежності коефіцієнту збереження ефективності виробу від показника безвідмовності виробу 2 за умови $T_{oi}^{\delta x_1}(t) = f(x_{1i} + \delta x_{1i})$

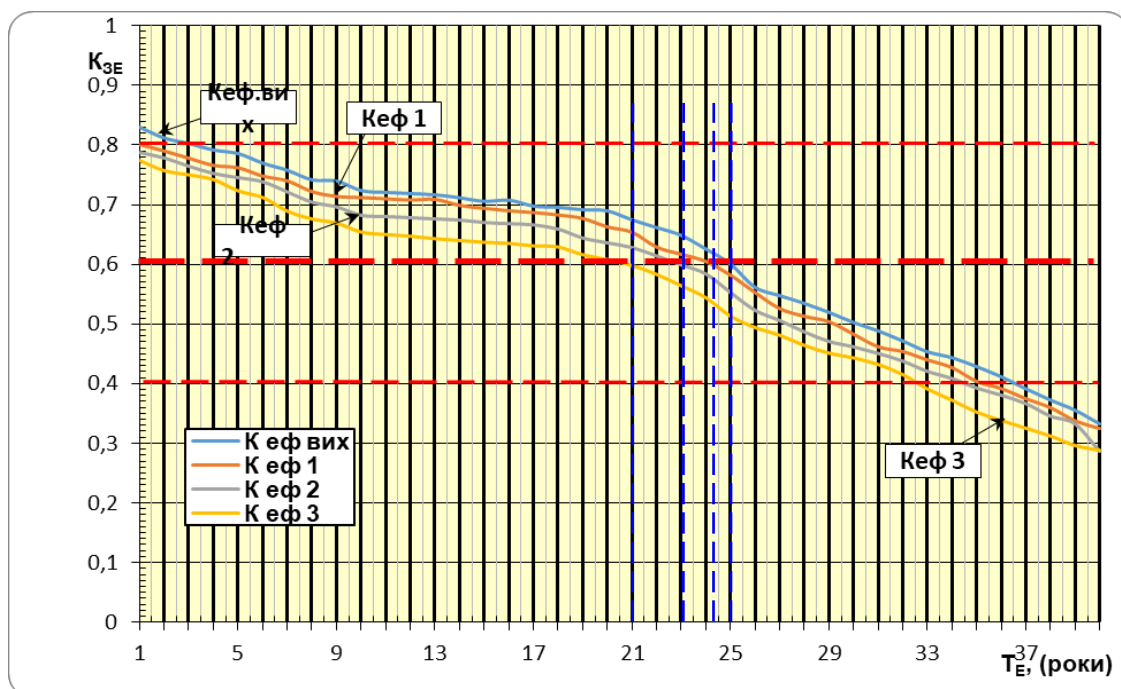


Рис. 4.14. Графік залежності коефіцієнту збереження ефективності комплексу обладнання від показника безвідмовності виробу 2 за умови $T_{oi}^{\delta x_2}(t) = f(x_{2i} + \delta x_{2i})$

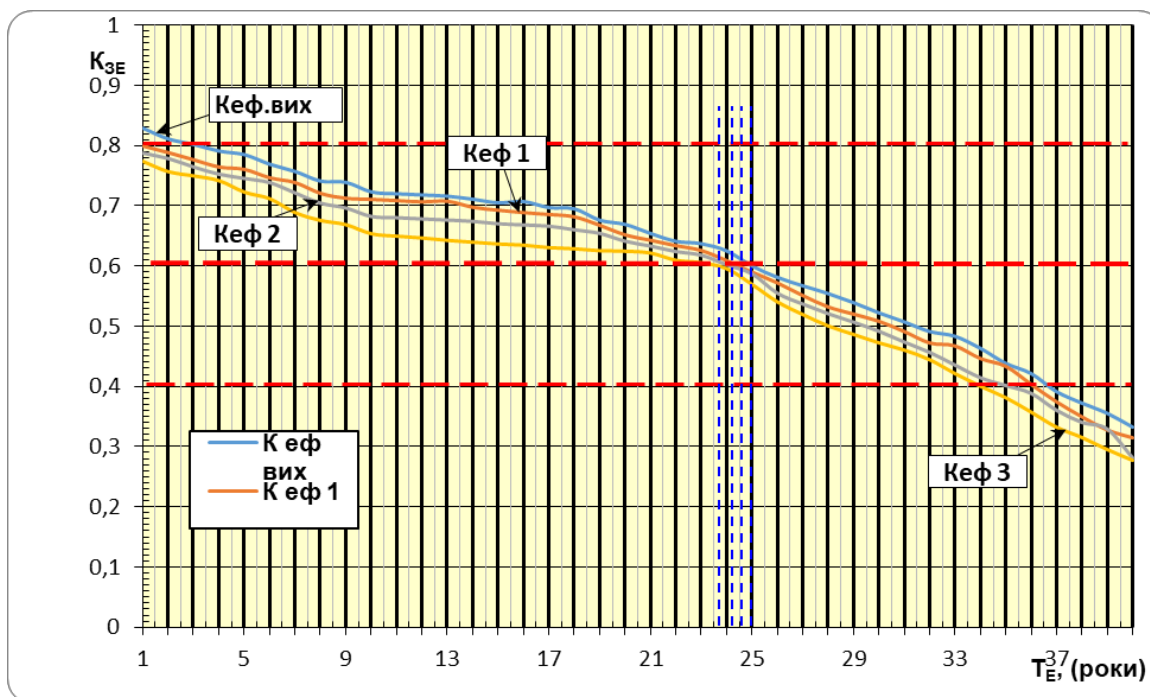


Рис. 4.15. Графік залежності коефіцієнту збереження ефективності комплексу обладнання від показника безвідмовності виробу 2 за умови $T_{oi}^{\delta x_3}(t) = f(x_{3i} + \delta x_{3i})$

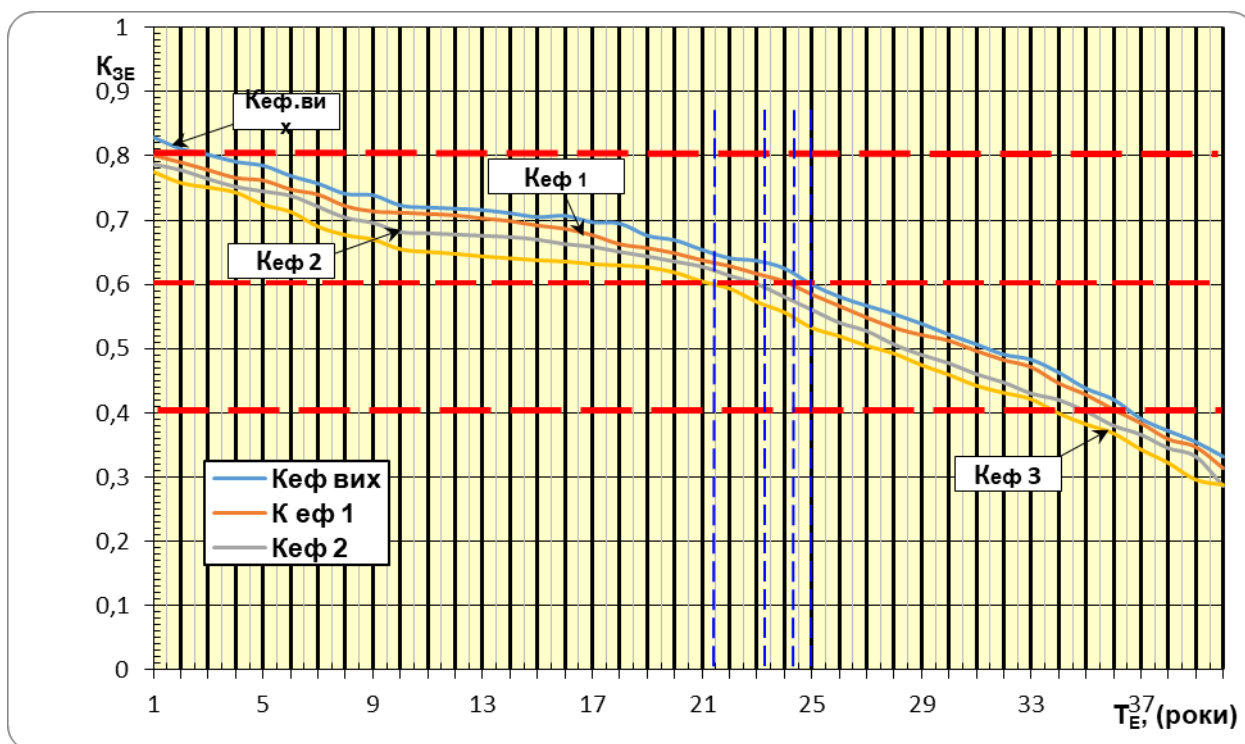


Рис. 4.16. Графік залежності коефіцієнту збереження ефективності комплексу обладнання від показника безвідмовності виробу 2 за умови $T_{oi}^{\delta x_4}(t) = f(x_{4i} + \delta x_{4i})$

