

В.І.Скалозубов¹, д-р техн. наук, професор, ORCID 0000-0003-2361-223X

О.М.Верінов¹, аспірант, ORCID 0000-0002-0718-1532

А.В.Канівець¹, аспірант, ORCID 0009-0005-6135-7470

І.М.Вербило¹, аспірант, ORCID 0009-0006-3369-3896

В.І.Філатов², канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-3046-3546

¹Національний університет «Одеська політехніка»

²Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕРНІЗАЦІЯ СТРАТЕГІЙ ПЛАНОВИХ РЕМОНТІВ АКТИВНИХ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ ЯДЕРНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ВВЕР

Встановлені технологічними регламентами безпечної експлуатації АЕС з ВВЕР стратегії планових випробувань і ремонтів активних систем безпеки (з насосами) не враховують багаторічного досвіду експлуатації та результатів численних випробувань активних систем безпеки, поточних показників надійності та залишкового ресурсу основного устаткування й інших чинників. Модернізація/удосконалення проєктних стратегій планових ремонтів і випробувань активних систем безпеки визначають необхідність розроблення відповідних методів кваліфікації (обґрунтування) модернізованих стратегій. Представлено ризик-орієнтований метод кваліфікації модернізації стратегій планових ремонтів активних систем безпеки, що враховує досвід експлуатації, планових ремонтів і випробувань, а також поточну надійність основного обладнання. Розроблений метод ґрунтується на таких положеннях. Визначальний показник надійності при кваліфікації стратегій планових ремонтів активних систем безпеки - коефіцієнт неготовності виконання функції безпеки, що визначає ймовірність виникнення критичної відмови в поточний момент часу залежно від параметра інтенсивності потоку критичних відмов, встановлених у планових випробуваннях/ремонтах за минулий термін експлуатації. Під критичною відмовою тут мається на увазі відмова виконання функції безпеки (наприклад, відмова з увімкнення насоса, вимушене вимкнення насоса внаслідок порушення умов працездатності, течі в контурах активних систем безпеки та інші). Критерій кваліфікації модернізації стратегій планових ремонтів активних систем безпеки - цільова функція ризику, що визначає співвідношення коефіцієнтів неготовності виконання функції безпеки проєктної та модернізованої стратегій планових ремонтів активних систем безпеки. Умови успішної кваліфікації - коефіцієнт неготовності виконання функції безпеки модернізованої стратегії планових ремонтів не більший за коефіцієнт неготовності проєктної стратегії планових ремонтів. На основі розробленого методу обґрунтовано модернізовану стратегію планових ремонтів активної частини систем аварійного охолодження активної зони реактора ВВЕР-1000, а також визначено обмеження застосовності модернізованої стратегії.

Ключові слова: активна система безпеки, ремонт за надійністю.

Вступ

Актуальність удосконалення/модернізації стратегій планових ремонтів активних систем безпеки (СПР АСБ) визначається недостатньою обґрунтованістю регламентованої (проєктної) СПР АСБ, яка не враховує досвіду експлуатації, результатів планових випробувань і ремонту, залишкового ресурсу за надійністю та інших чинників.

Модернізація СПР АСБ повинна мати оптимізаційний характер, оскільки, з одного боку, збільшення кількості планових випробувань і ремонту збільшує вірогідність виявлення "прихованих" відмов та дефектів; але, з іншого боку, необґрунтоване збільшення кількості планових випробувань та ремонтів може призвести до надлишкового зносу устаткування та зниження залишкового ресурсу за надійністю виконання функцій безпеки, збільшення вірогідності помилкових дій персоналу, збільшення тривалості планово-попереджувальних ремонтів (ППР) та інших негативних наслідків.

Для обґрунтування модернізованих СПР АСБ ЯЕУ необхідно розробити відповідні методи кваліфікації, що враховують поточний стан надійності виконання необхідних функцій безпеки, досвід експлуатації, результати проведених раніше випробувань каналів АСБ на потужності реактора/в процесі ППР, кількість і результати проведених раніше ремонтів, що й визначає актуальність представленої роботи.

Аналіз літературних джерел і постановка проблеми

У роботі [1] проведено аналіз регламентованої стратегії планових випробувань АСБ ЯЕУ з ВВЕР у режимах роботи реактора на потужності. У результаті встановлено, що проєктна СПР АСБ не враховує

поточний стан надійності виконання функцій безпеки, досвід і результати проведених випробувань та інші фактори. Однак питання модернізації/оптимізації СПР АСБ у цій роботі не розглядалися.

