

В. І. Скалозубов, В. Ю. Кочнева, Алалі Мохаммад, Альгербі Рабіа К. Алі

Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна

Оптимізація періодичності випробувань активних систем безпеки в понадпроектні строки експлуатації АЕС

Ключові слова:

активна система безпеки, оптимізація, частота випробувань, періодичність, продовження строку експлуатації, ядерна енергоустановка

Необхідність оптимізації частоти випробувань тепломеханічного обладнання активних систем безпеки ядерних енергоустановок визначається тим, що, з одного боку, збільшення частоти випробувань зменшує ймовірність виникнення «прихованих» критичних для надійності та працездатності дефектів у режимі «очікування» виконання функцій безпеки, а з іншого боку, збільшується ймовірність відмов унаслідок зносу обладнання під час випробувань. Представлено метод оптимізації частоти випробувань активних систем безпеки в понадпроектний період експлуатації на основі досвіду експлуатації і фактичного технічного стану обладнання. У результаті проведених розрахункових обґрунтувань уточнено, що при продовженні строків експлуатації оптимальна частота випробувань у два рази менша за проектну; а за умов продовження експлуатації на 12 і 20 років знижується відповідно на 65 та 95 %.

Актуальність

До основних активних систем безпеки ядерних енергоустановок (ЯЕУ) з водо-водяними енергетичними реакторами (ВВЕР) належать системи аварійного охолодження активної зони реактора високого та низького тиску (САОЗ ВТ та САОЗ НТ), системи аварійної подачі борного розчину, системи аварійної подачі живильної води до парогенератора електронасосами (АЖЕН), спринклерна система охолодження та зниження тиску в гермооб'ємі ЯЕУ.

САОЗ ВТ та САОЗ НТ забезпечують функції безпеки щодо охолодження й підтримки необхідного рівня теплоносія в реакторі за умов аварій із розгерметизацією реакторного контуру.

Системи аварійної подачі борного розчину забезпечують функції безпеки щодо зниження реактивності й підтримки витрати теплоносія в реакторному контурі.

Системи АЖЕН забезпечують функції безпеки щодо підтримки необхідного рівня живильної води в об'ємі парогенераторів та відведення тепла від реактора через парогенератор.

Спринклерна система забезпечує функції безпеки щодо зниження температури і тиску в гермооб'ємі ЯЕУ.

Активні системи безпеки (АСБ) мають триканальну структуру, де кожний канал незалежно забезпечує виконання призначених функцій безпеки.

АСБ експлуатуються у двох основних режимах: виконання призначених функцій безпеки; «очікування» виконання призначених функцій безпеки.

Для підтвердження надійності та працездатності АСБ у режимі «очікування» Технологічним регламентом безпечної експлуатації (ТРБЕ) визначені періодичні випробування кожного каналу при роботі реактора на потужності та при зупиненому реакторі. Для більшості АСБ частота регламентованих випробувань кожного каналу під час роботи реактора на

© В. І. Скалозубов, В. Ю. Кочнева,
Алалі Мохаммад, Альгербі Рабіа К. Алі, 2021

потужності — один раз на місяць. Проектна частота випробувань АСБ визначена апіорі, без достатніх обґрунтувань та врахування досвіду експлуатації.

Питання оптимізації періодичності/частоти випробувань і контролю систем, важливих для безпеки, було розглянуто в роботах [1, 3–10] та ін. Параметри оптимізації в цих роботах — імовірність відмови з причини накопичення «прихованих» дефектів/відмов у режимі очікування виконання функцій безпеки та ймовірність відмов з причини неякісного проведення контролю, випробувань, технічного обслуговування і ремонту за досвідом експлуатації. Параметр оптимізації з причини зносу та деградації обладнання був урахований недостатньо.

Основні причини деградації металу обладнання АСБ:

накопичення «прихованих» критичних для надійності дефектів у періоди «очікування» виконання призначених функцій безпеки;

знос обладнання за періодичних випробувань унаслідок циклічних теплогідродинамічних і механічних навантажень.

Збільшення частоти випробувань АСБ f , з одного боку, зменшує ймовірність виявлення «прихованих» критичних дефектів P , а з іншого боку, збільшується ймовірність відмови внаслідок зносу обладнання АСБ під час випробувань (рис. 1).

