

АНОТАЦІЯ

О. Верінов Методи і стратегії планування випробувань систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок, у післяпроектні строки експлуатації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 143 Атомна енергетика. – Національний університет «Одеська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Одеса, Україна, 2025.

Багаторічний досвід експлуатації систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок з ВВЕР-1000, визначає необхідність перегляду регламентних (проектних) стратегій планових випробувань та ремонту у післяпроектні строки експлуатації з таких основних причин.

1. Регламентована нормативною та експлуатаційною документацією періодичність планових випробувань та ремонту систем, важливих для безпеки, у проектні строки експлуатації встановлена недостатньо обґрунтовано, без урахування результатів проведення планових випробувань та ремонту та поточних показників надійності.

2. У післяпроектні строки експлуатації ядерних енергоустановок стратегії планових випробувань та ремонту систем, важливих для безпеки, повинні враховувати експлуатаційний досвід проведення планових випробувань та ремонту у проектні строки експлуатації, а також залишковий ресурс щодо надійності виконання функцій безпеки внаслідок безпосереднього впливу планових випробувань та ремонту на процеси старіння/деградації обладнання/конструкцій систем, важливих для безпеки (у тому числі і ненавмисні помилкові дії персоналу).

Недоліки традиційних підходів і методів зміни проектної періодичності планових випробувань та ремонту систем, важливих для безпеки, заснованих на результатах імовірнісного аналізу безпеки, полягають у припущеннях можливості зниження загального рівня безпеки, а також неоптимальності

технічних рішень щодо зміни планових випробувань та ремонту у форматі «безпека – ефективність експлуатації»).

Актуальність теми дисертації полягає у розробці альтернативних ризик-орієнтованих методів оптимізації стратегій планових випробувань та ремонту систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок, у післяпроектні строки експлуатації, заснованих на мінімізації ймовірності критичних для безпеки відмов/порушень з урахуванням досвіду експлуатації та залишкового ресурсу за надійністю на момент закінчення проектного строку експлуатації. Актуальність цих питань визначає цілі та завдання роботи.

Мета даної роботи – розробити та застосувати на практиці ризик-орієнтовані методи оптимізації стратегій планових випробувань та ремонту систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок, у післяпроектні строки експлуатації.

Досягнення зазначеної мети забезпечується вирішенням наступних задач.

1. Провести аналіз оптимальності відомих стратегій підвищення безпеки/ ефективності експлуатації ядерних енергоустановок.

2. Розробити ризик-орієнтовані методи оптимізації стратегій планових випробувань та ремонту систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок, у післяпроектні строки експлуатації, засновані на мінімізації ймовірності критичних для безпеки відмов/порушень та загальних імовірнісних показниках безпеки атомних енергоблоків.

3. На основі розроблених ризик-орієнтованих методів визначити оптимальні стратегії планових випробувань та ремонту систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок з ВВЕР-1000, у післяпроектні строки експлуатації.

Наукова новизна роботи полягає у наступному.

1. Ризик-орієнтований метод оптимізації періодичності планових випробувань активних систем безпеки з урахуванням стохастичних процесів

накопичення критичних для безпеки відмов/порушень та залишкового ресурсу за надійністю на момент продовження експлуатації.

2. Ризик-орієнтовані методи оптимізації стратегій планових випробувань та ремонту систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок, з урахуванням стохастичних процесів накопичення критичних для безпеки відмов/порушень, ненавмисних помилкових дій ремонтного персоналу та залишкового ресурсу за надійністю на момент продовження експлуатації.

3. Ризик-орієнтований метод оптимізації періодичності випробувань на герметичність систем гермооб'єму ядерних енергоустановок з урахуванням експлуатаційних даних за величиною витоків та залишкового ресурсу за надійністю критичних для безпеки елементів системи гермооб'єму ядерної енергоустановки.

Практична цінність. Розроблені ризик-орієнтовані методи та практичні результати роботи можуть бути використані експлуатуючою ядерні енергоустановки та регулюючою ядерну безпеку організаціями для обґрунтування технічних рішень щодо оптимізації стратегій планових випробувань та ремонту систем, важливих для безпеки у післяпроектні строки експлуатації.

Результати роботи використані у керівних документах ДП НАЕК «Енергоатом» за нормативами тривалості планово-попереджувальних ремонтів та періодичності випробувань ядерних енергоустановок з ВВЕР-1000.