У роботі [2] проведено детерміністичний аналіз надійності насосів АСБ ЯЕУ з ВВЕР у процесі випробувань у режимах роботи реактора на потужності та ППР. Однак питання модернізації/оптимізації СПР АСБ у цій роботі також не розглядалися.

У роботі [3] проведено аналіз впливу кількості проведених випробувань тепломеханічного обладнання на знос і залишковий за надійністю ресурс. Однак розроблені в цій роботі методи недостатньо обґрунтовані для кваліфікації модернізації СПР АСБ ЯЕУ з ВВЕР.

У роботі [4] представлено ризик-орієнтований метод модернізації стратегії випробувань на герметичність захисної оболонки ЯЕУ з ВВЕР у процесі ППР на основі аналізу результатів попередніх випробувань. Однак цей метод також недостатньо обґрунтований для кваліфікації модернізації СПР АСБ.

У роботі [5] представлено ризик-орієнтований метод кваліфікації модернізації стратегій технічного обслуговування, планових випробувань і ремонту систем важливих для безпеки (СВБ) ЯЕУ на основі аналізу результатів вірогіднісного аналізу безпеки (ВАБ) енергоблоків АЕС. У межах цього методу оцінюють вплив модернізації періодичності випробувань/ремонтів СВБ на інтегральний ймовірнісний показник безпеки енергоблоку АЕС - частоту пошкодження активної зони (ЧПАЗ). Однак домінуючими факторами оцінки ЧПАЗ є ймовірності відмов із загальних причин і помилкових дій персоналу під час управління аваріями [6]. Тому величина ЧПАЗ може бути не "чутлива" до змін періодичності випробувань/ремонтів СВБ.

Таким чином, актуальним питанням є розроблення методу кваліфікації модернізації СПР АСБ ЯЕУ з ВВЕР, що враховує поточний стан показників надійності, експлуатаційний досвід і результати попередніх випробувань/ремонтів устаткування АСБ, що визначає основну мету представленої роботи.

Метод кваліфікації модернізації СПР АСБ

Основні положення методу:

1.Визначальний показник надійності при кваліфікації СПР АСБ - коефіцієнт неготовності виконання функції безпеки, що визначає ймовірність виникнення критичної відмови в поточний момент часу t залежно від параметра інтенсивності потоку критичних відмов λ , встановлених у планових випробуваннях/ремонтах за минулий строк експлуатації [7]. Під критичною відмовою тут мається на увазі відмова виконання функцій безпеки (наприклад, відмова з увімкнення насоса, вимушене вимкнення насоса внаслідок порушення умов працездатності, течі в контурах АСБ та інші).

2.Критерій кваліфікації модернізації СПР АСБ - цільова функція ризику R , що визначає співвідношення коефіцієнтів неготовності виконання функцій безпеки проектної та модернізованої СПР АСБ.

3.Умови успішної кваліфікації - коефіцієнт неготовності виконання функцій безпеки модернізованої СПР не більший за коефіцієнт неготовності проектної СПР.

В основу методичного забезпечення обґрунтувань переходу на ремонт за надійністю АСБ [7] покладено ризик-орієнтований підхід. Передбачається, що після зупинки енергоблоку на ППР у плановий ремонт виводиться один із каналів АСБ. Після проведення планового ремонту проводяться послідовні випробування всіх каналів АСБ. У разі якщо в результаті цих випробувань буде виявлено відмову в будь-якому з неремонтованих каналів, той має бути переведений у стан ремонту. При цьому відповідно до проектних вимог відмова системи в період відсутності палива в реакторі або в разі, якщо працездатність системи не регламентована в процесі ППР, не впливає на коефіцієнт неготовності виконання призначених функцій безпеки. Тому тільки в граничному випадку (найбільш консервативно) інтервал визначення коефіцієнта неготовності відповідає тривалості ремонту енергоблоку $t_{ППР}$. В інших випадках для інтервалу інтегрування $K_{нр}$ приймаються менші значення, аж до нульових. Під час оцінок ймовірності відмови системи в ППР додатково враховується можливість переведення випробовуваного каналу в стан виконання призначених функцій безпеки з інтенсивністю потоку відмов λ_i . За даними досвіду експлуатації для більшості АСБ прийнятно $\lambda_i/\lambda \geq 10$. Передбачається також, що в результаті успішних випробувань каналу АСБ ймовірність відмови визначається тільки якістю технічного обслуговування безпосередньо під час цих випробувань.

