

В. І. Скалозубов, Ю. О. Комаров, Ю. С. Кацарський, В. Ю. Кочнева, В. В. Грибанов

*Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень у галузі енергетики та екології НАН України
«Одеської політехніки» та Мінекології України, просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна*

Оптимізація частоти випробувань запобіжних клапанів компенсатора тиску ВВЕР

Ключові слова:

випробування,
аварія,
запобіжний клапан,
компенсатор тиску,
методика,
частота,
енергоблок

Розроблено методику оптимізації частоти функціональних випробувань системи запобіжного клапана компенсатора тиску в період ремонту енергоблоку за навантажень, що відповідають умовам аварій та аварійних ситуацій, з урахуванням необхідної надійності контролю працездатності та нормативних вимог щодо умов міцності при циклічних термодинамічних та механічних навантажень. На основі розробленої методики запропоновано у відступ від положень додатків Технологічного регламенту безпечної експлуатації 3-го енергоблоку Рівненської АЕС оптимальну стратегію випробувань системи запобіжного клапана компенсатора тиску. Частота випробувань, пов'язаних із перевіркою спрацьовування імпульсно-запобіжного пристрою компенсатора тиску реальним підвищенням тиску в 1-му контурі, становить 1 раз на 8 років. Частота випробувань, пов'язаних із перевітками щільності затворів імпульсно-запобіжного пристрою компенсатора тиску, налаштування пружин та спрацьовування головного клапана за допомогою пневматичного випробувального стенду та вимірювального важеля, становить 1 раз на 4 роки. Перевірки системи запобіжного клапана компенсатора тиску, пов'язані з контролем схем автоматики та управління, відповідають частоті, установленій Технологічним регламентом безпечної експлуатації 3-го енергоблоку Рівненської АЕС. Після закінчення 8 років експлуатації або виникнення аварій, аварійних ситуацій, порушень нормальних умов експлуатації проводиться в повному обсязі технічний огляд системи запобіжного клапана компенсатора тиску та, у разі потреби, коригується стратегія випробувань у період ремонтних кампаній.

Вступ. Стан проблеми

Уроки інциденту 2009 р. на Рівненській АЕС із незакриттям запобіжного клапана компенсатора тиску (ЗК КТ) визначили необхідність не лише підвищення якості проведення ремонтних кампаній, а й оптимізації частоти випробувань ЗК КТ.

Необхідність оптимізації частоти випробувань ЗК КТ визначається такими основними факторами [1–3]:

частота випробувань має бути достатньою для підтвердження надійності та працездатності системи;

кожне випробування ЗК КТ у режимі «гарячої» зупинки відповідає умовам аварій з малими течями реакторного контуру;

надмірна кількість випробувань призводить до передчасного зносу/деградації та зниження залишкового ресурсу.

© В. І. Скалозубов, Ю. О. Комаров, Ю. С. Кацарський,
В. Ю. Кочнева, В. В. Грибанов, 2025. License CC BY 4.0

Необхідність оптимізації частоти випробувань ЗК КТ є особливо актуальною в післяпроектні терміни експлуатації енергоблоків АЕС.

Аналіз регламентних вимог до частоти випробувань ЗК імпульсно-запобіжного пристрою (ІЗП) КТ дозволяє зробити наведені нижче висновки.

1. Регламентом визначено шість щорічних (у період планово-попереджувальних ремонтів) функціональних перевірок працездатності ІЗП КТ і стану засобів/схем автоматики та управління та одне випробування з реальним спрацюванням при підвищеному тиску (у період капітального ремонту).

2. Гідровипробування на щільність та міцність (у тому числі і для ЗК КТ), а також регламентні випробування ЗК КТ визначені як режими нормальної експлуатації. Однак фактичні навантаження на елементи ЗК КТ у процесі цих випробувань відповідають умовам аварій та аварійних ситуацій (АС). Так, в умовах гідровипробувань на щільність (цілісність) перепад тиску становить 180 кг/см², а на міцність — 250 кг/см²; а для регламентних функціональних випробувань у діапазоні аварійного відкриття/закриття клапанів — від 170 до 196 кг/см².

3. Для гідровипробувань на щільність та міцність визначено допустимі цикли навантаження (100 та 60 циклів відповідно), а для функціональних випробувань вони фактично не сформульовані. Оскільки за функціональних випробувань елементи ЗК КТ знаходяться в умовах, близьких до аварійних, то як допустиму кількість циклів навантаження цих режимів слід застосовувати регламентну оцінку 30 циклів (сумарно допустима кількість аварійних режимів).