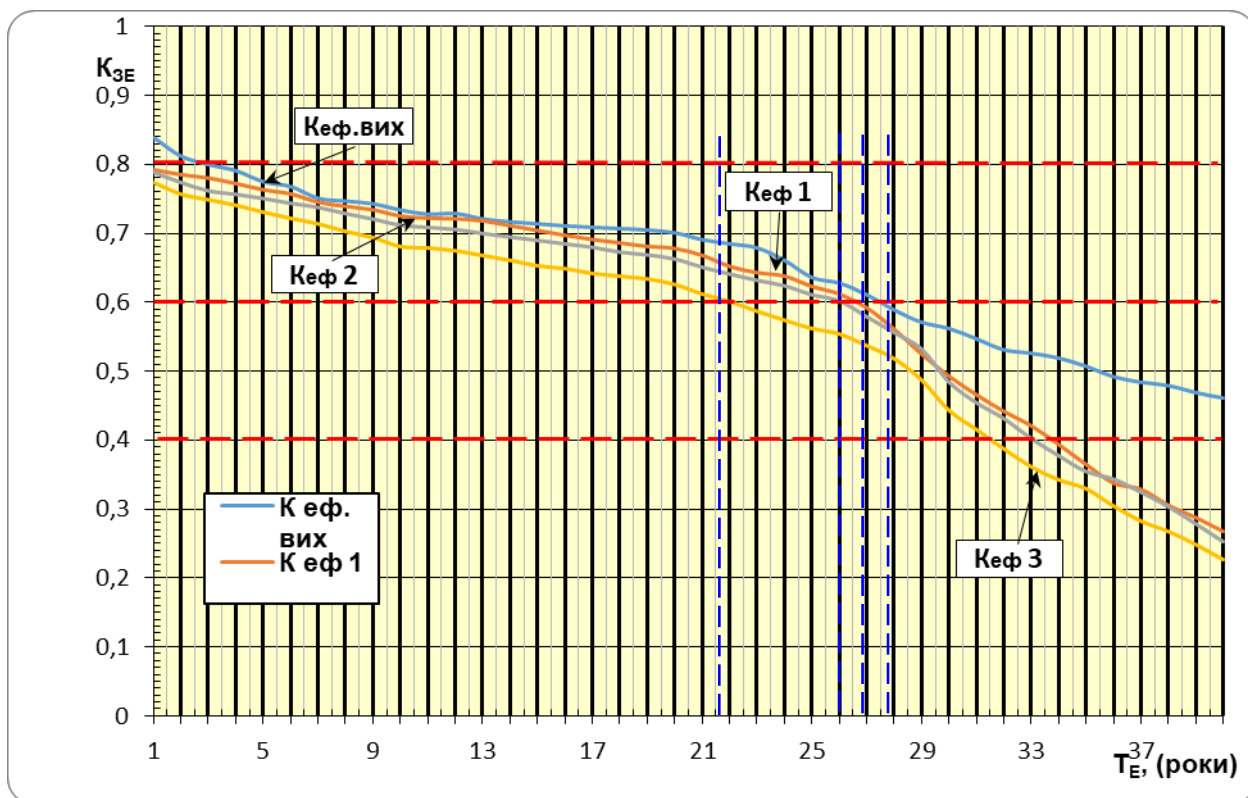


Рис. 4.17. Графік залежності коефіцієнту збереження ефективності комплексу від показника безвідмовності виробу 1 за умови $T_{oi}^{\delta x_1}(t) = f(x_{1i} + \delta x_{1i})$

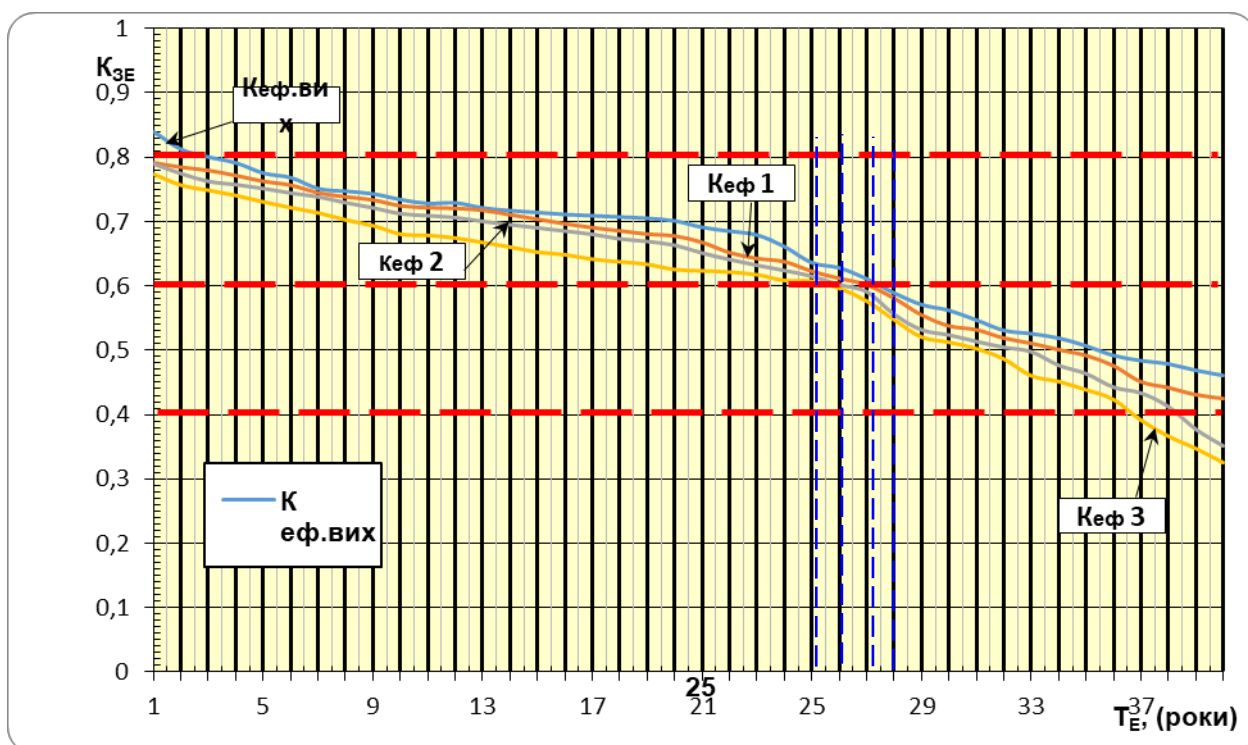


Рис. 4.18. Графік залежності коефіцієнту збереження ефективності комплексу від показника безвідмовності виробу 1 за умови $T_{oi}^{\delta x_2}(t) = f(x_{2i} + \delta x_{2i})$