Найпріоритетніше значення для підвищення ефективності та оптимальності експлуатації ядерних енергоустановок має стратегія щодо скорочення тривалості планово-попереджувальних ремонтів енергоблоків шляхом зміни періодичності планових випробувань і ремонтів систем, важливих для безпеки, за умов забезпечення/підвищення загального рівня безпеки ядерних енергоустановок. Методи обґрунтування оптимізації стратегій планових випробувань і ремонтів систем, важливих для безпеки,

повинно ґрунтуватися на фундаментальних принципах безпеки ядерної енергетики з урахуванням досвіду експлуатації та залишкового ресурсу щодо надійності виконання функцій безпеки.

Розроблено оригінальний метод прогнозування строків продовження експлуатації тепломеханічного обладнання систем безпеки на основі оцінки залишкового ресурсу по кількості теплогідродинамічних і механічних циклічних навантажень і частоти випробувань. На основі розробленого методу, а також результатів технічного дослідження корпусів насосів і арматури систем аварійного охолодження активної зони реактора та аварійного підживлення парогенераторів встановлено, що при збереженні проєктної періодичності випробувань припустимий строк продовження експлуатації складає 4 роки; при скороченні частоти випробувань у 2 рази – 8 років, у 6 разів – 16 років, у 10 разів – 20 років.

Представлено метод оптимізації стратегій випробувань систем безпеки у післяпроєктні строки експлуатації ядерних енергоустановок, заснований на мінімізації ймовірностей відмови на спрацювання, пошкодження активної зони реактора та гранично допустимих аварійних викидів. Оптимальна періодичність випробувань, що відповідає максимальній надійності і безпеці, залежить від статистики виявлених критичних для надійності відмов та залишкового ресурсу з міцності на момент продовження експлуатації. На основі розробленого методу сформульовано оптимальні стратегії випробувань систем безпеки. Вибір стратегії залежить від співвідношення проєктної і оптимальної періодичності, а також від залишкового ресурсу обладнання і трубопроводів системи безпеки.

Розроблено ризик-орієнтований метод оптимізації періодичності випробувань надлишковим тиском системи гермооболонки у післяпроєктні строки експлуатації, заснований на умові відповідності ймовірностей виникнення критичних порушень у проєктні і післяпроєктні строки експлуатації. Встановлено, що оптимальна періодичність випробувань надлишковим тиском системи гермооболонки залежить від залишкового

ресурсу з надійності на момент продовження експлуатації, тривалості проєктних і післяпроєктних строків експлуатації, а також кількості встановлених у проєктні строки експлуатації критичних порушень по перевищенню допустимих значень витоків.

Запропоновано метод обґрунтування оптимальної періодичності випробувань систем безпеки в надпроєктні строки експлуатації для мінімізації вірогідності відмов і пошкодження активної зони реактора, заснований на сумісному моделюванні стохастичних процесів накопичення «прихованих» критичних відмов у режимах очікування і детерміністських процесів накопичення критичних відмов в режимах випробувань, технічного обслуговування і ремонту. Оптимальна періодичність випробувань систем безпеки в надпроєктні строки експлуатації залежить від: статистичних даних по виявлених критичних відмовах або дефектах; проєктного і прогнозованого строків експлуатації; проєктної періодичності випробувань і залишкового ресурсу по параметрах міцності на момент продовження тривалості експлуатації.

На основі розроблених ризик-орієнтованих методів обґрунтовано оптимальну стратегію періодичності планових випробувань активних систем безпеки у робочих режимах реактора на потужності, що забезпечує підвищення безпеки та ефективності експлуатації щодо проєктних стратегій.

Ризик-орієнтованим підходом обґрунтовано оптимальну стратегію виведення в плановий ремонт одного каналу активних систем безпеки у робочому режимі реактора на потужності, що забезпечує підвищення ефективності експлуатації при збереженні необхідного рівня безпеки.

Розроблено оптимальну стратегію періодичності випробувань на герметичність системи гермооб'єму ядерної енергоустановки, що забезпечує скорочення тривалості планово-попереджувальних ремонтів енергоблоків і підвищення коефіцієнту використання встановленої потужності при збереженні необхідного рівня безпеки.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасних підходів підвищення безпеки та ефективності експлуатації ядерної енергетики, аналіз оптимальності модернізацій ядерних енергоустановок у форматі «безпека – ефективність експлуатації», а також аналіз відомих методів обґрунтування стратегій планових випробувань і ремонту систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок, у проєктні та післяпроєктні строки експлуатації.