Таким чином, оптимізація частоти випробувань ЗК КТ є актуальним питанням забезпечення безпеки ядерної енергетики України.

Основні положення методичного забезпечення

Основні положення методичного забезпечення технічних обґрунтувань оптимізації ЗК КТ наведено нижче.

1. У цьому випадку під оптимізацією частоти випробувань ЗК КТ мається на увазі зміна регламентних стратегій випробувань системи ЗК КТ для забезпечення:

необхідної надійності контролю за працездатністю системи для виконання призначених проектом функцій безпеки;

нормативних вимог щодо умов міцності конструкцій системи проциклічних термодинамічних та механічних навантажень.

Перший із зазначених факторів визначає необхідність якнайчастішого проведення функціональних випробувань для підтвердження працездатності системи ЗК КТ. Другий фактор спрямований на зниження кількості надлишкових циклічних навантажень на ЗК КТ, викликаних безпосередньо випробуваннями. Врахування обох факторів і визначає оптимальну частоту випробувань.

2. Відповідно до норм розрахунку на міцність [4] умовами необхідної міцності та цілісності металу конструкцій при циклічних навантаженнях, викликаних перехідними та/або аварійними процесами, є

$$\sum_{j=1}^k \frac{N_j}{[N_d]} \leq \alpha = [\alpha_n], \quad (1)$$

де $j = 1, \dots, k$ — групи режимів, що мають однакові (близькі) амплітуди напруг (σ), спричинені термодинамічними та механічними циклічними навантаженнями; N_j — фактична кількість циклів навантаження; $[N_d]_j$ — допустима кількість циклів навантаження j -х режимів, що залежить, у загальному випадку, від властивостей металу та характерних амплітуд напруг j -го процесу; $[\alpha_n]$ — критерій надійності (для обладнання класу В за вимогами до безпеки експлуатації атомних енергоустановок [5], до якого в тому числі належить ЗК КТ, значення 0,4).

Допустима кількість циклів навантаження $[N_d]$ визначається відповідно до методичного забезпечення [4]. Однак у цьому випадку через відсутність достатньої інформації заводу-виробника ЗК КТ Sempell AG про склад та фізико-технічні характеристики металу конструкцій допустиму кількість циклів навантаження можна визначати відповідно до регламентних вимог Технологічного регламенту безпечної експлуатації (ТРБЕ) за умови припущення, що характеристики міцності металу ЗК КТ Sempell AG не гірші за проектні.

3. Відповідно до ТРБЕ 3-го енергоблоку Рівненської АЕС [6], випробування ЗК КТ належать до режимів нормальної експлуатації, проте термодинамічні та механічні навантаження під час випробувань (пов'язані з перевіркою спрацювання ІЗП (імпульсного клапана) КТ реальним підвищеним тиском у 1-му контурі (І1), перевіркою щільності затворів ІЗП КТ (І2), перевіркою налаштування пружин від вимірювального важеля або пневматичного

стенду Sempell (I3), перевіркою функціональної здатності ІЗП КТ зі спрацюванням головного клапана за допомогою пневматичного випробувального пристрою або вимірювального важеля (I4)) відповідають умовам спрацювання ЗК КТ під час аварій/АС, для яких відповідно до ТРБЕ [6] максимальна кількість циклів аварійного навантаження не повинна перевищувати 30 циклів.

Розрахунково-аналітичні оцінки та результати

З урахуванням прийнятих положень та припущень умова міцності для ЗК КТ має такий вигляд:

$$\frac{\Pi_{11}t + \Pi_{12}t + \Pi_{13}t + \Pi_{14}t}{[N_{\text{ДП}}]} + \sum_{i=1}^a \frac{N_A(t)_i}{[N_{\text{ДА}}]_i} + \sum_{i=1}^n \frac{N_H(t)_i}{[N_{\text{ДН}}]_i} + \sum_{i=1}^m \frac{\Pi_{\text{НУЕ}i}(t)t + V_i(t)}{[N_{\text{ДНУЕ}}]_i} \leq 0,4, \quad (2)$$