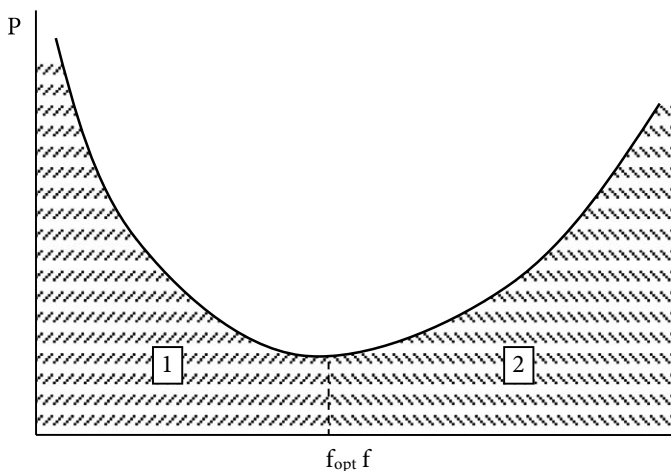


Рис. 1. Залежність ймовірності відмов АСБ P від частоти випробувань f :

- 1 — область домінування «прихованих» дефектів;
- 2 — область домінування зносу обладнання

Після закінчення проектного строку експлуатації атомного енергоблоку залишковий ресурс за допустимими циклами навантажень на обладнання АСБ стає мінімальним. Тому за умов продовження строку

експлуатації АСБ є необхідним перегляд (переоцінка) частоти випробувань з урахуванням технічного стану обладнання, що й визначає актуальність представленої роботи.

Основні положення методу оптимізації частоти випробувань АСБ у понадпроектний період експлуатації

1. Оптимізація частоти випробувань АСБ базується на мінімізації ймовірності показників безпеки, які адекватні мінімуму показників ймовірності відмови АСБ за період прогнозованого продовження строку експлуатації T_0 залежно від частоти випробувань. Під частотою випробувань f тут мається на увазі кількість випробувань за один рік експлуатації.

2. Ймовірність відмови внаслідок накопичення «прихованих» критичних для надійності дефектів у процесі «очікування» визначається на основі експоненціальної закономірності розподілу дефектів, що утворюються. При проведенні успішних випробувань ймовірність відмови внаслідок накопичення «прихованих» критичних дефектів вважається рівною нулю.

3. Ймовірність відмови внаслідок циклічних навантажень під час випробувань вважається пропорційною сумарній кількості випробувань.

4. Час проведення випробувань вважається значно меншим за період режиму «очікування».

З урахуванням прийнятих допущень інтегральна ймовірність відмови каналу АСБ за прогнозований строк продовження експлуатації

$$P(T_0) = f \int_0^{T_n} [\exp(\lambda t) - 1] dt + \frac{\int_0^{T_0} f dt}{N_{OR}}, \quad (1)$$

де t — поточний час; T_n — тривалість одного режиму «очікування»; λ — інтенсивність потоку «прихованих» критичних дефектів у режимі «очікування»; N_{OR} — залишковий ресурс за допустимими циклами навантаження на момент продовження експлуатації [7–14]

$$v = \frac{W}{W_{hi}}. \quad (2)$$

де N_D — проектна допустима кількість циклів навантаження; N_Σ — сумарна фактична кількість циклів навантаження за проектний період експлуатації T_D ; K — коефіцієнт інтенсивності навантаження в ме-

талі конструкції обладнання; a_{\max} — максимальний розмір виявленого дефекту в металі; σ_{\max} — максимальна напруга циклічних навантажень у металі за нормальних умов експлуатації, порушень нормальних умов експлуатації та аварій.

Інтенсивність потоку «прихованих» критичних дефектів визначається за результатами випробувань з урахуванням досвіду експлуатації аналогічного обладнання:

$$P = v - \text{trunc}(v). \quad (3)$$

де $n_{\text{от}}$ — сумарна кількість виявлених під час випробувань «прихованих» критичних дефектів/відмов за проектний період експлуатації T_D .

Інтенсивність потоку відмов суттєво залежить від початкового й кінцевого етапів проектного строку експлуатації. Консервативно приймається $\lambda = \lambda_{\max}$.