На основі проведеного аналізу встановлено наступне.

1. Одним з пріоритетних напрямків забезпечення безпеки та ефективності експлуатації ядерної енергетики є оптимізація стратегій планових випробувань і ремонту систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок, у післяпроєктні строки експлуатації.

2. Традиційні підходи встановлення періодичності планових випробувань і ремонту систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок, у проєктні та післяпроєктні строки експлуатації, що базуються на результатах імовірнісного аналізу безпеки, є недостатньо обґрунтованими.

У **другому розділі** розроблено ризик-орієнтовані методи оптимізації стратегій планових випробувань і ремонту у післяпроєктні строки експлуатації активних систем безпеки (з насосами), систем, важливих для безпеки, у робочих режимах експлуатації та систем гермооб'єму ядерної енергоустановки.

Критерії оптимізації – мінімальні ймовірності критичних для безпеки відмов/порушень та умов виникнення важких/радіаційних аварій.

Параметри оптимізації стратегій планових випробувань і ремонту систем, важливих для безпеки, у післяпроєктні строки експлуатації – періодичність планових випробувань і ремонту у проєктні та післяпроєктні строки експлуатації; кількість установлених у проєктні строки експлуатації критичних для безпеки відмов/порушень; залишковий ресурс з надійності виконання функцій безпеки на момент закінчення проєктного строку експлуатації; тривалість проєктних та післяпроєктних строків експлуатації.

У **третьому розділі** на основі розроблених ризик-орієнтованих методів обґрунтовано оптимальні стратегії планових випробувань і ремонту у післяпроектні строки експлуатації активних систем безпеки та систем гермооб'єму ядерних енергоустановок з ВВЕР, що забезпечують підвищення ефективності експлуатації при збереженні/підвищенні рівня безпеки ядерних енергоустановок.

Ключові слова: система, важлива для безпеки ядерної енергоустановки, ядерна безпека, радіаційна безпека, екологічна безпека, випробування, надійність обладнання, продовження експлуатації.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Скалозубов В. І., **Вєрінов О. М.**, Вербило І. М., Кочнєва В. Ю., Канівець А. В. Кваліфікація стратегій управління аваріями з повним тривалим знеструмленням ядерних енергоустановок із ВВЕР. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2024. № 1(29). С. 23 – 28. doi.org/10.31717/2311-8253.24.1.3 Фахове видання, включено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, індексується у міжнародних наукометричних базах Index Copernicus, Google Scholar, INIS, ResearchBib.

2. **Вєрінов О.** Стратегії випробувань систем, важливих для безпеки ЯЕУ : монографія. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2024. 47 с. ISBN 978-620-7-63924-3 Рекомендовано рішеннями Вченої ради Інституту енергетики Національного університету «Одеська політехніка» (протокол № 2 від 11.10.2023 р.) та Вченої ради Національного університету «Одеська політехніка» (протокол № 5 від 08.11.2023 р.)

3. Skalozubov V., **Vierinov O.**, Kanivets A., Kochnieva V., Bundiev D., Hayo H. Risk-informed method for qualifying strategies for operation control of metal of safety related systems of nuclear power plants. *Proc. of Odessa Polytechnic University* (Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi). 2023. Iss. 2(68). P. 43 – 50. DOI 10.15276/opu.2.68.2023.05 Фахове видання, індексується у міжнародних наукометричних базах Citefactor, CNKI Scholar, CrossRef, DOAJ, EBSCO, ERIH PLUS, Gale/Cengage, Google Scholar, Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Universal Impact Factor, WorldCat та ін.

4. Скалозубов В. І., **Вєрінов О. М.**, Канівець А. В., Кочнєва В. Ю., Бундєв Д. С., Хайо Х. Ризик-орієнтований метод оптимізації стратегії

планового ремонту за технічним станом систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2023. № 3(28). С. 10 – 15. doi.org/10.31717/2311-8253.23.3.2 Фахове видання, включено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, індексується у міжнародних наукометричних базах Index Copernicus, Google Scholar, INIS, ResearchBib.