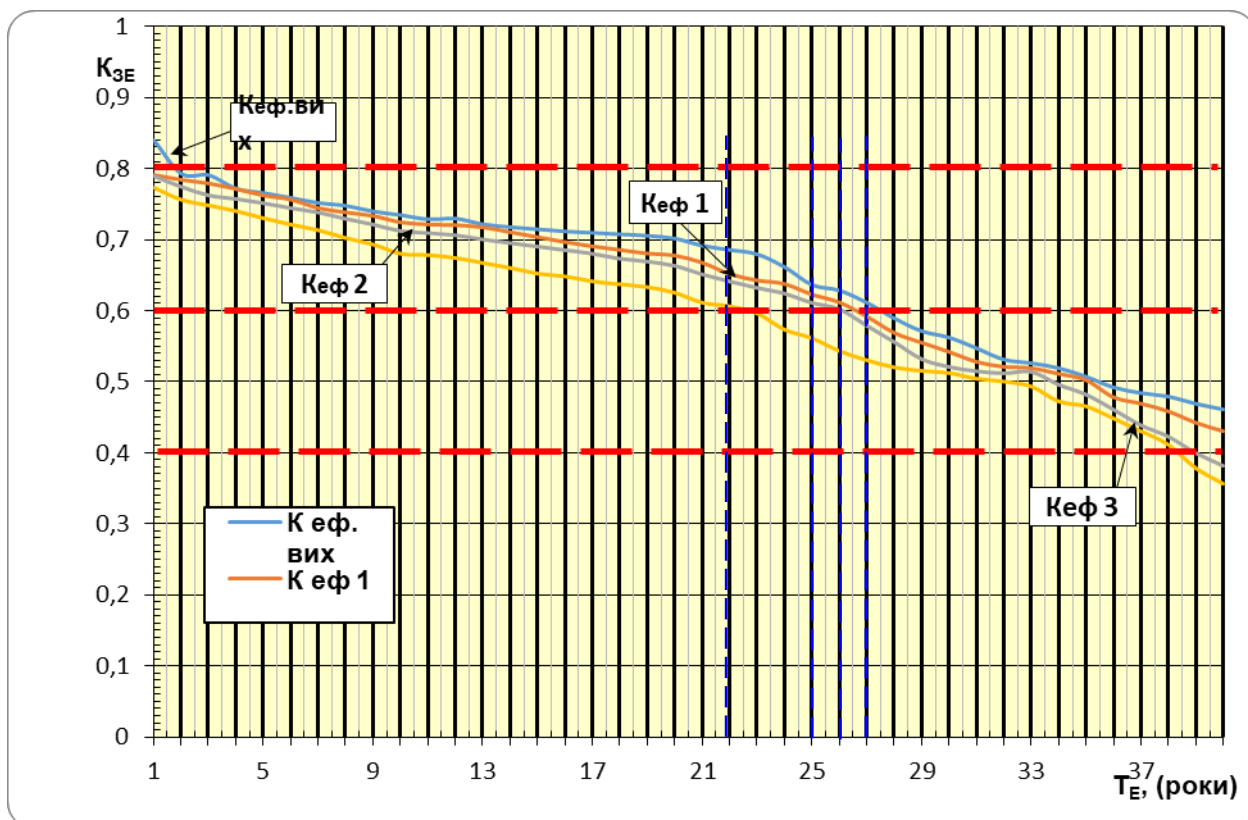


Рис. 4.19. Графік залежності коефіцієнту збереження ефективності комплексу від показника безвідмовності виробу 1 за умови $T_{oi}^{\delta x_3}(t) = f(x_{3i} + \delta x_{3i})$

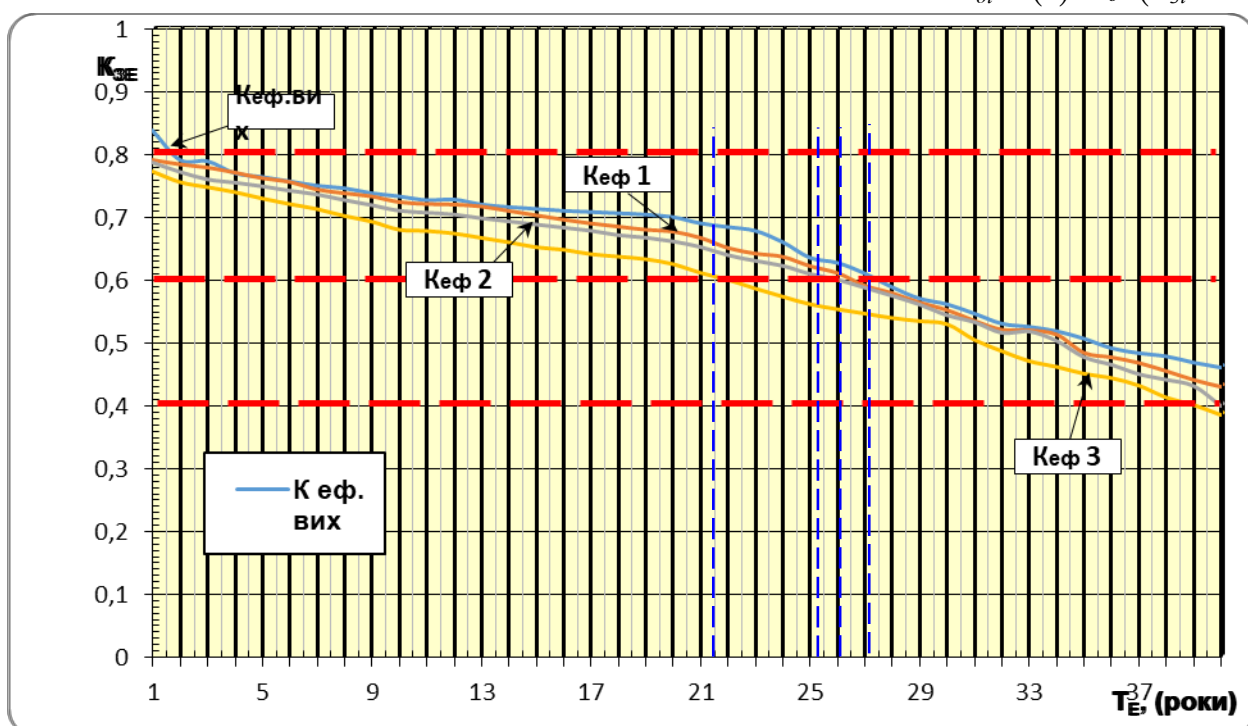


Рис. 4.20. Графік залежності коефіцієнту збереження ефективності комплексу обладнання від показника безвідмовності виробу 1 за умови

$$T_{oi}^{\delta x_4}(t) = f(x_{4i} + \delta x_{4i})$$

4.2. Рекомендації щодо використання методу прогнозування довговічності обладнання при переведенні на експлуатацію за технічним станом

4.2.1. Розробка рекомендацій щодо використання методу прогнозування довговічності обладнання при експлуатації за технічним станом. Проведені дослідження дозволяють сформулювати рекомендації науково-технічного та організаційного характеру.

1. Для вирішення завдання переведення комплексів обладнання ЗРМТ на експлуатацію за технічним станом при проведенні розширеного контролю граничного стану з метою прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) доцільно використовувати апарат МГУА. Застосування даного методу прогнозування дозволяє моделювати процеси змін показників надійності складних технічних систем за обмежено малою вибіркою експериментальних даних в умовах невизначеності.

2. Для оцінки динаміки змін показників надійності (безвідмовності) комплексів обладнання ЗРМТ та його комплектуючих засобів, на яких виконаний середній ремонт за технічним станом, з метою підтвердження вимог до показників довговічності доцільно застосувати розроблений методичний апарат, який дозволить вирішити задачу розрахунковим шляхом без проведення спеціальних випробувань, пов'язаних з витратою технічних і матеріальних ресурсів.

3. Застосування методу на практиці дозволяє обґрунтовано підходити до вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів) при експлуатації за технічним станом, розробки перспективного плану експлуатації і ремонту обладнання ЗРМТ із урахуванням процесів зміни рівня його довговічності.

4. Достовірність отриманих значень показників довговічності зразків обладнання ЗРМТ на етапах приймально-здавальних випробувань,

підконтрольної експлуатації та випробувань на надійність підтверджується високим рівнем якості прогнозу, для чого рекомендується виконати наступні операції :

а) Використання достатнього об'єму випробувань, що дозволяє забезпечити пошук найбільш точної математичної моделі процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) комплексів обладнання.

б) Використання раціонального способу розподілу експлуатаційних спостережень на вибірки з метою отримання достовірних оцінок показника надійності в умовах обмеженої кількості даних експлуатаційних спостережень.

в) Розрахунок закономірностей процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) комплексів обладнання за достатнім обсягом випробувань.

г) Розширення базису аргументів моделей, які розраховуються, при невідповідності отриманої моделі цілям дослідження.

5. Проведені дослідження показують, що між витратою ресурсів і термінами служби існує певний взаємозв'язок. За результатами аналізу динаміки змін надійності та витратою ресурсу комплексів обладнання, на яких виконаний середній ремонт за технічним станом, та результатами прогнозування отримані значення пропонованих термінів служби и ресурсів експлуатації, що рекомендуються до середнього ремонту за технічним станом та річних норм витрати ресурсу, які представлені в табл.4.9.

Таблиця 4.9

Пропоновані терміни служби (ресурси) комплексів обладнання та його підсистем

Показники довговічності	Підсистема КО			
	КО	1	2	3
Термін служби до чергового СР, роки	6,0	6,25	6,0	6,50
Ресурс до чергового СР, години	3900	4000	3900	2600
Річні норми витрати ресурсу, години	650	650	650	400

Такий підхід дозволяє за результатами приймально-здавальних випробувань, підконтрольної експлуатації та випробувань на надійність виробити рекомендації щодо встановлення індивідуальних значень показників довговічності для конкретного комплексу обладнання або ЗРМТ в цілому.

6. Кількісні значення показників надійності комплексів обладнання та його підсистем повинні задаватися в “Програмі технічного обслуговування і ремонту ЗРМТ” з урахуванням їх можливих станів стосовно окремих етапів експлуатаційного циклу і відповідати заданому рівню в визначених умовах. Необхідною умовою є завдання в НТД мінімально допустимого значення величини випереджувальних допусків параметрів, при досягненні яких виріб підлягає відновленню та гранично допустимих показників надійності після закінчення терміну служби (ресурсу) ЗРМТ.