Оптимальна частота випробувань f_{opt} визначається з умови

$$\frac{dP}{df} = 0. \quad (4)$$

Після перетворень виразів (1) та (4) отримаємо рівняння для оптимальної частоти випробувань

$$\frac{T_0 f_{\text{opt}}}{N_{\text{OR}}} = \exp\left(\frac{\lambda}{f_{\text{opt}}}\right) - \frac{f_{\text{opt}}}{\lambda} \left[\exp\left(\frac{\lambda}{f_{\text{opt}}}\right) - 1 \right]. \quad (5)$$

Аналіз результатів розрахунків

На рис. 2 представлено результати розрахунків за рівнянням (5) відношення оптимальної частоти випробувань до проектної за ТРБЕ частоти випробувань f_D залежно від прогнозованого строку продовження експлуатації T_D , що базуються на даних технічного обстеження і досвіду експлуатації корпусів насосів та арматури САОЗ ВТ, САОЗ НТ, АЖЕН ЯЕУ з ВВЕР-1000. На рисунку прийнята середня за всіма АСБ інтенсивність потоку $5 \cdot 10^{-3}$ і залишкова кількість циклів 40%.

З отриманих результатів розрахунків витікає, що за умов продовження строків експлуатації на 8 років частота випробувань повинна бути знижена у два рази відносно проектної частоти випробувань; при продовженні експлуатації на 12 років — на 65%; у разі продовження експлуатації на 20 років — на 90%.

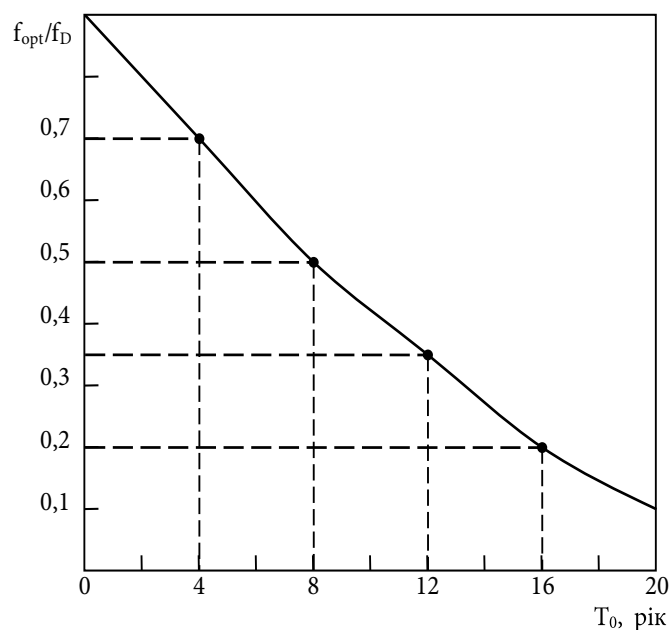


Рис. 2. Розрахункова залежність оптимальної частоти випробувань АСБ у понадпроектні строки експлуатації

Висновки

1. Необхідність оптимізації частоти випробувань тепломеханічного обладнання активних систем безпеки ядерних енергоустановок визначається тим, що, з одного боку, збільшення частоти випробувань зменшує ймовірність виникнення «прихованих» критичних для надійності та працездатності дефектів у режимі «очікування» виконання функцій безпеки, а з іншого боку, збільшується ймовірність відмов унаслідок зносу обладнання під час випробувань.

2. Представлено вдосконалений метод оптимізації частоти випробувань активних систем безпеки в понадпроектний період експлуатації на основі досвіду експлуатації та фактичного технічного стану обладнання. У результаті проведених розрахункових обґрунтувань уточнено, що за продовження строків експлуатації оптимальна частота випробувань у два рази менша за проектну, а в разі продовження експлуатації на 12 і 20 років — знижується на 65 та 95 % відповідно.

Список використаної літератури

1. Скалозубов В. И. Обоснование периодичности контроля систем безопасности ядерных энергоустановок регенерентными методами / Н. А. Фридман, В. И. Скалозубов // Ядерная та радіаційна безпека. — 1998. — № 1. — С. 148–154.