5. Кондратюк В. А., Письменний Є. М., **Вєрінов О. М.**, Філатов В. І., Остапенко А. І. Підвищення безпеки ядерної енергетики з урахуванням уроків важких аварій. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2022. № 3. С. 76 – 81. [https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3\(95\).08](https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3(95).08) Фахове видання, включено до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України, індексується у міжнародних наукометричних базах SCOPUS, UGC CARE.

6. **Вєрінов О. М.** Планування технічного обслуговування систем атомних електростанцій : монографія. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2022. 200 с. ISBN 978-620-4-74932-7 Рекомендовано рішеннями Вченої ради Інституту енергетики Національного університету «Одеська політехніка» (протокол № 2 від 14.10.2022 р.) та Вченої ради Національного університету «Одеська політехніка» (протокол № 5 від 11.11.2022 р.)

7. Skalozubov V. I., **Vierinov A. M.**, Kosenko S. I., Alali M., Kochnyeva V. Yu. Risk-Informed Method for Predicting the Operation Life Extension Period of Active Safety Systems at Nuclear Power Plants. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2022. No. 2. P. 73 – 75. <https://doi.org/10.46813/2022-138-073> Фахове видання, включено до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України, індексується у міжнародних наукометричних базах SCOPUS та Web of Science.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

8. Скалозубов В., Дорож О., Бундєв Д., **Вєрінов О.**, Вербіло І., Канівець А., Хайо Х. Ремонт та наладка АЕС : конспект лекцій. Одеська політехніка, 2024. 102 с.

9. Скалозубов В., Дорож О., Кочнєва В., **Верінов О.**, Вербило І., Канівець А., Хайо Х. Ядерна безпека та надійність АЕС : конспект лекцій. Одеська політехніка, 2023. 391 с.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

10. **Верінов О.**, Канівець А., Вербило І. Оптимізація періодичності планових ремонтів активних систем безпеки ядерних енергоустановок. *IX International Scientific and Practical Conference «Promising Ways of Information Technology Development»*: Abstracts. (Bilbao, Spain, November 13 – 15, 2023). P. 360 – 364. ISBN 9-789-46485-378-0

11. **Верінов О.**, Канівець А., Вербило І. Оптимізація планових ремонтів обладнання ядерних енергоустановок. *VIII International Scientific and Practical Conference «Modern Technologies of Human Development»*: Abstracts. (Bordeaux, France, November 06 – 08, 2023). P. 308 – 314. ISBN 9-789-46485-377-3

12. **Vierinov O.**, Kanivets A., Hayo H. Optimization of Metal Control Frequency of Safety Related Systems of Nuclear Power Plants. *VII International Scientific and Practical Conference «Problematic Questions of Science and Problems of Development»*: Abstracts. (Berlin, Germany, October 30 – November 01, 2023). P. 315 – 319. ISBN 9-789-46485-372-8

13. Skalozubov V., Komarov Yu., **Verinov A.**, Kosenko S., Bundev D., Hayo H., Kochnyeva V. Probabilistic Reliability Analysis for Pumps of Safety Related Systems at Nuclear Power Plants. *ICST-ODESSA-2023: XI International Scientific Conference «Information-Management Systems and Technologies»*: Mater. (Odessa, Ukraine, September 21 – 23, 2023). P. 201-203. <http://icst-conf.com/main-eng.html>

14. Skalozubov V., Kondratiuk V., Bundev D., **Vierinov O.**, Kosenko S. Qualification Method for Accident Management Systems at AP1000 Nuclear Power Plant. *XXXIII International Scientific and Practical Conference «Trends in the development of science in the modern world»*: Proc. (Graz, Austria, August 23 – 26, 2022). P. 389 – 390. DOI 10.46299/ISG.2022.1.33

15. **Vierinov O.**, Kondratiuk V., Kosenko S., Alali M., Algerby R.K.A.

Qualification Method for Active Safety System Modernizations to Prevent Hydrodynamic Instability. *XXXI International Scientific and Practical Conference «Modern innovations and promising ways of development of culture and science»*: Proc. (Boston, USA, August 09 – 12, 2022). P. 242 – 243. DOI 10.46299/ISG.2022.1.31

16. **Vierinov O.**, Kondratiuk V., Komarov Y., Kosenko S., Pysmenny E. Current Directions and Approaches to Improving the Safety of Nuclear Power Engineering Taking into Account Lessons from Greate Accidents (Review). *XXI International Scientific and Practical Conference «Actual priorities of modern science, education and practice»*: Proc. (Paris, France, May 31 – 03 June, 2022). P. 786 – 794. DOI 10.46299/ISG.2022.1.21