де Π_{11} — частота випробувань, пов'язаних із перевіркою спрацювання ІЗП (імпульсного клапана) КТ реальним підвищенням тиску в 1-му контурі, рік⁻¹; Π_{12} — частота випробувань, пов'язаних із перевіркою щільності затворів ІЗП КТ, рік⁻¹; Π_{13} — частота випробувань, пов'язаних із перевіркою налаштування пружин від вимірювального важеля, рік⁻¹; Π_{14} — частота випробувань, пов'язаних із перевіркою функціональної здатності ІЗП КТ зі спрацюванням головного клапана за допомогою пневматичного випробувального пристрою або вимірювального важеля, рік⁻¹; t — час експлуатації, рік; $[N_{\text{ДП}}]$ — допустима кількість циклів навантаження при випробуваннях з навантаженнями, що відповідають аварійним умовам; $[N_{\text{ДА}}]_i$ — допустима регламентна кількість циклів навантаження під час i -х аварій/АС; $N_A(t)_i$ — фактична кількість i -х аварій/АС; a — загальна кількість i -х видів аварій/АС; $N_H(t)_i$ — фактична кількість i -х порушень нормальних умов експлуатації (ПНУЕ); $[N_{\text{ДН}}]_i$ — допустима регламентна кількість циклів навантаження в i -х подіях, пов'язаних із ПНУЕ; n — загальна кількість режимів із ПНУЕ; $\Pi_{\text{НУЕ}i}$ — частота регламентного i -го режиму в нормальних умовах експлуатації (НУЕ); V_i — кількість позапланових пусків та зупинок енергоблоку; m — загальна кількість режимів із НУЕ; $[N_{\text{ДНУЕ}}]_i$ — допустима кількість циклів i -го режиму в НУЕ.

Тоді умова (2) оптимальної частоти випробувань, пов'язаних із навантаженнями, близькими до аварійних режимів, має такий вигляд:

$$\Phi_1 \leq \Phi_2,$$

$$\Phi_1 = \frac{\Pi_{11} + \Pi_{12} + \Pi_{13} + \Pi_{14}}{[N_{\text{ДП}}]} t, \quad (3)$$

$$\Phi_2 = 0,4 - \sum_{i=1}^m \frac{\Pi_{\text{НУЕ}i} t + V_i(t)}{[N_{\text{ДНУЕ}}]_i} - \sum_{i=1}^a \frac{N_A(t)_i}{[N_{\text{ДА}}]_i} - \sum_{i=1}^n \frac{N_H(t)_i}{[N_{\text{ДН}}]_i},$$

де Φ_1 — фактор вичерпання ресурсних циклів навантаження в результаті функціональних випробувань; Φ_2 — фактор зниження запасу циклів навантаження в результаті фактичних режимів з НУЕ, ПНУЕ та АС.

Якісна поведінка факторів Φ_1 і Φ_2 від часу представлена на рисунку.

При $t \leq T_0$ (гарантований термін ресурсу за циклами навантаження) умова міцності (3) виконується; а при $t > T_0$ умова міцності за циклами навантаження не виконується та експлуатація ЗК КТ не обґрунтована (не гарантована).

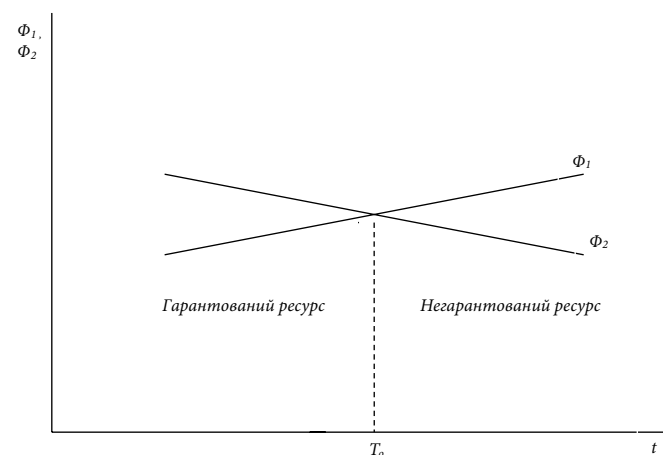
З отриманої умови (3) випливає наступне.

Навіть за відсутності (або незначного впливу) циклів навантаження, пов'язаних із ПНУЕ або АС, гарантований термін ресурсу T_0 не перевищує 8–10 років.

У разі відмови на закриття (після відкриття) ІЗП КТ ($[N_{\text{ДА}}] = 1$) гарантований термін ресурсу вичерпується за будь-яких умов. У цьому випадку необхідна заміна ІЗП КТ або повний технічний огляд подальшої працездатності та надійності.