Критеріями прийнятності модернізованої стратегії є умови неперевищення проектного рівня надійності за регламентованих значень періодичності випробувань $t_{оп}$ і припустимого часу виведення в непрацездатний стан каналу АСБ $t_p^{дон}$ під час роботи реактора на потужності.

Цільова функція ризику R для модернізованої стратегії (плановий ремонт тільки одного каналу) має вигляд [7].

$$R = K_{нр}(t_0, t_p) - K_{нр}(t_{оп}, t_p^{дон}) + K_{нр}^{ППР2}(t_0, t_p) - K_{нр}^{ППР0}(t_{оп}, t_p^{дон}) \quad (1)$$

де $K_{нр}(t_o, t_p)$; $K_{нр}(t_o, t_p^{доп})$ – відповідно коефіцієнти неготовності системи під час роботи реактора на потужності за модернізованих інтервалів випробувань t_o , часу ремонту системи t_p і регламентних значень $t_{ор}$, $t_p^{доп}$;

$K_{нр}^{ППР0}$ – коефіцієнт неготовності системи в процесі ППР за проектною стратегією;

$K_{нр}^{ППР2}$ – коефіцієнт неготовності системи в процесі ППР за модернізованою стратегією.

Аналіз результатів розрахункового моделювання

Результати розрахунків допустимих значень періодів очікування $t_o^{доп}$ для модернізованої стратегії без випробувань каналів, що не ремонтуються, за різної надійності обладнання ($\lambda = 10^{-6} - 10^{-3}$ 1/год) наведено на рис. 1 і 2. Згідно з отриманими результатами за $t_o \geq t_{ор}$ визначальний вплив на допустимий період очікування має зміна умов проведення планового ремонту каналів АСБ. В ухваленій стратегії за період ППР два канали перебувають у режимі оперативної готовності, і ймовірність їхньої відмови безперервно збільшується пропорційно інтенсивності потоку відмов для обладнання АСБ λ . Тому збільшення надійності обладнання (зменшення λ) призводить до збільшення допустимого значення періоду очікування (див. рис. 1). Так, при $\lambda < 10^{-3}$ 1/ч $t_o^{доп} > 240$ год.