17. **Vierinov O.**, Kondratiuk V., Komarov Y., Kosenko S., Hayo H. Lessons from the Chernobyl Accident for the Modern Nuclear Power Industry Environmental Safety. *XX International Scientific and Practical Conference «Problems of science and practice, tasks and ways to solve them»*: Proc. (Warsaw, Poland, May 24 – 27, 2022). P. 760 – 768. DOI 10.46299/ISG.2022.1.20

18. Skalozubov V., **Vierinov O.**, Komarov Yu., Kosenko S., Kochnyeva V. Strategies for Scheduled Repairs and Tests of Active Safety Systems During the Post-Design Operation Life of NPPs. *XV International Scientific and Practical Conference «Multidisciplinary academic notes. Science research and practice»*: Proc., (Madrid, Spain, April 19 – 22, 2022). P. 600 – 601. DOI 10.46299/ISG.2022.1.15

ABSTRACT

O. Vierinov Methods and strategies for scheduling tests of safety-related systems of nuclear power plants during the post-design operation life. – Manuscript copyright.

Thesis for a Doctor of Philosophy degree in Specialty 143 «Nuclear Energy». – National University «Odesa Polytechnic» of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2025.

Many years of experience in the operation of safety-related systems at the nuclear power plants with VVER-1000 determines the need to revise the regulatory (design) strategies for scheduled tests and repairs in the post-design operation life for the following main reasons.

1. Regulatory and operational documentation establishes the periodicity of scheduled tests and repairs of safety-related systems during the design operation life not sufficiently substantiated, without taking into account the results of scheduled tests and repairs and current reliability indicators.

2. During the post-design operation life of nuclear power plants, strategies for scheduled tests and repairs of safety-related systems must take into account the operational experience in scheduled tests and repairs during the design operation life, as well as the residual resource regarding the reliability of the safety functions due to the direct impact of scheduled tests and repairs on processes of aging/degradation of equipment/structures of safety-related systems (including unintentional staff errors).

Disadvantages of traditional approaches and methods for changing the design periodicity of scheduled tests and repairs of safety-related systems, based on the results of probabilistic safety analysis, consist in assumptions about the possibility of reducing the overall level of safety, as well as suboptimality of technical solutions for changing scheduled tests and repairs in the format “safety - operational efficiency”).

The relevance of the dissertation is the development of alternative risk-informed methods for optimization of strategies for scheduled tests and repairs of safety-related systems of nuclear power plants during the post-design operation life, based on minimizing the probability of safety-critical failures/violations, taking into account operational experience and residual reliability resource at the end of the design operation life. The relevance of these issues determines the purposes and tasks of the dissertation work.

The purpose of this work is to develop and apply in practice risk-informed methods for optimizing the strategies of scheduled tests and repairs of safety-related systems of nuclear power plants during the post-design operation life.

To achieve this purpose, the following tasks must be solved.

1. To analyze the optimality of the known strategies for increasing the safety/efficiency of the operation of nuclear power plants.

2. To develop risk-informed methods for optimizing strategies for scheduled tests and repairs of safety-related systems of nuclear power plants during the post-design operation life, based on minimizing the probability of safety-critical failures/violations and general probabilistic indicators of the safety of nuclear power units.

3. Based on the developed risk-informed methods, determine the optimal strategies for scheduled tests and repairs of safety-related systems of nuclear power plants with VVER-1000 during the post-design operation life.

The scientific novelty of the work is as follows.

1. A risk-informed method for optimizing the periodicity of scheduled tests of active safety systems, taking into account the stochastic processes of accumulation of safety-critical failures/violations and the residual reliability resource at the time of extended operation.

2. Risk-informed methods for optimizing the strategies for scheduled tests and repairs of safety-related systems of nuclear power plants, taking into account the stochastic processes of accumulation of safety-critical failures/violations,

unintentional errors of repair staff, and the residual reliability resource at the time of extended operation.

3. A risk-informed method for optimizing the periodicity of tightness tests of the containment systems of nuclear power plants, taking into account the operational data on leaks and the residual reliability resource for the elements critical to the safety of the containment of the nuclear power plant.

The organizations operating nuclear power plants and regulating nuclear safety can use the developed risk-informed methods and practical results to substantiate technical decisions regarding the optimization of strategies for scheduled tests and repairs of safety-related systems during the post-design operation life.