7. В якості гранично допустимого значення показника надійності після закінчення призначеного (гранично-нормативного) терміну служби (ресурсу) комплексів обладнання рекомендується прийняти рівень безвідмовності, відповідний величині середнього наробітку на відмову $T_0=8,8$ годин, встановленого для даного комплексу обладнання після проведення середнього ремонту за технічним станом.

8. За результатами проведення підконтрольної експлуатації та випробувань на надійність з появою нової інформації про надійність комплексів обладнання необхідно проводити адаптацію коефіцієнтів моделей з метою корегування нормативних документів, що регламентують порядок експлуатації ЗРМТ, в т.ч. призначені (гранично допустимі) терміни служби (ресурси).

9. Після закінчення призначеного терміну служби або гранично-нормативного терміну експлуатації комплексів обладнання, на якому виконаний середній ремонт за технічним станом, пропонується продовжувати зазначені терміни через кожен рік за умови, якщо значення

показника безвідмовності комплексів обладнання останнього року експлуатації складає $T_0 \geq 8,8$ годин.

10. Результати розрахунків указують на істотний вплив інтенсивності експлуатації (витрати ресурсів) на показники довговічності комплексів обладнання, при цьому при збільшенні сумарного наробітку значення показника безвідмовності, яке розраховувалось у деякі періоди експлуатації, не збільшується, а навіть навпаки, зменшується. Зниження інтенсивності експлуатації в певних межах не приводить до збільшення терміну служби, оскільки відбувається прискорення процесів старіння.

4.2.2. Техніко-економічна оцінка рекомендацій щодо продовження призначених термінів служби (ресурсів) комплексів обладнання ЗРМТ при переведенні на експлуатацію за технічним станом. Для проведення техніко-економічної оцінки рекомендацій щодо продовження призначених термінів служби (ресурсів) комплексів обладнання при переведенні на експлуатацію за технічним станом необхідно порівняти витрати, які необхідні для забезпечення виконання задач за призначенням комплексами обладнання в умовах регламентованої стратегії ТО і Р та відповідними зразками після переведення на ЕТС з урахуванням запропонованих рекомендацій. Визначене економічний ефект запропонованих рекомендацій.

В даному випадку величина ΔE економічного ефекту [31] дорівнює

$$\Delta E = C_{\text{в.з.і}} - C_{\text{в.з.н}}, \quad (4.14)$$

де $C_{\text{в.з.і}}$ – вартість виконаної типової задачі існуючим зразком в умовних одиниць (у.о.);

$C_{\text{в.з.н}}$ – вартість виконаної типової задачі покращеним зразком (у.о.).

Якщо $\Delta E \geq 0$, то удосконалення доцільно, якщо $\Delta E \leq 0$, то необхідно прийняти інші рішення. Величина економічного ефекту через інші показники знаходиться наступним чином

$$\Delta E = C_{\epsilon_i} n_{\epsilon_i} - C_{\epsilon_n} n_{\epsilon_n}, \quad (4.15)$$

де $C_{\epsilon_i}, C_{\epsilon_n}$ – вартість одиничного циклу корисної роботи існуючого і покращеного зразка, у.о.;

$n_{\epsilon_i}, n_{\epsilon_n}$ – кількість циклів корисної роботи, що необхідні для виконання типової (умовної) задачі існуючого і покращеного зразка, у.о.

В загальному випадку в якості показника приведених витрат одиниці продукції (роботи) Z приймається

$$Z = C + E_n K, \quad (4.16)$$

де C – собівартість одиниці продукції (роботи), у.о.;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладів ($E_n = 0,15$);

K – щільні капітальні вклади в виробничі фонди, у.о.

Дані розрахунки більш доцільні у випадку, коли мова йде про створення нових агрегатів, систем, що спрямовані на модернізацію комплексів обладнання в аспектах підвищення ефективності і їх цілком можна застосовувати для економічної оцінки модернізації чи створення ЗРМТ в цілому. Однак, для економічної оцінки ефективності проведення відновлювальних робіт з метою забезпечення нормативного рівня надійності слід виходити з наступних міркувань.

Необхідно визначити вартість покращеного (відновленого) комплексу обладнання

$$C_{\epsilon_n} = C_{\epsilon_n} + \frac{C_n - C_i}{R} + \frac{C_{окр} + C_{осн}}{NR}, \quad (4.17)$$

де $C_{окр}$ – вартість спеціальних НДР і ОКР, у.о.;

$C_{осн}$ – вартість оснащення виробництва, у.о.;

N – об'єм, що передбачається програмою випуску, виробів покращеної якості (відновлених), шт.;

R – технічний ресурс комплексу обладнання, год.

Тоді економічний ефект для виробника, користувача буде представлений наступними формулами [2]:

$$\Delta E = C_{\epsilon_i} n_{\epsilon_i} - n_{\epsilon_n} \left(C_{\epsilon_i} + \frac{C_n - C_i}{R} + \frac{C_{окр} + C_{осн}}{NR} \pm \frac{\Delta C_e}{R} \right), \quad \text{де } \Delta C_e \text{ – збільшення}$$

$$\text{експлуатаційних витрат, у.о.,} \quad \Delta E = n_{\epsilon_n} \left[C_{\epsilon_i} \left(\frac{n_{\epsilon_i}}{n_{\epsilon_n}} - 1 \right) \pm \frac{\Delta C_e}{R} \right] - n_{\epsilon_n} \left(\frac{C_n - C_i}{R} + \frac{C_{окр} + C_{осн}}{NR} \right);$$

$$\Delta E_{кор} = n_{\epsilon_n} \left[C_{\epsilon_i} \left(\frac{n_{\epsilon_i}}{n_{\epsilon_n}} - 1 \right) \pm \frac{\Delta C_e}{R} \right]; \quad \Delta E_{виг} = n_{\epsilon_n} \left(\frac{C_n - C_i}{R} + \frac{C_{окр} + C_{осн}}{NR} \right), \quad \text{тоді}$$

$\Delta E = \Delta E_{кор} - \Delta E_{виг}$, де $\Delta E_{кор}$ – ефект користувача, в якості якого виступає одна з служб, що користується; $\Delta E_{виг}$ – ефект виробника, що характеризують додаткові витрати, які здійснюються в промисловості і пов'язаними з проведенням відновлювальних робіт на комплексах обладнання.

Крім того, ефект передбачає не тільки економічні витрати, а в першу чергу ймовірність забезпечення безвідмовної роботи комплексів обладнання, що в кінцевому випадку підвищить ймовірність успішного виконання завдань ЗРМТ. Аналізуючи досвід робіт на комплексах обладнання, а також враховуючи рекомендації з оцінки динаміки собівартості ЗРМТ можливо передбачати, що збільшення вартості робіт, яка прогнозується, буде складати 15...25% від вартості C_{ϵ_n} відновленого зразка.

Економічна доцільність витрат на проведення відновлювальних робіт визначається за формулою $\frac{\Delta G(t)}{\Delta C} \geq 0$, де $\Delta G(t)$ – частина відвернутих втрат, що вдалося попередити за час експлуатації t , у.о.; ΔC – витрати на проведення відновлювальних робіт.

Для дослідження впливу впроваджених методів та режимів технічного обслуговування і ремонту на ефективність процесу технічної експлуатації застосовують комплексний показник надійності – коефіцієнт технічного використання $K_{\text{тв}}$, який дорівнює відношенню математичного МСП часу перебування об'єкта у працездатному стані за деякий період експлуатації $M(T_0)$ до суми МСП часу перебування об'єкта в працездатному стані та сумарного часу простоїв на всіх видах профілактичних та ремонтних робіт

$$K_{\text{тв}} = \frac{M(T_0)}{M(T_0) + M(T_{\text{пр}})}, \quad (4.18)$$

де $M(T_{\text{пр}})$ – сума МСП часу простою об'єкта на технічних обслуговуваннях, під час проведення доробок, ремонтів, усунення несправностей тощо.

В подальшому, під час дослідження системи ТО і Р з урахуванням запропонованих рекомендацій здійснюється обробка статистичних даних щодо часу знаходження в експлуатації при зміні стратегій експлуатації та обмеження ремонту ЗРМТ, що не досягло граничного стану.

Враховуючи відомі вартісні показники проведення відновлювальних робіт та операцій ТО комплексів обладнання розраховане економічний ефект переведення комплексів обладнання на використання стратегії експлуатації за технічним станом, в тому числі і з залученням бригад контрольно-відновлювальних робіт (КВР), які працюють безпосередньо на судні.

Отримані результати свідчать про фактичне збільшення коефіцієнта технічного використання при зміні стратегії експлуатації з регламентованої

на експлуатацію за технічним станом. Відмінність $K_{\text{тв}}$ при ЕТС з використанням бригад КВР полягає в тому, що ремонт бригадами КВР проводиться на судні і фактично час знаходження ЗРМТ в непрацездатному стані залежить лише від часу знаходження в ремонті комплексів обладнання.