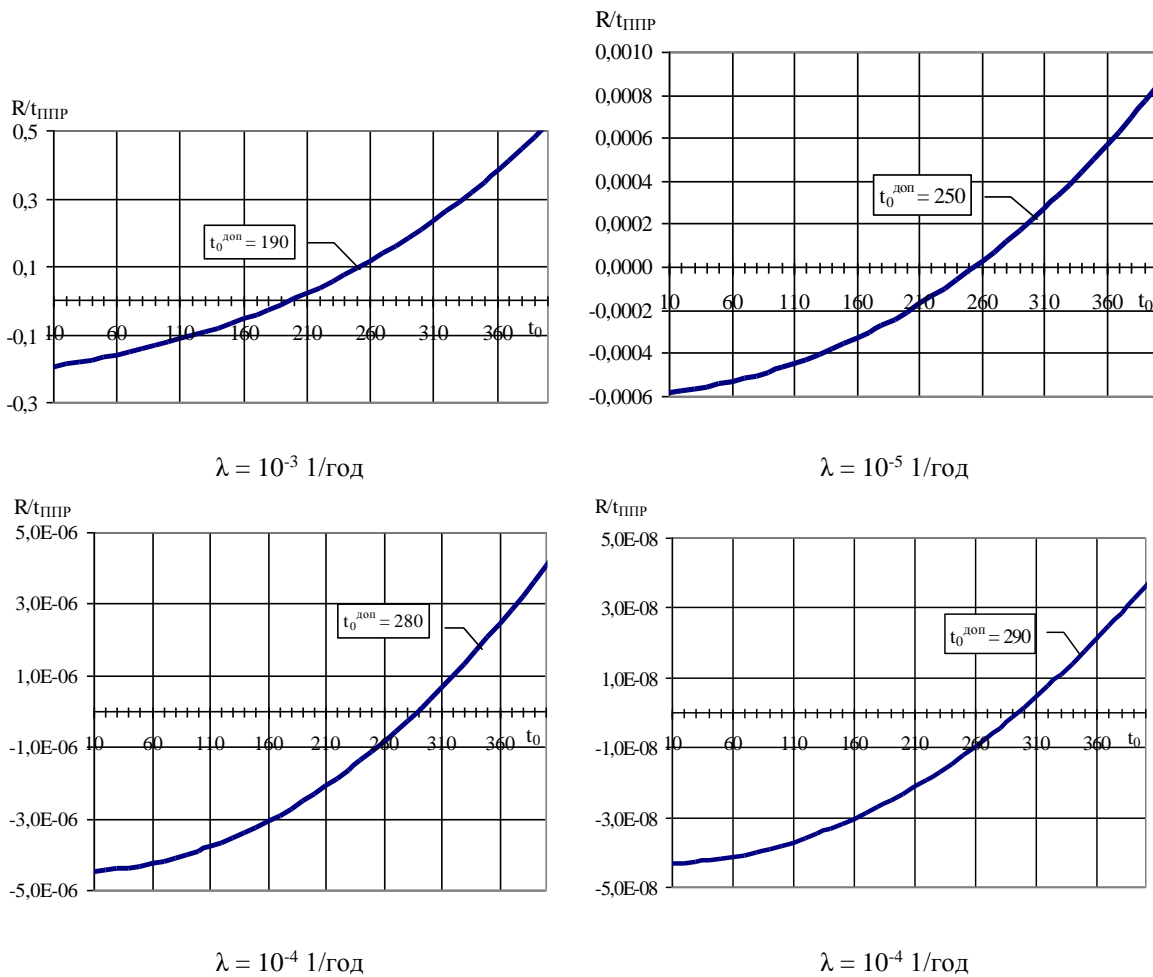


Рисунок 1 - Розрахункові оцінки допустимого часу періоду очікування $t_o^{доп}$ при $\tau_{ППР} = 1440$ год без випробувань неремонтованих каналів.

У разі зменшення часу $\tau_{ППР}$ (або проміжку часу, на якому необхідна працездатність щонайменше двох каналів АСБ у процесі ППР) вплив надійності обладнання має іншу тенденцію (див. рис. 2). У цьому випадку визначальним фактором за $t_o \geq t_{ор}$ є "запас" за надійністю, викликаний скороченням часу непланових ремонтів каналів АСБ під час роботи реактора на потужності t_p відносно до припустимих значень за проектом ($t_p^{доп} = 72$ год). "Запас" за надійністю щодо проектних умов пропорційний $\lambda(t_p - t_p^{доп})$. Тому для ситуацій зі скороченими термінами $\tau_{ППР}$ (або необхідного часу працездатності каналів, що не ремонтуються) збільшення надійності обладнання за інших рівних умов призводить до скорочення допустимих значень періоду очікування $t_o^{доп}$, але не менше ніж 240 год (див. рис. 2). У цьому випадку за великих значень $\tau_{ППР}$ також визначальним фактором $t_o^{доп}$ є вплив зміни проектною стратегії планового

ремонті АСБ у процесі ППР. Однак проведення випробувань у процесі ППР каналів, що не ремонтуються, призводить до загального підвищення надійності системи в процесі ППР (стосовно попереднього випадку), що зрештою розширює допустимий діапазон $t_0^{доп}$. Так, для всіх розглянутих значень надійності обладнання значення $t_0^{доп} = 320 - 380$ год, і зі збільшенням надійності обладнання (зменшенням λ) значення допустимого періоду очікування планових випробувань каналу АСБ під час роботи реактора на потужності збільшуються (рис. 3).