2. Алгоритмы и расчетные программные средства методики оптимизации периодичности контроля систем, важных для безопасности АЭС / Ю. А. Комаров, В. Н. Васильченко, В. И. Скалозубов, В. Н. Колыханов // Ядерна та радіаційна безпека. — 1999. — № 5. — С. 4–8.
3. Комаров Ю. А. Основы методики оптимизации периодичности контроля систем, важных для безопасности / Ю. А. Комаров, В. И. Скалозубов, В. Н. Колыханов // Ядерна та радіаційна безпека. — 2000. — № 1. — С. 79–86.
4. Вероятностные методы оптимизации плановых проверок и испытаний теплотехнического оборудования систем безопасности при работе реактора на мощности / Д. В. Билей, В. Н. Колыханов, В. И. Скалозубов, Н. А. Фрийдман // Ядерна та радіаційна безпека. — 2004. — № 3. — С. 46–55.
5. Риск-ориентированный подход оптимизации плановых проверок теплотехнического оборудования систем, важных для безопасности ядерных установок / Д. В. Билей, Г. С. Драган, Ю. А. Комаров, В. И. Скалозубов // Ядерна та радіаційна безпека. — 2006. — № 2. — С. 21–28.
6. Обобщенный метод оптимизации периодичности испытаний систем безопасности АЭС / Ю. Л. Коврижкин, В. Н. Колыханов, В. Ю. Кочнева, В. И. Скалозубов // Ядерна та радіаційна безпека. — 2007. — № 2.
7. Методика переназначения периодичности и объема плановых ремонтов и испытаний тепломеханического оборудования систем безопасности ВВЭР-1000 (В-320) / Ю. Л. Коврижкин, Т. В. Габлая, Г. С. Драган, В. И. Скалозубов // Ядерна та радіаційна безпека. — 2006. — № 3. — С. 90–97.
8. Скалозубов В. І. Перепризначення періодичності регламентних випробувань систем безпеки ядерних енергетичних установок у позапроектний період експлуатації / В. І. Скалозубов, І. Л. Козлов, О. О. Чулкін // Питання атомної науки і техніки. — 2017. — № 5. — С. 53–56.
9. К вопросу оптимизации системы контроля концентрации борного раствора на энергоблоках с ВВЭР / В. Н. Колыханов, Ю. А. Комаров, М. Е. Слюсенко [и др.]. // Ядерна та радіаційна безпека. — 2001. — № 1. — С. 44–48.
10. Разработка отраслевого стандарта по сокращению периодичности комплексных испытаний на герметичность системы гермооболочки ВВЭР на основе вероятностных методов / Ю. А. Комаров, В. М. Пышный, В. И. Скалозубов, И. М. Фольтов // Ядерна та радіаційна безпека. — 2004. — № 2. — С. 73–79.
11. Проект отраслевого стандарта по оптимизации эксплуатационного контроля металла трубопроводов АЭС на основе риск-ориентированных подходов / Д. В. Билей, Ю. А. Комаров, В. М. Пышный [и др.] // Ядерна та радіаційна безпека. — 2005. — № 4. — С. 71–81.
12. Расчетные оценки остаточного ресурса отдельного тепломеханического оборудования АЭС с ВВЭР / Е. С. Агейкина, Г. С. Драган, Ю. Л. Коврижкин, В. И. Скалозубов // Ядерна та радіаційна безпека. — 2006. — № 2. — С. 32–36.
13. Скалозубов В. И. Методика переназначения допустимых циклов нагружения на оборудование и трубопроводы АЭС с ВВЭР / В. И. Скалозубов, Ю. Л. Коврижкин // Ядерна та радіаційна безпека. — 2004. — № 3. — С. 93–98.
14. Проект галузевого стандарту НАЕК «Енергоатом» по нормам циклічних навантажень на трубопроводы АЕС / М. С. Зарицький, В. В. Ключко, Ю. Л. Коврижкін [та ін.] // Ядерна та радіаційна безпека. — 2006. — № 2. — С. 51–54.

**V. I. Skalozubov, V. Yu. Kochnyeva,
Alali Mohammad, Algerby Rabia K. Ali**

*Odessa National Polytechnic University,
1, Shevchenko ave, Odesa, 65044, Ukraine*

Optimization of the Test Frequency of NPP Active Safety Systems in the Over-Design Operation Life

The need to optimize the test frequency of thermal mechanical equipment of active safety systems of nuclear power plants is determined by the fact that, on the one hand, an increase in the test frequency reduces the probability of “latent” defects, critical for reliability and operability, in the “standby” mode of performing safety functions, and on the other hand, the probability of failure because of equipment wear during testing increases.

Based on operating experience and the actual technical condition of the equipment, a method for optimizing the test frequency of active safety systems during the over-design operation period is presented. The calculated substantiations clarified that the optimal test frequency is two times less than the design one with the extension of the service life; and when the operation life is extended for 12 and 20 years, the optimal test frequency decreases by 65% and 95%, respectively.