The results of the work are used in the guiding documents of the SE «NNEGC «Energoatom» regarding the standards for time of scheduled and preventive repairs and the test frequency for nuclear power plants with VVER-1000.

The strategy for reducing the preventive maintenance overhauls of power units with changing the periodicity of scheduled tests and repairs of safety-related systems, subject to ensuring/increasing the general safety of nuclear power plants, has the highest priority for increasing the efficiency and optimal operation of nuclear power plants. The methods for substantiating the optimization of the strategies of scheduled tests and repairs of safety-related systems should be based on the fundamental safety principles in nuclear energy, taking into account the operation experience and the residual resource regarding the reliability of safety functions.

An original method for predicting the extension of operation life of thermomechanical equipment of safety systems based on the assessment of the residual resource regarding the number of thermohydrodynamic and mechanical cyclic loads and the test frequency has been developed. Based on the developed method, as well as the results of a technical study of pump and fitting bodies of emergency core cooling and emergency steam generator makeup systems, it was recognized that the permissible extension of operation life is 4 years at the design

test periodicity; if the test frequency is reduced by 2 times – 8 years, by 6 times – 16 years, by 10 times – 20 years.

The method for optimizing strategies for safety system tests during the post-design operation life of nuclear power plants is presented. The method is based on the minimization of the probabilities of failure, damage to the reactor core, and maximum permissible accidental releases. The optimal test periodicity, which corresponds to maximum reliability and safety, depends on the statistics of detected failures critical for reliability and the residual strength resource at the time of continued operation. Based on the developed method, optimal strategies for testing safety systems are formulated. The choice of strategy depends on the ratio of design and optimal periodicity, as well as on the residual resource of equipment and pipelines of the safety system.

A risk-informed method for optimizing the periodicity of high-pressure proof tests of the containment system during the post-design operation life has been developed. The method is based on the match condition for the probabilities of critical violations during the design and post-design operation life. It was recognized that the optimal periodicity of high-pressure proof tests of the containment system depends on the residual reliability resource at the time of continued operation, the design and post-design operation life, as well as the number of critical violations due to exceeding the permissible leaks during the design operation life.

A method for substantiating the optimal periodicity of safety system tests during the above-design operation life to minimize the probability of failures and damage to the reactor core is proposed. The method is based on the joint modelling of stochastic processes of accumulation of "hidden" critical failures in standby modes and deterministic processes of accumulation of critical failures in modes of testing, maintenance and repair. The optimal frequency of safety system tests during the above-design operation life depends on: statistical data on detected critical failures or defects; design and predicted operation life; design test periodicity and residual resource regarding to strength parameters at the moment of extending the operation life.

Based on developed risk-informed methods, an optimal strategy has been substantiated for the periodicity of scheduled tests of active safety systems when reactor operation at power. It will ensure increased operational safety and efficiency compared to design strategies.

The risk-informed approach substantiated an optimal strategy for the scheduled repairs of one channel of the active safety systems when reactor operation at power. It will ensure increased operational safety and efficiency while maintaining the necessary safety level.

An optimal strategy has been developed for the periodicity of leak tightness tests of a containment system at the nuclear power plant. It will ensure the reduction in scheduled repair time of power units and improve the unit capacity factor while maintaining the necessary safety level.

The First Chapter analyses the modern approaches to increase the safety and efficiency of nuclear power operation, the optimality of modernization of nuclear power plants in the "operation safety – efficiency" format, as well as known methods to substantiate strategies for scheduled tests and repairs of safety-related systems of nuclear power plants in design and post- design operating periods.

Based on the analysis, the following was found.

1. The optimization of strategies for scheduled tests and repairs of safety-related systems of nuclear power plants in the post-design operation period is one of the priority directions for ensuring the safety and efficiency of nuclear energy operation.

2. Traditional approaches to the periodicity of scheduled tests and repairs of safety-related systems of nuclear power plants in the design and post-design operation periods, based on the results of a probabilistic safety analysis, are not substantiated enough.

The Second Chapter develops risk-informed methods for optimizing strategies for scheduled tests and repairs of active safety systems (with pumps) in the post-design operation period, safety-related systems in operating modes, and containment systems of a nuclear power plant.

Optimization criteria are minimum probabilities of safety-critical failures/violations and conditions for severe/radiation accidents.