При проведенні ремонту за технічним станом на обмеженій кількості виробів витрати на проведення ремонту зменшуються, але збільшуються витрати на проведення поточного ремонту. При цьому, при впровадженні експлуатації за технічним станом вартість відновлювальних робіт близько у 2,5 разів менше вартості відновлювальних робіт при регламентованій стратегії ТО і Р. Отримані результати свідчать про доцільність використання бригад КВР для проведення відновлювальних робіт, вартість яких близько у 3 рази менше вартості відновлювальних робіт при регламентованій стратегії ТО і Р, та залежить лише від вартості матеріалів та комплектуючих.

Висновки до розділу 4

1. Проведена оцінка показників довговічності комплексів обладнання при експлуатації за технічним станом з використанням розробленого методичного апарату на базі математичних моделей, отриманих за допомогою методу групового урахування аргументів, які дозволяють досліджувати процеси зміни технічного стану (рівня безвідмовності) комплексів обладнання з наступною оцінкою якості прогнозу.

2. На базі розроблених математичних моделей вирішені завдання, які підтверджують на практиці можливість застосування розроблених методик на етапах приймально-здавальних випробувань, підконтрольної експлуатації та випробувань на надійність:

обґрунтовані терміни служби (ресурси) до чергових відновлювальних робіт (середнього ремонту за технічним станом) комплексів обладнання ЗРМТ;

дана оцінка впливу експлуатаційних факторів та досліджена динаміка їх впливу на зміну технічного стану (рівня безвідмовності) комплексів обладнання.

3. За результатами розрахунків визначено, що найбільший внесок в процес зміни рівня технічного стану (рівня безвідмовності) комплексів обладнання ЗРМТ робить тривалість експлуатації. При цьому зниження інтенсивності експлуатації (практична відсутність витрачання експлуатаційних ресурсів) не приводить до помітного збільшення терміну служби комплексів обладнання в зв'язку з прискоренням деградаційних процесів його фізичного старіння.

4. Розроблені рекомендації по застосуванню результатів дослідження в якості складової науково-методичного забезпечення впровадження експлуатації за технічним станом комплексів обладнання, які розробляються або експлуатуються, а також для розробки нормативних документів, що регламентують порядок їх подальшої експлуатації.

ВИСНОВКИ

В результаті дисертаційних досліджень, виконаних авторкою, вирішено нове актуальне наукове завдання удосконалення моделей та методів прогнозування довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів). Дане наукове завдання має важливе значення для теорії і практики підвищення ефективності транспортної техніки, встановлення закономірностей змінювання параметрів довговічності комплексів обладнання та комплектуючих підсистем у процесі експлуатації, впровадження методів вирішення завдань продовження призначених термінів служби. Відсутність аналогічних рішень в нашій країні і за кордоном робить результати досліджень пріоритетними.

На підставі проведених досліджень зроблені наступні висновки:

1. Доведено, що на теперішній час активне виконується державне завдання інтенсивного економічного, соціального розвитку країни та її участі в міжнародній інтеграції. Значна роль в цьому відводиться транспортної галузі, а саме, морським та річним перевезенням. Дослідження аварійності на річковому та морському транспорті показали, що не зважаючи на щорічні коливання її показника у сторону значного росту або зниження, загальний стан аварійності на водному транспорті в Україні продовжує залишатися на високому рівні. За офіційними даними за 2019 рік технічні причини аварійності складають 23% (неналежна організація виконання правил технічного обслуговування і експлуатації та ін.) а це підкреслює актуальність теми дослідження.

2. Аналіз існуючого парку комплексів обладнання ЗРМТ та деградаційних процесів зміни технічного стану його зразків, системи технічної експлуатації та її впливу на ефективність водного транспорту, існуючих науково-методичних підходів до прогнозування технічного стану

показав, що сучасний етап експлуатації характеризується перебуванням в експлуатації обладнання, яке практично вичерпале призначені розробником і виробником терміни служби (ресурси), існуючою регламентованою системою їх ТО і Р, малою чисельністю парку однотипних комплексів, відсутності статистичних даних щодо моментів переходу обладнання ЗРМТ у граничний стан, обмеженими можливостями підприємств промислового комплексу щодо проведення усіх видів відновлювальних робіт. Отримані результати дозволили визначити основні недоліки та відмінності стратегій технічного обслуговування і ремонту та окреслити основні шляхи і перспективи щодо їх застосування для відповідних зразків обладнання ЗРМТ.

3. На основі узагальнення досвіду застосування регламентованої стратегії технічного обслуговування і ремонту визначена неможливість підтримання нормативного рівня технічної готовності існуючого парку комплексів обладнання ЗРМТ через обмежені виробничі можливості організацій-експлуатантів і виробничі потужності ремонтних підприємств промисловості.

4. Дослідження виявили низку недоліків, невідповідностей та протиріч у теорії і практиці підтримання засобів водного транспорту в належному стані та визначили основне протиріччя між існуючим постійним зниженням показників надійності обладнання ЗРМТ (в першу чергу в зв'язку з експлуатацією поза межами призначених термінів служби) і зростаючим рівнем вимог до галузі водного транспорту за результатами вивчення існуючих стратегій технічного обслуговування і ремонту та можливостей їх застосування.

5. Доведено те, що актуальність роботи пов'язана з необхідністю визначення фактичного рівня надійності комплексів обладнання ЗРМТ в сучасних умовах експлуатації з метою науково-методичного забезпечення вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів) як на рівні вирішення наукового завдання, так і перевіреними в реальній дійсності обґрунтованих рекомендацій. В практичній сфері це призводить до

недостатньої інформаційної основи та виключає можливість підтримання нормативного рівня ефективності обладнання ЗРМТ при переведенні на експлуатацію за технічним станом. Це в сукупності складає зміст наукового завдання, що має суттєве значення для науки і практики та полягає в удосконаленні моделей та методів прогнозування довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом.

6. Дослідження дозволило теоретичне обґрунтувати можливості застосування МГУА для вирішення завдання оцінки технічної справності обладнання ЗРМТ шляхом аналізу процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) його комплектуючих. На його основі сформована процедура побудови математичних моделей, що описують процес зміни технічного стану (рівня безвідмовності) обладнання ЗРМТ з урахуванням прямого впливу визначених експлуатаційних факторів (тривалість експлуатації, сумарний наробіток, сумарна кількість увімкнень).

7. Процедура побудови математичної моделі процесу зміни технічного стану (рівня безвідмовності) під час експлуатації обладнання ЗРМТ розширює відомі аналогічні процедури, в якій, та на відміну від них:

передбачено врахування нерівноточних результатів оцінювання показника безвідмовності в якості вихідних даних для побудови моделей за результатами експлуатаційних спостережень;

передбачено врахування залежності дисперсії похибки прогнозу від способу розподілу експлуатаційних спостережень на вибірки, що дозволяє отримати достовірні оцінки показника безвідмовності в умовах обмеженої кількості даних експлуатаційних спостережень;

запропоновано побудову множинної регресійної моделі, що описує залежність зміни рівня безвідмовності від сукупності параметрів, які характеризують режими експлуатації об'єктів, з поетапним застосуванням комбінованого критерію та критерію здатності, що передбачає, які достатньо апробовані при вирішенні задач подібного класу, та забезпечують вирішення задачі середньострокового прогнозування.

8. В методі прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання ЗРМТ з використанням результатів експлуатаційних спостережень на відміну від існуючого передбачено врахування залежності похибки прогнозу від способу розподілу експлуатаційних спостережень на вибірки, а також, при порівняльному використанні алгоритмів методу групового урахування аргументів запропоновано використовувати лінійну множинну регресійну модель для отримання достовірних оцінок показника довговічності в умовах використання обмеженої кількості вихідних даних при вирішенні завдань середньострокового прогнозування.

9. В методі оцінки показників довговічності комплексів обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів) на відміну від існуючого передбачено врахування залежності ефективності обладнання ЗРМТ від зміни технічного стану його комплектуючих підсистем, для здійснення оцінки показників довговічності комплексу обладнання ЗРМТ з урахуванням ієрархічно розгалуженої структурної схеми його побудови.

10. Дослідження показує, що застосування запропонованих моделей і методів дозволяє підвищити достовірність прогнозу показників довговічності комплексів обладнання ЗРМТ до 12 %. Під час аналізу одержаних результатів встановлено, що прогнозовані залишкові терміни служби до середнього ремонту за технічним станом комплексів обладнання знаходяться в інтервалі 4,50...6,50 років, при невиконанні якого прогнозований залишковий термін служби виробу до списання може складати 7,25...7,75 років.