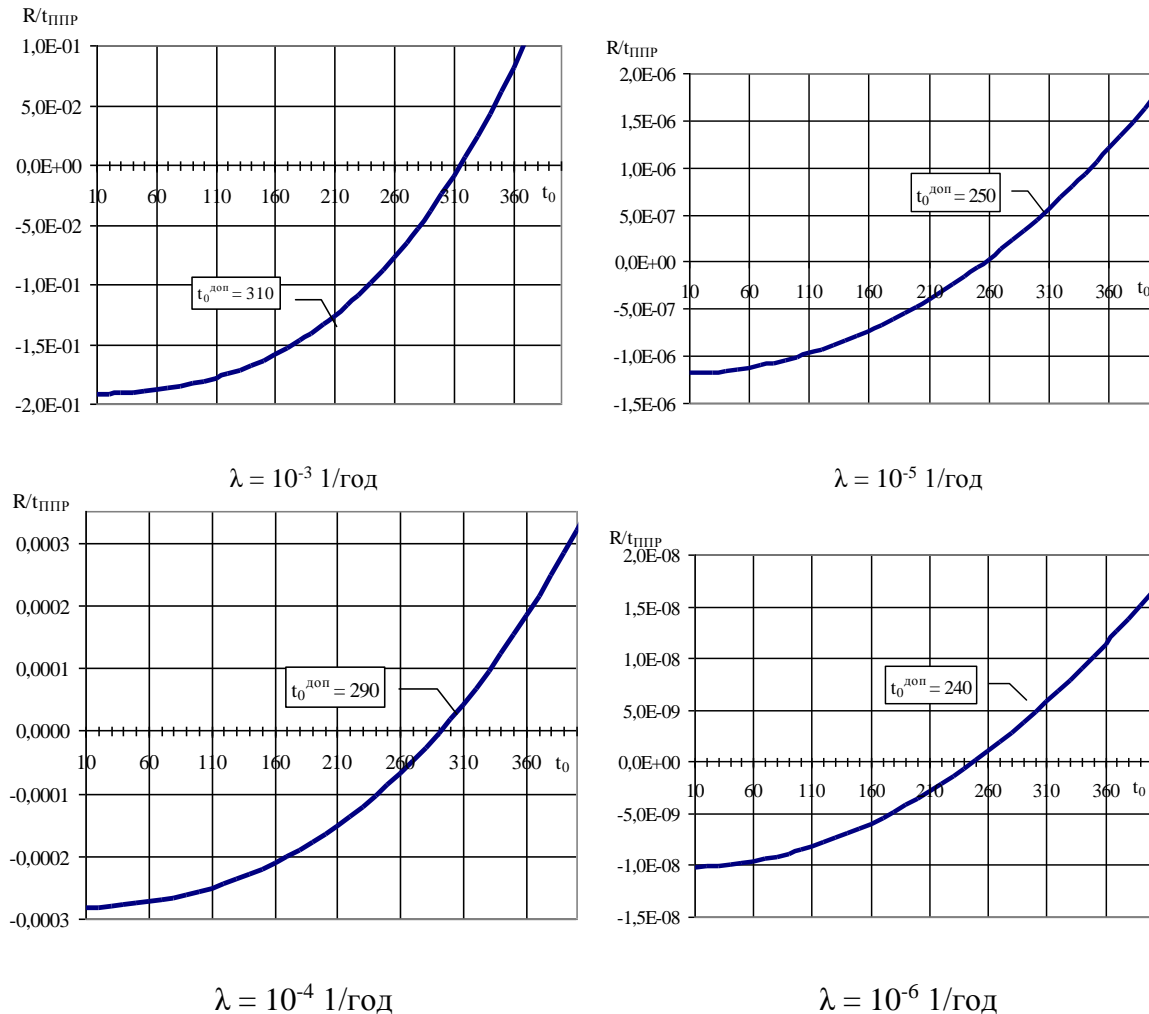


Рисунок 2 - Розрахункові оцінки допустимого часу періоду очікування $t_0^{доп}$ при $\tau_{ППР} = 480$ год без випробувань неремонтованих каналів.

Зменшення часу ремонту $\tau_{ППР}$ (або часу необхідної працездатності неремонтованих у процесі ППР) також призводить до зміни тенденції впливу надійності обладнання на $t_0^{доп}$, що визначається впливом "запасу за надійністю", спричиненим скороченням часу ремонту каналу АСБ на потужності t_p щодо допустимого проектом значення $t_0^{доп}$ (рис. 4).

Проведений статистичний аналіз показників надійності тепломеханічного обладнання активної частини САОЗ ВВЕР-1000/320 на основі експлуатаційних даних за порушеннями, відмовами і дефектами показав, що показники надійності каналу АСБ визначаються головним чином показниками надійності насосного обладнання. При цьому інтенсивність потоку відмов не перевищує значень 10^{-4} 1/год, час відновлення/ремонті при виявлених відмовах/пошкодженнях не перевищує 48 год.