Parameters for optimizing strategies for scheduled tests and repairs of safety-related systems in the post-design operation period are the periodicity of scheduled tests and repairs in the design and post-design operation periods; the number of safety-critical failures/violations found during the design operation period; residual resource for the reliability of safety functions at the end of the design operation life; design and post-design operation life.

The Third Chapter substantiates the optimal strategies for scheduled tests and repairs of active safety systems and containment systems of nuclear power plants with VVER in the post-design operation period, based on the developed risk-informed methods. It ensures increased operational efficiency while maintaining/increasing the safety level of nuclear power plants.

Keywords: safety-related system of a nuclear power plant, nuclear safety, radiation safety, ecological safety, tests, equipment reliability, extended operation

LIST OF APPLICANT'S PUBLICATIONS

The main scientific results of the thesis have been published in the following scientific articles:

1. Skalozubov V. I., **Vierinov O. M.**, Verbylo I. M., Kochnieva V. Yu., Kanivets A. V. Qualification of Management Strategies for Major Plant Blackout Accident at Nuclear Power Plants with VVER. *Nuclear Power and the Environment*. 2024. No. 1(29). P. 23 – 28. doi.org/10.31717/2311-8253.24.1.3 The specialized publication, included in category "B" of the List of scientific specialized publications of Ukraine, indexed in the international scientometric databases Index Copernicus, Google Scholar, INIS, ResearchBib.

2. **Vierinov O.** Strategies for testing NPP safety related systems : a monograph. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2024. 47 p. ISBN 978-620-7-63924-3 Recommended by the decisions of the Academic Council of the Institute of Energy of the Odessa Polytechnic National University (Protocol No. 2 dated 11.10.2023) and the Academic Council of the Odessa Polytechnic National University (Protocol No. 5 dated 08.11.2023).

3. Skalozubov V., **Vierinov O.**, Kanivets A., Kochnieva V., Bundiev D., Hayo H. Risk-informed method for qualifying strategies for operation control of metal of safety related systems of nuclear power plants. *Proc. of Odessa Polytechnic University* (Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi). 2023. Iss. 2(68). P. 43 – 50. DOI 10.15276/opu.2.68.2023.05 The specialized publication, indexed in the international scientometric databases Citefactor, CNKI Scholar, CrossRef, DOAJ, EBSCO, ERIH PLUS, Gale/Cengage, Google Scholar, Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Universal Impact Factor, WorldCat etc.

4. Skalozubov V. I., **Vierinov O. M.**, Kanivets A. V., Kochnieva V. Yu., Bundiev D. S., Hayo H. Risk--Informed Method for Optimizing the Strategy of Scheduled Repairs according to the Technical Condition of Safety Related Systems of Nuclear Power Plants. *Nuclear Power and the Environment*. 2023. No. 3(28).

P. 10 – 15. doi.org/10.31717/2311-8253.23.3.2 The specialized publication, included in category "B" of the List of scientific specialized publications of Ukraine, indexed in the international scientometric databases Index Copernicus, Google Scholar, INIS, ResearchBib.

5. Kondratyuk V., Pysmennyi Y., **Verinov O.**, Filatov V., Ostapenko I. Improvement of Nuclear Safety Taking into Account the Lessons Learned from Severe Accidents. *Nuclear and Radiation Safety*. 2022. No. 3. P. 76 – 81. [https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3\(95\).08](https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3(95).08) The specialized publication, included in category "A" of the List of scientific specialized publications of Ukraine, indexed in the international scientometric databases SCOPUS, UGC CARE.

6. **Vierinov O. M.** Maintenance planning of nuclear power plant systems : a monograph. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2022. 200 c. ISBN 978-620-4-74932-7 Recommended by the decisions of the Academic Council of the Institute of Energy of the Odessa Polytechnic National University (Protocol No. 2 dated 14.10.2022) and the Academic Council of the Odessa Polytechnic National University (Protocol No. 5 dated 11.11.2022).

7. Skalozubov V. I., **Vierinov A. M.**, Kosenko S. I., Alali M., Kochnyeva V. Yu. Risk-Informed Method for Predicting the Operation Life Extension Period of Active Safety Systems at Nuclear Power Plants. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2022. No. 2. P. 73 – 75. <https://doi.org/10.46813/2022-138-073> The specialized publication, included in category "A" of the List of scientific specialized publications of Ukraine, indexed in the international scientometric databases SCOPUS and Web of Science.