11. Таким чином, *мета дослідження* щодо підвищення ефективності управління технічною експлуатацією обладнання ЗРМТ через розробку та впровадження моделей і методів прогнозування показників довговічності відповідних зразків *досягнута* і всі часткові завдання вирішені повністю.

12. Наукові результати досліджень є внеском в розвиток наукових і методологічних основ підвищення ефективності прогнозування технічного

стану транспортної техніки, встановлення закономірностей змінювання параметрів технічного стану у процесі експлуатації, впровадження методів підвищення достовірності прогнозу показників довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом, що забезпечують високу ефективність їх використання та надійність роботи, а також внеском в теорію автоматизованих систем контролю та прогнозування технічного стану даних засобів.

13. Основні результати дисертаційних досліджень можуть бути використані дослідно-конструкторськими організаціями та підприємствами при розробці або удосконаленні програмних засобів автоматизованих систем прогнозування технічного стану засобів річкового та морського транспорту.

14. Напрямами подальших досліджень у зазначеній галузі можуть бути ті, які стосуються створення та модифікація ерготичних інтелектуальних систем для автоматизації прогнозування технічного стану засобів річкового та морського транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамов О.В. Контроль и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения. *Надежность и качество сложных систем*. 2018. № 4 (24). С. 108–115.
2. Абрамов О.В., Розенбаум, А.Н. Прогнозирование состояния технических систем. Москва: Наука, 1990. 126 с.
3. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей. Москва: Финансы и статистика, 1985. 487 с.
4. Акаике Х. Развитие статистических методов / В кн. Современные методы идентификации систем. – М.: Мир, 1983. – С.148 –176.
5. Александров В.В. Алгоритмы и программы структурного метода обработки данных. / В.В. Александров, Н.Д. Горский. – Л. : Наука, 1983. – 208 с.
6. Анализ надёжности технических систем по цензурированным выборкам / [Скрипник В.М., Назин А.Е., Приходько Ю.Г., Благовещенский Ю.Н.]. – М.: Радио и связь, 1988. – 184 с.
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 12.06.2019).
8. Анучин О. Н. Емельянцев Т.Н. Интегрированные навигационные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. Санкт-Петербург: Государственный Научный Центр Российской Федерации. 1999. 357 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/126419/> (дата звернення 12.12.2019).

9. Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Ф. Байхельт, П. Франкен; пер. с нем. В.А. Каштанов – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
10. 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.
11. 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.
12. Баранов Г.Л., Тихонов І.В. Ефективність інтелектуалізації інтегрованих систем навігації і управління рухомими транспортними засобами. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2010. Вип. 1 С. 13-20.
13. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. – М.: Высшая школа, 1982. – 231 с.
14. Барлоу Р. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Р. Барлоу, Ф. Прошан ; пер. с англ. И. А. Ушакова. – М.: Наука, 1985. – 328 с.
15. Беллман Р. Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях: сборник переводов. Москва: Мир, 1976. С. 172-215.
16. Белов П. Г. Запорожченко Ю. Ф. Сущность и методы прогнозирования техногенного риска. *Вісник КМУЦА*. 1999. №1. С. 260–264.
17. Бень А.П. Методы оценки опасности траектории движения судов в системах поддержки принятия решений. *Вестник ХНТУ*: сб. науч. трудов Херсонского национального технического университета. 2009. Вип. 1 (34). С. 429-433.

18. Бенькович Е. С. Колесов Ю. Б., Сениченков Ю. Б. Практическое моделирование динамических систем: учебное пособие. Петербург, 2002. 464 с.
19. Боглаев Ю. П. Вычислительная математика и программирование: учебное издание. Москва: Высшая Школа, 1990. 546 с.
20. Богом'я В. І., Коломієць О. М. Методи підвищення ефективності процесу експлуатації суднових комплексів. *Новітні технології*. 2017. Вип. 1(3). С. 42–48.
- 21. 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.**
- 22. Бойко С.О. Методи прогнозування довговічності обладнання засобів річкового та морського транспорту в умовах експлуатації за технічним станом. Slovak international scientific journal. 2020. Vol.1. No.36. pp.50-58.**
- 23. Бойко С.О., Михайлова Т.І., Шевченко А.П. Спосіб прогнозування відмов агрегатів суднових комплексів за даними експлуатаційних спостережень. Новітні технології. 2019. Вип.1(8). С.52–58.**
24. Бокс Дж.. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. / Дж. Бокс, Г. Дженкинс; пер. с англ. /под ред. В. Ф. Писаренка. – М.: Мир, 1974. – 408 с.
25. Бусленко Н.П. Лекции по теории сложных систем / Н.П. Бусленко, В.В. Калашников, И.Н. Коваленко. – М.: Советское радио, 1973. – 440 с.
26. Вагущенко Л. Л. Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судна: учебное пособие. Одесса: Латстар, 2002. 310 с.
27. Вагущенко Л. Л., Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судна: учебное пособие. 3-е издание перераб.и доп. Одесса: Феникс, 2007. 376 с.

28. Вальд А. Последовательный анализ. – М.: Гос. изд. физ.-математ. лит., 1960. – 330 с.
29. Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. – М.: Глав. ред. физ.-мат. лит. издательства «Наука», 1979. – 448 с.
30. Вентцель Е.С. Исследование операций. Москва: Советское радио, 1972. 552 с.
31. Вучков И. Прикладной линейный регрессионный анализ. / И. Вучков, Л. Бояджиева, Е. Солаков. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 239 с.
32. 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.
33. Гадасин В.А. Надежность сложных информационно-управляющих систем. / В.А. Гадасин, И.А. Ушаков. – М.: Сов. радио, 1975. – 192 с.
34. Гадасин В.А. Оценка эффективности иерархических систем с равноправными объектами с учетом надежности / В.А. Гадасин // *Техническая кибернетика*. – 1976. – № 6. – С. 108 – 113.
35. Гаранов М. Ю., Шепета Ю. Н., Лебедев А. Е. Технология интегрирования оборудования рулевой рубки скоростных судов. *Морские информационно-управляющие системы*. 2014, № 1 (4). С. 112 – 115.
36. Гаскаров Д. В. Истомин Е. П., Кутузов О. И. Сетевые модели распределенных автоматизированных систем. Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 1998. 353 с.
37. Гаскаров Д.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры / Д.В. Гаскаров, Т.А. Голинкевич, А.В. Мозгалеvский. – М.: “Советское радио”, 1974. – 224 с.
38. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.

39. Горбань І. І. Теорія ймовірностей і математична статистика для наукових працівників та інженерів . Київ : НАНУ. ІПММС. 2003. 244 с.
40. 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.
41. Груверман А. Технология создания мостиковых систем с применением интеграторов информации от разнородных датчиков. Алгоритмы распределенной обработки и регистрации полученных данных. *Управление и диагностика технических средств для судов различной класса автоматизации ЗАО «Транзас»*. URL: <https://docplayer.ru/31427735-Tehnologiya-sozdaniya-mostikovyh-sistem-s-primeneniem-integratorov-informacii-ot-raznorodnyh-datchikov.html> (дата звернення: 19.02.2019).
42. **Дакі О.А., Бойко С.О. Математична модель функціональних систем суднових комплексів. Водний транспорт. 2020. Вип.1(29). С.124–131.**
43. **Данік О.В., Бойко С.О. Особливості багатокритеріальної оптимізації структури системи навігації та управління судном. Міжнародна науково-практична конференція «Водний транспорт: сучасний стан та перспективи розвитку»: тези доповідей, 16-17 травня 2019 року. К.: ДУІТ, 2019. С.381-382.**
44. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии. / Евгений Зямович Демиденко. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.
45. Довідник кваліфікаційних характеристик професій працівників. «Водний транспорт». Розділ «Морський транспорт». Міністерство транспорту України. 2002. Вип.67. 128 с.

46. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. URL: <https://www.twirpx.com/file/2414014/> (дата звернення: 03.07.2019).
47. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. URL: https://dnaop.com/html/2273/doc_2860-94 (дата звернення: 03.07.2019).
48. 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 12.12.2019).
49. Захаров И. Г. Проблемы комплексирования и интеграции боевых систем и технических средств при создании кораблей нового поколения. *Морская радиоэлектроника*. 2006. №3(17).
50. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. / Алексей Григорьевич Ивахненко. – К. : Наук. думка, 1982. – 296 с.
51. Ивахненко А.Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Юрачковский. – М.: Радио и связь, 1987. – 120 с.
52. Ивахненко А.Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей. / А.Г. Ивахненко, Й.А. Мюллер. – К.: Техника, 1985. – 221 с.
53. 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).
54. Качинский А. Б. Засады системного анализу безпеки складних систем. Киев: ДП «НВЦ» Євроатлантикінформ, 2006. 336 с.
55. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. Москва: Радио и связь, 1990. 544 с.
56. Колегаев Р.Н. Определение оптимальной долговечности технических систем. – М.: Советское радио, 1967. – 112с.