Наведені результати розрахункових обґрунтувань оптимізації періодичності та обсягів ППР АСБ обґрунтовані для розглянутих систем активної частини САОЗ ВВЕР-1000/320.

Висновки

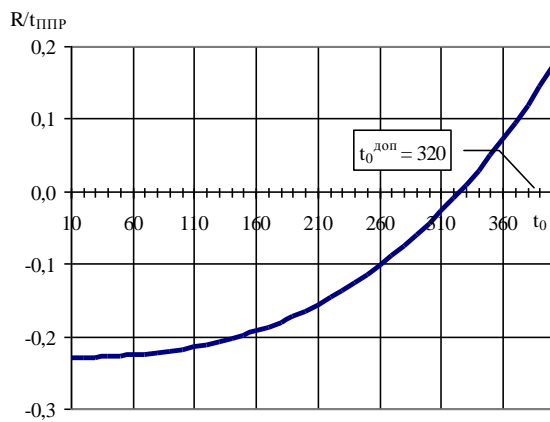
Отримані результати технічних і розрахункових обґрунтувань дають змогу сформулювати основні положення концептуального технічного рішення щодо зміни експлуатаційної практики планового ремонту каналів активної частини РАВЗ енергоблоків з ВВЕР-1000/320:

1. У рік капітального ремонту енергоблока ВВЕР-1000/320 плановий ремонт, контроль і технічне обслуговування в повному обсязі, передбаченому експлуатаційною і заводською документацією, а також технічний огляд, капітальний ремонт і ресурсне обстеження устаткування проходять усі канали систем безпеки, які планово випробовують під час роботи реактора на потужності.

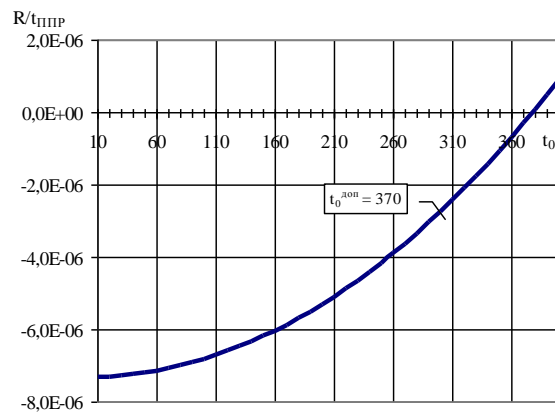
2. У наступні середні ремонти енергоблока ВВЕР-1000/320 у повному обсязі плановий ремонт, контроль і технічне обслуговування послідовно проходить тільки один із трьох каналів системи безпеки. У разі необхідності для каналів, що не ремонтуються, у середній ремонт проводять роботи з відновлення теплообмінної поверхні теплообмінника аварійного охолодження реактора, метрологічної атестації засобів вимірювання, контролю металу і ресурсного обстеження засобів автоматики та електрообладнання (ремонт каналу в неповному обсязі).

3. Обмеженням застосування стратегії планового ремонту одного з трьох каналів у середні ремонти енергоблока є виконання будь-якої з таких умов:

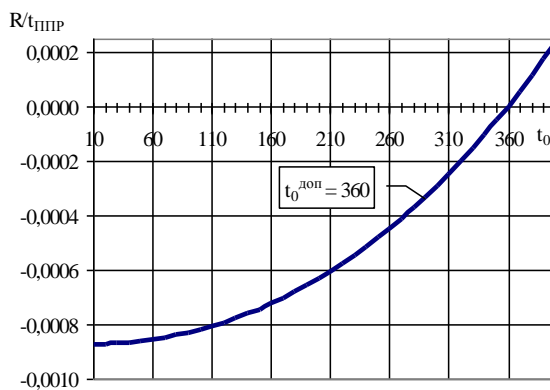
- відмова каналу в результаті передпускових випробувань систем безпеки;
- перевищення 48 год непрацездатності каналу системи безпеки через
- неплановий ремонт під час роботи реактора на потужності;
- перевищення значення ймовірного показника інтенсивності потоку відмов каналу системи безпеки понад 10^{-4} 1/год.