Прийняте припущення про номінальну кількість циклів навантаження при функціональних випробуваннях (30 циклів) не впливає на отримані результати, оскільки ТРБЕ визначає аналогічні цикли на період призначеного терміну експлуатації енергоблоку.

Для визначення оптимальної частоти випробувань системи ЗК КТ у період ремонтних кампаній



Якісна поведінка факторів Φ_1 та Φ_2 від часу

з досвіду експлуатації приймається додаткова умова про те, що випробування, пов'язані з перевіркою щільності затворів, налаштуванням пружини та спрацьовуванням головного клапана за допомогою пневматичного випробувального пристрою або вимірювального важеля, проводяться частіше, ніж перевірки спрацьовування ІЗП КТ реальним підвищенням тиску за капітального ремонту:

$$\Pi_{12} = 2\Pi_{11}; \quad \Pi_{13} = 2\Pi_{11}; \quad \Pi_{14} = 2\Pi_{11}. \quad (4)$$

Тоді, без урахування впливу режимів з ПНУЕ та АС, а також позапланових зупинок енергоблоку, оптимальна частота функціональних випробувань системи ЗК КТ впливає з рішення (3) і (4) з урахуванням регламентної частоти та допустимих циклів навантаження в режимах з НУЕ:

$$\begin{aligned} \Pi_{11} &\approx 0,125 \text{ (1 раз на 8 років);} \\ \Pi_{12} = \Pi_{13} = \Pi_{14} &\approx 0,25 \text{ (1 раз на 4 роки).} \end{aligned}$$

Отримані результати дають змогу обґрунтувати (у відхилення від положень ТРБЕ 3-го енергоблоку Рівненської АЕС) наведену нижче стратегію випробувань системи ЗК КТ.

1. Частота випробувань, пов'язаних із перевіркою спрацьовування ІЗП (імпульсного клапана) КТ реальним підвищенням тиску в 1-му контурі становить 1 раз на 8 років.

2. Частота випробувань, пов'язаних з перевіркою щільності затворів ІЗП КТ, налаштування пружин та спрацьовування головного клапана за допомогою пневматичного випробувального стенду та вимірювального важеля, становить 1 раз на 4 роки.

3. Перевірки системи ЗК КТ, пов'язані з контролем схем автоматики та управління, відповідають частоті, встановленій ТРБЕ 3-го енергоблоку Рівненської АЕС.

4. Після закінчення 8 років експлуатації або виникнення аварій, АС, ПНУЕ проводиться в повному обсязі технічний огляд системи ЗК КТ та, у разі потреби, коригується стратегія випробувань у період ремонтних кампаній.

Висновки

1. Розроблено методику оптимізації частоти функціональних випробувань системи ЗК КТ у період ремонту енергоблоку за навантажень, що відповідають умовам аварій/АС, з урахуванням необхідної

надійності контролю працездатності та нормативних вимог щодо умов міцності під час циклічних термодинамічних та механічних навантажень.

2. На основі розробленої методики запропоновано у відступ від додатків ТРБЕ 3-го енергоблоку Рівненської АЕС оптимальну стратегію випробувань системи ЗК КТ:

частота випробувань, пов'язаних із перевіркою спрацьовування ІЗП КТ реальним підвищенням тиску в 1-му контурі становить 1 раз на 8 років;

частота випробувань, пов'язаних із перевіркою щільності затворів ІЗП КТ, налаштування пружин та спрацьовування головного клапана за допомогою пневматичного випробувального стенду та вимірювального важеля, становить 1 раз на 4 роки;

перевірки системи ЗК КТ, пов'язані з контролем схем автоматики та управління, відповідають частоті, установленій ТРБЕ 3-го енергоблоку Рівненської АЕС;

після закінчення 8 років експлуатації або виникнення аварій, АС, порушень нормальних умов експлуатації проводиться в повному обсязі технічний огляд системи запобіжного клапана компенсатора тиску ЗК КТ та, у разі потреби, коригується стратегія випробувань у період ремонтних кампаній.