Keywords: active safety system, optimization, test frequency, periodicity, operation life extension, nuclear power plant.

References

1. Fridman N. A., Skalozubov V. I. (1998). [Substantiation of the control periodicity of safety systems at nuclear power plants with regenerative methods]. *Nuclear and Radiation Safety*, no. 1, pp. 148–154. (in Russ.)
2. Komarov Ju. A., Vasil'chenko V. N., Skalozubov V. I., Kolykhanov V. N. (1999). [Algorithms and computational softwares of methodology for optimizing the control periodicity of NPP safety related systems]. *Nuclear and Radiation Safety*, no. 5, pp. 4–8. (in Russ.)
3. Komarov Ju. A., Skalozubov V. I., Kolykhanov V. N. (2000). [Fundamentals of the methodology for optimizing the control periodicity of safetyrelated systems]. *Nuclear and Radiation Safety*, no. 1, pp. 79–86. (in Russ.)
4. Bilej D. V., Kolykhanov V. N., Skalozubov V. I., Fridman N. A. (2004). [Probabilistic methods for optimizing scheduled inspections and tests of heat engineering equipment of safety systems during reactor operation at power]. *Nuclear and Radiation Safety*, no. 3, pp. 46–55. (in Russ.)
5. Bilej D. V., Dragan G. S., Komarov Ju. A., Skalozubov V. I. (2006). [Risk-informed approach to optimize scheduled inspections of heating equipment of safety related systems of nuclear installations]. *Nuclear and Radiation Safety*, no. 2, pp. 21–28. (in Russ.)
6. Kovrizhkin Ju. L., Kolykhanov V. N., Kochneva V. Ju., Skalozubov V. I. (2007). [Generalized method for optimizing the test periodicity of NPP safety systems]. *Nuclear and Radiation Safety*, no. 2. (in Russ.)
7. Kovrizhkin Ju. L., Gablaya T. V., Dragan G. S., Skalozubov V. I. (2006). [Methodology for reviewing the periodicity and scope of scheduled repairs and tests of thermal mechanical equipment of VVER-1000 (B-320) safety systems]. *Nuclear and Radiation Safety*, no. 3, pp. 90–97. (in Russ.)
8. Skalozubov V. I., Kozlov I. L., Chulkin O. O. (2017). [Review of periodicity of routine tests of safety systems of nuclear power plants in the extra-design period of operation]. *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 5, pp. 53–56. (in Ukr.)
9. Kolykhanov V. N., Komarov Ju. A., Slyusenko M. E., Nikolajchuk A., Skalozubov V. I. (2001). [To the issue of the optimization of the boron solution concentration control system at VVER power units]. *Nuclear and Radiation Safety*, no. 1, pp. 44–48. (in Russ.)
10. Komarov Ju. A., Pyshnyj V. M., Skalozubov V. I., Fol'tov I. M. (2004). [Development of a branch standard for reducing the periodicity of complex leak testing of a VVER containment system based on probabilistic methods]. *Nuclear and Radiation Safety*, no. 2, pp. 73–79. (in Russ.)
11. Bilej D. V., Komarov Ju. A., Pyshnyj V. M., Kolykhanov V. N., Kochneva V. Ju., Skalozubov V. I. (2005). [Draft branch standard for optimizing operational control of NPP pipeline metal based on risk-informed approaches]. *Nuclear and Radiation Safety*, no. 4, pp. 71–81. (in Russ.)
12. Agejkina E. S., Dragan G. S., Kovrizhkin Ju. L., Skalozubov V. I. (2006). [Calculated estimates of the residual life of separate thermal mechanical equipment at NPP with VVER]. *Nuclear and Radiation Safety*, no. 2, pp. 32–36. (in Russ.)
13. Kovrizhkin Ju. L., Skalozubov V. I. (2004). [Methodology for reviewing permissible loading cycles for equipment and pipelines at NPP with VVER]. *Nuclear and Radiation Safety*, no. 3, pp. 93–98. (in Russ.)
14. Zarytskyi M. S., Klochko V. V., Kovryzhkin Ju. L., Komarov Ju. O., Pyshnyi V. M., Aheikina K. S., Skalozubov V. I. (2006). [Draft NNEGC “Energoatom” branch standard for cyclic load rates for NPP pipelines]. *Nuclear and Radiation Safety*, no. 2, pp. 51–54. (in Ukr.)

Надійшла 15.07.2021

Received 15.07.2021