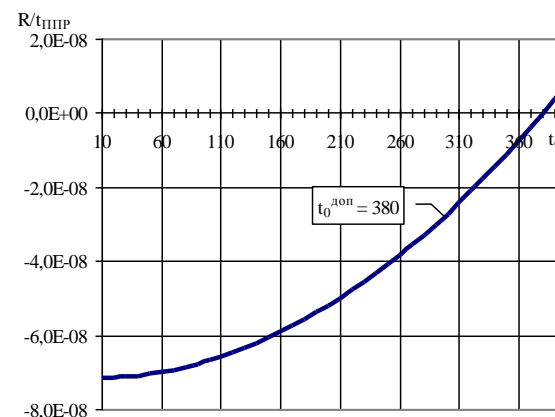
$\lambda = 10^{-3}$ 1/год



$\lambda = 10^{-5}$ 1/год



$\lambda = 10^{-4}$ 1/год



$\lambda = 10^{-6}$ 1/год

Рисунок 3 - Розрахункові оцінки допустимого часу періоду очікування $t_0^{\text{доп}}$ при $\tau_{\text{ППР}} = 1440$ год з урахуванням випробувань неремонтованих каналів.

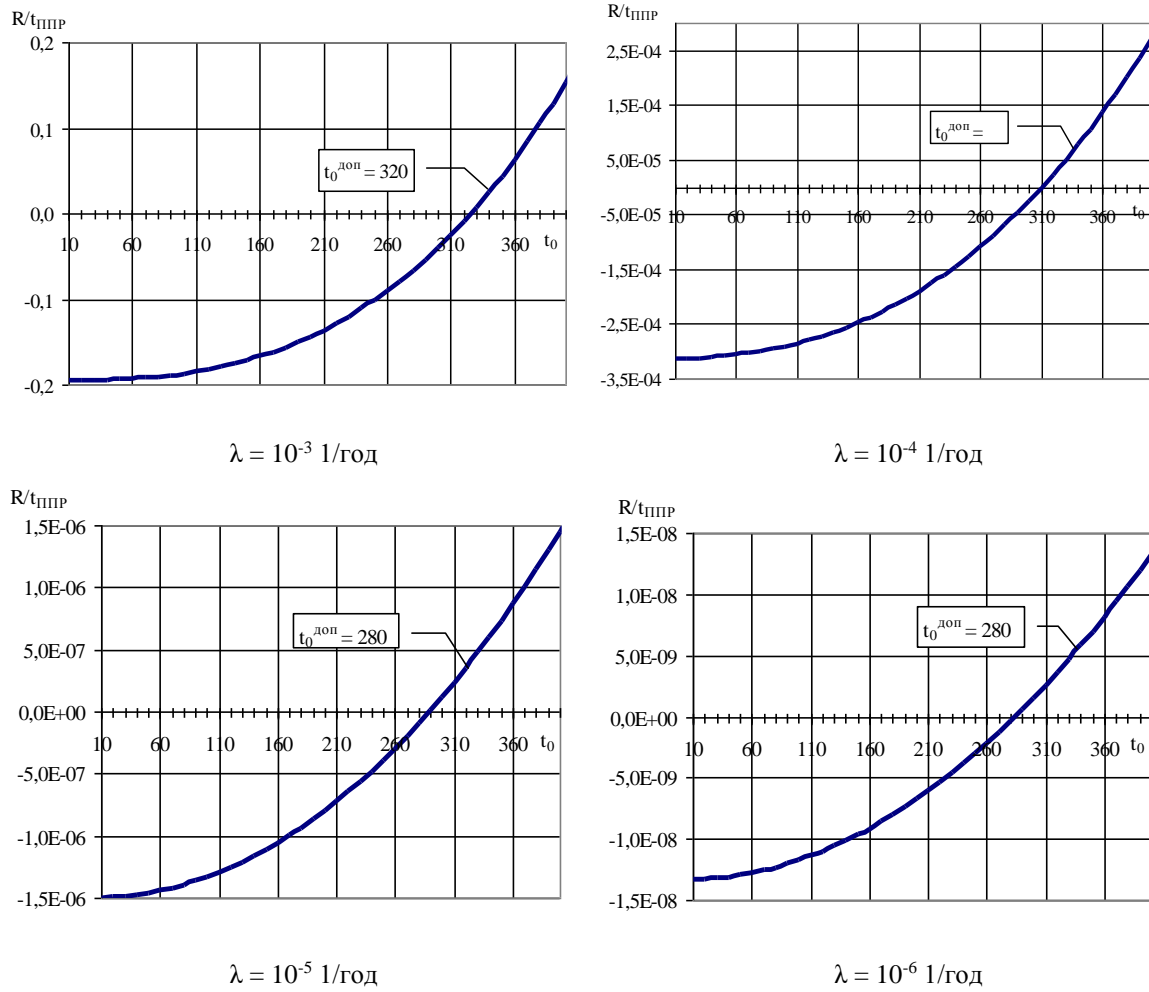


Рисунок 4 - Розрахункові оцінки допустимого часу періоду очікування $t_0^{\text{доп}}$ при $t_{\text{ППР}} = 480$ год з урахуванням випробувань неремонтованих каналів.

V.Skalozubov¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-2361-223X

O.Verinov¹, Ph. D. student. ORCID 0000-0002-0718-1532

A.Kanivets¹, Ph. D. student. ORCID 0009-0005-6135-7470

I.Verbylo¹, Ph. D. student. ORCID 0009-0006-3369-3896

V.Filatov², Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-3046-3546

¹National University “Odesa Polytechnic”

²National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

MODERNIZATION OF SCHEDULED MAINTENANCE STRATEGIES FOR ACTIVE SAFETY SYSTEMS OF NUCLEAR POWER PLANTS WITH VVER

The strategies for scheduled tests and repairs of active safety systems (with pumps) established by the technological regulations for safe operation of VVER NPP do not take into account many years of operating experience and the results of numerous tests of active safety systems, current reliability indicators and residual life of the main equipment, and other factors. The modernization/improvement of design strategies for scheduled maintenance and testing of active safety systems determines the need to develop appropriate methods for qualifying (justifying) modernized strategies. The paper presents a risk-based method for qualifying modernization of strategies for scheduled maintenance of active safety systems, which takes into account the experience of operation, scheduled maintenance and testing, as well as the current reliability of the main equipment. The developed method is based on the following provisions. The determining reliability indicator for qualifying strategies for scheduled maintenance of active safety systems is the safety function unavailability factor, which determines the probability of a critical failure at the current time depending on the parameter of the intensity of the critical failure flow established in