Scientific works that additionally reflect the scientific results of the dissertation:

8. Skalozubov V., Dorozh O., Bundiev D., **Verinov O.**, Verbylo I., Kanivets A., Hayo H. NPP repair and adjustment: lecture notes. Odessa Polytechnic, 2024. 102 p.

9. Skalozubov V., Dorozh O., Kochnieva V., **Verinov O.**, Verbylo I., Kanivets A., Hayo H. NPP nuclear safety and reliability: lecture notes. Odessa

Polytechnic, 2023. 391 p.

Scientific papers certifying the approbation of the dissertation materials

10. **Verinov O.**, Kanivets A., Verbylo I. Optimizing the periodicity of scheduled repairs of active safety systems of nuclear power plants. *IX International Scientific and Practical Conference «Promising Ways of Information Technology Development»*: Abstracts. (Bilbao, Spain, November 13 – 15, 2023). P. 360 – 364. ISBN 9-789-46485-378-0.

11. **Verinov O.**, Kanivets A., Verbylo I. Optimizing the scheduled repairs of the equipment of nuclear power plants. *VIII International Scientific and Practical Conference «Modern Technologies of Human Development»*: Abstracts. (Bordeaux, France, November 06 – 08, 2023). P. 308 – 314. ISBN 9-789-46485-377-3.

12. **Vierinov O.**, Kanivets A., Hayo H. Optimization of Metal Control Frequency of Safety Related Systems of Nuclear Power Plants. *VII International Scientific and Practical Conference «Problematic Questions of Science and Problems of Development»*: Abstracts. (Berlin, Germany, October 30 – November 01, 2023). P. 315 – 319. ISBN 9-789-46485-372-8.

13. Skalozubov V., Komarov Yu., **Verinov A.**, Kosenko S., Bundev D., Hayo H., Kochnyeva V. Probabilistic Reliability Analysis for Pumps of Safety Related Systems at Nuclear Power Plants. *ICST-ODESSA-2023: XI International Scientific Conference «Information-Management Systems and Technologies»*: Mater. (Odessa, Ukraine, September 21 – 23, 2023). P. 201-203. <http://icst-conf.com/main-eng.html>.

14. Skalozubov V., Kondratiuk V., Bundev D., **Vierinov O.**, Kosenko S. Qualification Method for Accident Management Systems at AP1000 Nuclear Power Plant. *XXXIII International Scientific and Practical Conference «Trends in the development of science in the modern world»*: Proc. (Graz, Austria, August 23 – 26, 2022). P. 389 – 390. DOI 10.46299/ISG.2022.1.33.

15. **Vierinov O.**, Kondratiuk V., Kosenko S., Alali M., Algerby R.K.A. Qualification Method for Active Safety System Modernizations to Prevent Hydrodynamic Instability. *XXXI International Scientific and Practical Conference*

«Modern innovations and promising ways of development of culture and science»: Proc. (Boston, USA, August 09 – 12, 2022). P. 242 – 243. DOI 10.46299/ISG.2022.1.31.

16. **Vierinov O.**, Kondratiuk V., Komarov Y., Kosenko S., Pysmenny E. Current Directions and Approaches to Improving the Safety of Nuclear Power Engineering Taking into Account Lessons from Greate Accidents (Review). *XXI International Scientific and Practical Conference «Actual priorities of modern science, education and practice»*: Proc. (Paris, France, May 31 – 03 June, 2022). P. 786 – 794. DOI 10.46299/ISG.2022.1.21.

17. **Vierinov O.**, Kondratiuk V., Komarov Y., Kosenko S., Hayo H. Lessons from the Chernobyl Accident for the Modern Nuclear Power Industry Environmental Safety. *XX International Scientific and Practical Conference «Problems of science and practice, tasks and ways to solve them»*: Proc. (Warsaw, Poland, May 24 – 27, 2022). P. 760 – 768. DOI 10.46299/ISG.2022.1.20.

18. Skalozubov V., **Vierinov O.**, Komarov Yu., Kosenko S., Kochnyeva V. Strategies for Scheduled Repairs and Tests of Active Safety Systems During the Post-Design Operation Life of NPPs. *XV International Scientific and Practical Conference «Multidisciplinary academic notes. Science research and practice»*: Proc., (Madrid, Spain, April 19 – 22, 2022). P. 600 – 601. DOI 10.46299/ISG.2022.1.15.