Список використаної літератури

1. Кваліфікація стратегій управління аваріями з повним тривалим знеструмленням ядерних енергоустановок із ВВЕР / В.І. Скалозубов, О.М. Верінов, І.М. Вербило [та ін.] // Ядерна енергетика та довкілля. – 2024. – № 1 (29). – С. 10–15. – doi.org/10.31717/2311-8253.24.1.3.
2. Criteria and conditions of thermal hydrodynamic instability in the circuits of natural circulation of nuclear power plants in case of leak accidents / V.I. Skalozubov, Yu. O. Komarov, O. A. Dorozh [et al.] // Problems of Atomic Science and Technology. – 2024. – № 2. – Р. 66–69. – doi.org/10.46813/2024-150-066.
3. Ризик-орієнтований метод оптимізації стратегії планового ремонту за технічним станом систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок / В.І. Скалозубов, О.М. Верінов, А.В. Канівець [та ін.] // Ядерна енергетика та довкілля. – 2023. – № 3 (28). – С. 10–15. – doi.org/10.31717/2311-8253.23.3.
4. ПН АЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
5. НП 306.2.227-2020. Загальні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації обладнання й трубопроводів атомних станцій. – Київ : ДІЯРУ, 2020.

6. 3-Р-РАЕС. Технологічний регламент безпечної експлуатації енергоблоку № 3 Рівненської АЕС. – Кузнецовськ, 2009.

**V. I. Skalozubov, Yu. O. Komarov, Yu. S. Katsarskyi,
V. Yu. Kochnieva, V. V. Hrybanov**

Interagency Center for Fundamental Scientific Research in Energy and Ecology Sector of the National Academy of Sciences of Ukraine, Odesa Polytechnic and Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine, 1, Shevchenko Ave, Odesa, 65044

Optimization of the Test Frequency of Pressurizer Safety Valves in VVER Reactors

A methodology has been developed to optimize the frequency of functional tests of the pressurizer safety valve system during the power unit maintenance period under loads corresponding to the conditions of accidents/emergency, taking into account the required reliability of operability monitoring and regulatory requirements for strength conditions under cyclic thermodynamic and mechanical loads.

Based on the developed methodology, an optimal strategy for testing the pressurizer safety valve system is proposed as a deviation from the Annexes to the Technological Regulations for the Safe Operation of the Unit 3 of the Rivne NPP:

The test frequency related to checking the operation of the pilot operated safety valve of the pressurizer with a real increase in primary circuit pressure is once every 8 years;

The test frequency related to checking the tightness of the locks of the pilot operated safety valve of the pressurizer, adjustment of the springs and activation of the main valve using a pneumatic test stand and a measuring lever is once every 4 years;

Tests of the safety valve system of the pressurizer, related to monitoring automation and control schemes,

correspond to the frequency established in the Technological Regulations for the Safe Operation of the Unit 3 of the Rivne NPP;

After 8 years of operation or the accidents, emergency situations, violations of normal operating conditions, a full technical inspection of the pressurizer safety valve system is performed and, if necessary, the test strategy is adjusted during the maintenance campaigns.

Keywords: test, accident, safety valve, pressurizer, frequency, methodology, power unit.

References

1. Skalozubov V. I., Vierinov O. M., Verbylo I. M., Kochnieva V. Yu., Kanivets A. V. (2024). [Qualification of management strategies for continuous blackout accident at nuclear power plants with VVER]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 1 (29), pp. 23–28. doi.org/10.31717/2311-8253.24.1.3. (in Ukr.)
2. Skalozubov V. I., Komarov Yu. O., Dorozh O. A., Kanivets A. V., Filatov V. I. (2024). Criteria and conditions of thermal hydrodynamic instability in the circuits of natural circulation of nuclear power plants in case of leak accidents. *Problems of Atomic Science and Technology*, vol. 2, pp. 66–69. doi.org/10.46813/2024-150-066.
3. Skalozubov V. I., Vierinov O. M., Kanivets A. V., Kochnieva V. Yu., Bundiev D. S., Hayo H. (2023). [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*, vol. 3 (28), pp. 10–15. doi.org/10.31717/2311-8253.23.3. (in Ukr.)
4. PN AE G-7-002-86. [Standards for calculating the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 525 p. (in Rus.)
5. NP 306.2.227-2020. [General safety requirements for the installation and operation of equipment and pipelines of nuclear power plants]. Kyiv: SNRIU, 2020. (in Ukr.)
6. 3-R-RAES. [Technological regulation of safe operation of power unit 3 of the Rivne NPP]. Kuznetsovsk, 2009. (in Ukr.)

Надійшла / Received 21.10.2024

Рекомендована до друку / Accepted 13.10.2025