57. Коломієць О. М., Тимошук О. М., Данік О. В. Выбор показателей надежности с учетом интенсивности эксплуатации судна. *Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy*. 2017. №2. С. 90–95.
- 58. Коломієць О.М., Шевченко А.П., Бойко С.О. Методи автоматизації контролю технічного стану засобів водного транспорту у різноманітних умовах експлуатації. Всеукраїнська інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Технічні науки в Україні: сучасні тенденції розвитку»: тези доповідей, 20-21 листопада 2019 року. – К.: ДУІТ, 2019. С.121-123.**
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. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы: построение и анализ. Москва: МЦМНО, 1999. 960 с.
62. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. Москва: Мир, 1978. 402 с.
63. Критерій оптимальності процесу технічного обслуговування суднових комплексів/ Тимошук О.М., Коломієць О. М., Дакі О.А., Трофименко І.В. *Наука і техніка Повітряних сил Збройних сил України*. 2017. №4(29). С.132–136.
64. Крыжановский Г. А., Купин В. В., Плясовских А. П. Теория транспортных систем: учебное пособие / под ред. Г. А. Крыжановского. С. Петербург, 2008. 208 с.
65. Кудрицька Н.В. Транспортнодорожній комплекс України: сучасний стан, проблеми та шляхи розвитку: монографія. Киев: НТУ, 2010. 338 с.

66. Кузнецов О. П., Адельсон-Вельский Г. М. Дискретная математика для инженера. Москва, 1988. 480 с.
67. Кунцевич В. М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. Киев: Наукова думка, 2006. 264с.
68. Ланецкий Б.Н. Адаптивное управление техническим состоянием и надежностью сложных технических систем в условиях ресурсных ограничений / Б.Н. Ланецкий, В.В. Лукьянчук // Системи озброєння і військова техніка. – Вип. 2 (26). – Х.: ХУ ПС. – 2011. – С. 149 – 151.
69. Левин Б.Р. Теория надежности радиотехнических систем (математические основы): Учебное пособие для вузов. / Борис Романович Левин. – М.: Сов. радио, 1978. – 264 с.
70. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. Санкт- Петербург: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
71. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М.: ГИФМЛ, 1962. – 350 с.
72. 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 12.12.2019).
73. Максимей И. В. Имитационное моделирование на ЭВМ. Москва: Радио и связь, 1988. 232 с.
74. Маринов М. Л., Клименко В. Д. Учет человеческого фактора в аварийных ситуациях на море. Эксплуатация морского транспорта. 2008. № 2. С. 25-29.
75. Моделювання та оптимізація інформаційних систем в судноводінні: підручник / Кравченко Ю.В. та ін., за ред. О.М. Тимошук. Київ :ДУІТ, 2019, 312 с.
76. Мусорін О. О. Методи підвищення ефективності засобів й систем навігаційного обслуговування вантажних суден необмеженого району

- судноплавания: дис... к-та техніч. наук : 05.22.13/ ДП «УНДНЦ ПССЯ». Київ, 2017. 187 с.
77. Навігаційне забезпечення управління рухом суден : навчальний посібник / Богом'я В.І. та ін. Київ :ДВВП «Компас», 2012, 336 с.
 78. Надежность в технике. Интервальная оценка надежности технического объекта по результатам испытаний составных частей. Общие положения: РД 50-476:84. – [Введен с 1986-01-01]. – М.: Изд. Стандартов, 1985. – 34 с.
 79. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным: РД 50-690:89. – [Введен с 1991-01-01]. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 132 с.
 80. Надежность в технике. Общие правила классификации отказов и предельных состояний : РД 50-699:90. – [Введен с 1992-01-01]. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 12 с.
 81. Надежность и эффективность в технике: справочник в 10 т. / [Ред. совет: В.С. Авдуевский (пред.) и др.]. – М.: Машиностроение, 1990. – Т.8: Эксплуатация и ремонт / [Под ред. В.И. Кузнецова и Е.Ю. Барзиловича]. – 1990. – 320 с.
 82. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. / [Ред. совет: В.С. Авдуевский (пред.) и др.]. – М.: Машиностроение, 1987. – Т. 2: Математические методы в теории надежности и эффективности / [Под ред. Б.В. Гнеденко]. – 280 с.
 83. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. / [Ред. совет: В.С. Авдуевский (пред.) и др.]. – М.: Машиностроение, 1988. – Т.3: Эффективность технических систем / [Под общ. ред. В.Ф.Уткина, Ю.В.Крючкова]. – 328 с.
 84. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. / [Ред. совет: В.С. Авдуевский (пред.) и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – Т.6: Экспериментальная отработка и испытания. / [Под общ. ред. В.Ф.Уткина, Ю.В.Крючкова]. – 376 с.

85. Надежность технических систем: Справочник / [Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.В. и др.]; под общ.ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
86. Надійність техніки. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення: ДСТУ 2864:94. – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Держстандарт України, 1995. – 30 с.
87. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними: ДСТУ 3004:95. – [Чинний від 1995-01-25]. – К.: Держстандарт України, 1994. – 124 с.
88. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги: ДСТУ 2862:94. – [Чинний від 1994-12-08]. – К.: Держстандарт України, 1994. – 38 с.
89. Надійність техніки. Моделі відмов: ДСТУ 3433:96. – [Чинний від 1997-12-05]. – К.: Держстандарт України, 1996. – 46 с.
90. Надійність техніки. Терміни та визначення: ДСТУ 2860:94. – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Держстандарт України, 1995. – 79 с.
91. 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 12.12 2019).
92. Небылов А.В. Гарантирование точности управления. Москва: *Наука. Физматлит*, 1998. 304 с.
93. Нечаев Ю. И., Сизов В. Г. Принятие решений при управлении судном в экстремальных ситуациях на основе современной теории катастроф / Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА. Одесса: «ИздатИнформ», 2010. Вып. 20. С. 130–142.
94. Основи технічної експлуатації автоматизованої системи управління судном: підручник для студентів вищих навчальних закладів. / Богомья В.І. та ін. ; за ред. О. М. Тимошук. Київ. ДУІТ. 2018. 305 с.

95. Особливості системного підходу до вирішення наукових завдань експлуатації суднового обладнання./ Богомья В.І. та ін. ; за ред. О. М. Тимошук. Київ, ДУІТ, 2018, 305 с.
96. Паспорт спеціальності 05.22.20 - Експлуатація та ремонт засобів транспорту. URL: <http://inmad.vntu.edu.ua/upload/aspi/052220.pdf> (дата звернення: 09.12.2019).
97. Переверзев Е.С. Надежность и испытания технических систем. / Е.С. Переверзев. – К.: Наукова думка, 1990. – 326 с.
98. Письменна К. С. Стан і тенденції розвитку суднобудівної промисловості в Україні: господарсько-правовий аспект URL: <http://vuzlib.com/content/view/2516/27/> (дата звернення 12.04.2019).
99. 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: 30.06.2020).
100. Проект Закону України «Про внутрішній водний транспорт» від 09.07.2018 № 2475а-д URL: http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=64397 (дата звернення 12.12.2018).
101. 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: 21.03.2020).
102. 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-myhaula-0> (дата звернення: 09.12.2019).
103. Пятаков Э. Н. Требование к процедуре формирования второго уровня иерархической системы управления взаимодействием судов.

- Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, Одесса: *ИздаТИнформ*, Вып.13. 2007. С. 145 – 148.
104. Равин А.А. Диагностическое обеспечение судового энергетического оборудования. PRoATOM: веб-сайт. URL: <http://proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=4403> (дата звернення: 09.12.2018).
 105. Равин А.А. Диагностическое обеспечение судового энергетического оборудования: проблемы и решения : дис.... д-ра техн. наук : 05.08.05. URL: <http://docplayer.ru/44925881-Ravin-aleksandr-aleksandrovich-diagnosticheskoe-obespechenie-sudovogo-energeticheskogo-oborudovaniya-problemy-i-resheniya.html> (дата звернення: 30.11.2018).
 106. Разработка метода оценки и прогнозирования технического состояния судовых сложных систем / В. В. Вычужанин та ін. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2016. №6/9 (84). URL: <http://journals.urau.ru/eejet/article/download/85605/87615> (дата звернення: 06.01.2020).
 107. 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.
 108. Садловська І.П. Аналіз сучасних вантажопотоків в Україні та напрями їх розвитку / І.П. Садловська // 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.
 109. Сидоренко В. Ф. Кораблекрушения на море. Ленинград: Издательство Ленинградского университета, 1990. 296 с.
 110. Структурное моделирование та символіні перетворення для управління рухом транспортних засобів/ Баранов Г. Л. та ін. Київ, 2014. 310 с.