scheduled tests/repairs over the past service life. A critical failure here means a failure to perform safety functions (e.g., failure to turn on a pump, forced pump shutdown due to a violation of performance conditions, leaks in the circuits of active safety systems, etc.) The qualification criterion for the modernization of active safety systems outage strategies is a target risk function that determines the ratio of the coefficients of unreadiness to perform safety functions of the design and modernized active safety systems outage strategies. The conditions for successful qualification are that the unavailability rate of the safety functions of the modernized scheduled maintenance strategy is not greater than the unavailability rate of the design scheduled maintenance strategy. Based on the developed method, the modernized strategy of scheduled repairs of the active part of the emergency core cooling systems of the VVER-1000 reactor is substantiated, and the limitations of the applicability of the modernized strategy are determined.

Keywords: active safety system, reliability-based repair.

References

- 1.Maintenance, Surveillance and In-Service Inspection in Nuclear Power Plants Safety Guide. Safety Standards Series No. NS-G-2.6 (2005) Vienna: IAEA, 104 p. (Rus).
- 2.NUREG-1493. Performance-Based Containment Leak-Test Program. U.S. Nuclear Regulatory Commission (September 2013).
- 3.NUREG-1150. Severe Accident Risks: An assessment for five U. S. Nuclear Power Plants. Final Summary Report (December 2012).
- 4.Davidenko, N. N. et al. (2009) Modern technologies for optimizing the maintenance and repair of systems and equipment of nuclear power plants. -, 145 p. (Rus).
- 5.NUREG-1777. Regulatory Effectiveness Assessment of Option B of Appendix J. U.S. Nuclear Regulatory Commission (August 2014).
- 6.Komarov, Ju. A., Pyshnyj, V. M., Skalozubov, V. I., Fol'tov, I. M. (2004) Development of an industry standard to reduce the frequency of comprehensive tests for leak tightness of the VVER containment system based on probabilistic methods. Nuclear and Radiation Safety, 2, 73—79. (Rus).
- 7.Komarov, Yu. A. (2013) Some research results by risk-inform approaches for NPP safety and operational efficiency. Nuclear Physics and Atomic Energy, 4, 356—362. (Rus).

Надійшла: 21.11.2023

Received: 21.11.2023