111. Тимощук 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.
112. Тимощук О. М., Коломієць О. М., Данік О. В. Вибір критерію оптимальності системи відновлення суднових комплексів. *Економіка та держава*. 2017. № 4. С. 102–104.
- 113. Тимощук О.М., Бойко С.О. Вибір критерію оптимальності системи технічного обслуговування суднових комплексів. II Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Навчально-наукового інституту Морського флоту Одеського національного морського університету. Одеса, 2020. С.165–168.**
- 114. Тимощук О.М., Трофименко А.О., Бойко С.О. Формалізація процесу технічної експлуатації елементів інтегрованої навігаційної системи. Новітні технології. 2019. Вип.3(10). С.13–24.**
115. Управління технічною експлуатацією флоту : конспект лекцій. URL: http://www.kma.ks.ua/ua/images/2_library/methodical/sud_energ/departme nt/avtomatyka/utef/u1.pdf (дата звернення: 09.12.2018).
116. Шапиро Д. И. Принятие решений в системах организационного управления. Использование расплывчатых категорий. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 185 с.
117. Шевченко А. П., Герасимов С. В., Тимочко О. І., Тимощук О. М., Трішин В. В. Оптимальний алгоритм обробки навігаційної інформації у системах управління засобами водного транспорту. *Наукоємні технології*. 2018, №4(40). С.450-457.
118. Шевченко А.П., Пліта Л.Л., Дакі О.А. Особливості організації процесу експлуатації засобів річкового та морського транспорту. *Новітні технології*. 2019. Вип. 3(10). С. 6-12.

119. Шевченко А.П., Трофименко І.В., Мазур А.М. Підвищення точності вимірювань в суднових радіолокаційних системах з врахуванням тропосферного впливу в умовах неоднорідності морського середовища. *Новітні технології*. 2018, Вип.2(6). С.61-68.
120. Шевченко А.П., Штрибець В.В., Трофіменко А.О. Розроблення фільтрових методів спектрального аналізу випадкових сигналів для контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту. *Slovak international scientific journal*. 2019. Vol.1. No.34. pp.30-38.
121. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надёжности / Яков Борисович Шор. – М.: Советское Радио, 1962. – 552 с.
122. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. Москва: Горячая линия: Телеком, 2007. 228 с.
123. Amemiya, T. *Advanced Econometrics*, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1985. – 507 p.
124. Lisowski J. Game control methods in navigator decision support system / *The Archives of Transport*. 2005. No 3-4, Vol. XVII. P. 133 –147.
125. Mallows C.L. Some comments on Cp // *Technometrics*. –1973. – v.15. – P.661 – 667.
126. Reform in the inland water transport: China's experience URL: <https://www.unescap.org/our-work/transport> (дата звернення 12.12.2018).
127. 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 12.12.2018).
128. 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 12.12.2019).

129. Young P.S. Data-Based Mechanistic Modeling of Engineering Systems // Journal of Vibration and Control. – 1998. – v. 4, No. 1. – P.5 – 28.

Додаток А

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. першого заступника
начальника ДП «Укрводшлях»



Банніков О.В.

«05» жовтня 2020 року

АКТ № _____

впровадження результатів дисертаційних досліджень Бойко С.О.

Комісія у складі: голови – заступника начальника підприємства з безпеки судноплавства, к.т.н. Дороніна В.В. та членів: головного штурмана річкової лоцманської служби, д.ф. Алєйнікова М.В., начальника служби безпеки судноплавства Безносенко Д.П. встановила, що результати наукових досліджень автора впроваджені, а саме:

удосконаленого методу прогнозування залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання засобів річкового та морського транспорту (ЗРМТ) з використанням результатів експлуатаційних спостережень, в якому, на відміну від існуючих, передбачено врахування залежності похибки прогнозу від способу розподілу експлуатаційних спостережень на вибірки;

удосконаленого методу оцінки показників довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом для вирішення завдань продовження призначених термінів служби (ресурсів), в якому, на відміну від існуючих, передбачено врахування залежності ефективності комплексу обладнання ЗРМТ від зміни технічного стану його комплектуючих, для здійснення оцінки показників довговічності з урахуванням ієрархічно розгалуженої структурної схеми його побудови.

Застосування запропонованих моделей і методів дозволяє підвищити достовірність прогнозу показників довговічності обладнання ЗРМТ при експлуатації за технічним станом в деяких випадках до 12 %.

Наведені нові науково-обґрунтовані практичні рекомендації щодо визначення залишкового терміну служби (ресурсу) обладнання судна дозволяють значно покращити систему технічної експлуатації судна за рахунок планування та своєчасного проведення відповідних заходів.

Акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова:
заступник начальника підприємства
з безпеки судноплавства

Доронін В.В.

Члени:
Головний штурман
річкової лоцманської служби

Алєйніков М.В.

Начальник служби
безпеки судноплавства

Безносенко Д.П.

ЗАТВЕРДЖУЮ

ректор Державного університету
інфраструктури та технологій
д.т.н., професор

В.В. ПАНІН

« 01 » жовтня 2020 року

АКТ № 14/a

впровадження результатів дисертаційних досліджень Бойко С.О.

Комісія у складі: голови – завідувача кафедри експлуатації засобів транспорту на внутрішніх водних шляхах доц., к.е.н. Войченко Т.О. та членів: доц., к.е.н., доцента кафедри експлуатації засобів транспорту на внутрішніх водних шляхах Завітаєва В.Л.; доц., к.т.н., доцента кафедри судноводіння Ганношиної І.М. встановила, що результати наукових досліджень автора, а саме:

удосконалена математична модель процесу зміни технічного стану обладнання засобів водного транспорту, в якій, на відміну від існуючої, передбачено врахування нерівноточних результатів оцінювання показника безвідмовності в якості вихідних даних для побудови моделей за результатами експлуатаційних спостережень;

удосконалений метод прогнозування залишкового ресурсу обладнання засобів водного транспорту з використанням результатів експлуатаційних спостережень, в якому, на відміну від існуючих, передбачено врахування залежності похибки прогнозу від способу розподілу експлуатаційних спостережень на вибірки;

використовувались в навчальному процесі при підготовці освітньо-професійних програм молодших бакалаврів, бакалаврів і магістрів спеціальності 271 «Річковий та морський транспорт» спеціалізації «Судноводіння на внутрішніх водних шляхах», «Судноводіння на судах внутрішнього та змішаного плавання», «Судноводіння» та при створенні курсу лекцій з дисциплін «Експлуатація засобів водного транспорту», «Суднові допоміжні установки, пристрої, системи та технологічне обладнання», «Інфраструктура водного транспорту».

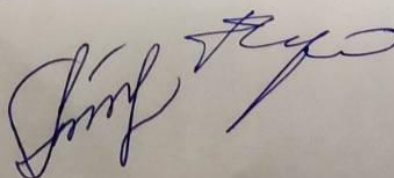
Акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова:



Т.О. Войченко

Члени:



В.Л. Завітаєв

І.М. Ганношина

Додаток Б

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Бойко С.О., Михайлова Т.І., Шевченко А.П. Спосіб прогнозування відмов агрегатів суднових комплексів за даними експлуатаційних спостережень. *Новітні технології*. 2019. Вип.1(8). С.52–58.
2. 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.149–156.
3. Тимошук О.М., Трофименко А.О., Бойко С.О. Формалізація процесу технічної експлуатації елементів інтегрованої навігаційної системи. *Новітні технології*. 2019. Вип.3(10). С.13–24.
4. Дакі О.А., Бойко С.О. Математична модель функціональних систем суднових комплексів. *Водний транспорт*. 2020. Вип.1(29). С.124–131.
5. Бойко С.О. Пліта Л.Л. Методи прогнозування довговічності обладнання засобів річкового та морського транспорту в умовах експлуатації за технічним станом. *Slovak international scientific journal*. 2020. Vol.2. No.45. pp.24-30.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Данік О.В., Бойко С.О. Особливості багатокритеріальної оптимізації структури системи навігації та управління судном. Міжнародна науково-практична конференція «Водний транспорт: сучасний стан та перспективи розвитку»: тези доповідей, 16-17 травня 2019 року. К.: ДУІТ, 2019. С.381-382.
7. Коломієць О.М., Шевченко А.П., Бойко С.О. Методи автоматизації контролю технічного стану засобів водного транспорту у різноманітних умовах експлуатації. Всеукраїнська інтернет-конференція студентів, аспірантів та

молодих вчених «Технічні науки в Україні: сучасні тенденції розвитку»: тези доповідей, 20-21 листопада 2019 року. – К.: ДУІТ, 2019. С.121-123.

8. Тимошук О.М., Бойко С.О. Вибір критерію оптимальності системи технічного обслуговування суднових комплексів. II Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Навчально-наукового інституту Морського флоту Одеського національного морського університету. Одеса, 2020. С.165–168.