

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY

УДК 621.039

DOI 10.20535/1813-5420.4.2024.315549

С.О. Горбачик¹, аспірант, ORCID 0009-0008-4293-2064

В.А. Кондратюк¹, канд. тех. наук, доцент, ORCID 0000-0001-5035-311X

С.В. Клевцов¹, канд. тех. наук, доцент, ORCID 0000-0003-1405-5048.

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАСТОСУВАННЯ АНАЛІЗУ КРИТЕРІВ УСПІХУ ІМОВІРНІСНОГО АНАЛІЗУ БЕЗПЕКИ АЕС ПРИ ІМОВІРНІСНІЙ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ

Одним із інструментів, що тривалий час використовується для кількісної оцінки стану безпеки атомних електростанцій (АЕС) у всьому світі – є імовірнісний аналіз безпеки (ІАБ).

Однак, не дивлячись на всі позитивні сторони ІАБ АЕС, він, наприклад, не враховує таку складову, як фізичний захист, що несе за собою відповідний негативний ефект, який пов'язаний з вразливістю ядерних установок щодо диверсій.

Безпосередньо залучити ІАБ АЕС для оцінки ефективності фізичного захисту ядерних установок не є можливим, так як існуюча методологія та процедура застосування даного інструменту не підходить для фізичного захисту, що вимагає розроблення нової методології імовірнісного аналізу фізичного захисту. При цьому, необхідно зазначити, що в одних випадках можливо застосовувати методи традиційного ІАБ АЕС для виконання деяких елементів імовірнісного аналізу фізичного захисту без змін (наприклад, аналіз надійності обладнання), в інших випадках необхідно розробити нові методи для частини елементів імовірнісного аналізу фізичного захисту по аналогії з традиційним ІАБ АЕС (тобто адаптувати, наприклад, аналіз критеріїв успіху), і, нарешті, в інших випадках необхідно розробити власні нові методи (наприклад, аналіз дій правопорушника) для елементів імовірнісного аналізу фізичного захисту, які відсутні в традиційному ІАБ АЕС.

В загальному, процес застосування ІАБ АЕС для оцінки ефективності систем фізичного захисту ядерних установок, вимагає не лише розроблення нової методології, а й потребує доволі великої витрати часу з залученням значних людських та матеріальних ресурсів. Тому, для першого ітераційного кроку застосування традиційного ІАБ АЕС для оцінки ефективності фізичного захисту ядерних установок, як приклад, розглядається можливість адаптації методології аналізу критеріїв успіху традиційного ІАБ АЕС для імовірнісного аналізу фізичного захисту ядерних установок.

Ключові слова: *система фізичного захисту, імовірнісний аналіз безпеки, аналіз критеріїв успіху, критерії прийнятності, внутрішній правопорушник, неправомірне вилучення ядерних матеріалів, функції безпеки, фізичний захист ядерних установок.*

Вступ.

З огляду на нинішню ситуацію, що пов'язана з дією військового стану та без перебільшень, із загрозою національній безпеці, що викликана ракетними обстрілами об'єктів генерації теплової та електричної енергії, питання захисту об'єктів критичної інфраструктури є, як ніколи актуальними. Зокрема, особливу увагу необхідно приділити ядерним установкам та об'єктам, що призначені для поводження з радіоактивними відходами, адже при виникненні певних небезпечних подій, вони можуть нести не тільки невидиму загрозу, що пов'язана з радіоактивним забрудненням, а й можливість використання ядерних матеріалів для створення ядерного вибухового пристрою.

На сьогоднішній день, рівень фізичного захисту ядерних установок знаходиться на досить високому рівні, проте з розвитком технологій, з'являються можливості обійти систему фізичного захисту для здійснення неправомірних дій, які можуть понести за собою тяжкі радіологічні, економічні та соціальні наслідки.

Тому, для оцінки ефективності фізичного захисту ядерних установок пропонується застосувати такий інструмент, як ІАБ АЕС для фізичного захисту, розглянувши приклад адаптації методів аналізу критеріїв успіху, як складової загальної методології імовірнісного аналізу фізичного захисту.

1. Характеристика фізичного захисту ядерних установок

На сьогоднішній день, ІАБ АЕС є широко відомим інструментом для ефективної оцінки та підвищення безпеки атомних станцій.

Імовірнісний аналіз безпеки – це метод кількісної та якісної оцінки, що використовується для аналізу імовірності виникнення та шляхів розвитку аварій, а також для визначення частоти пошкодження активної зони реактора, граничного аварійного викиду та оцінки радіаційного впливу на населення [1].

Виходячи з визначення, імовірнісний аналіз безпеки АЕС спрямований на оцінку ризиків з огляду на системи, обладнання та дії персоналу, що враховуються безпосередньо при експлуатації ядерних установок, проте він не бере до уваги події, що пов'язані з їх фізичним захистом.

Фізичний захист атомних станцій – це сукупність технічних і організаційних заходів, спрямованих на виявлення і припинення спроб несанкціонованого проникнення на територію атомної станції, у її життєво важливі зони, а також несанкціонованого вилучення, переміщення, передачі, використання ядерних матеріалів й інших радіоактивних речовин, що є на атомних станціях [2].

Цілями фізичного захисту ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел радіоактивного випромінювання є [2]:

1. створення умов, спрямованих на мінімізацію можливості виникнення диверсії, крадіжки або будь-якого іншого неправомірного вилучення радіоактивних матеріалів та зміцнення режиму нерозповсюдження ядерної зброї;

2. сприяння здійсненню заходів з розшуку та повернення зниклих ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання та зведення до мінімуму радіологічних наслідків диверсії.

Для забезпечення захисту ядерних установок та ядерних матеріалів необхідно враховувати три типи ризиків [3]:

1. ризик несанкціонованого вилучення ядерних матеріалів з намірами виготовити ядерний вибуховий пристрій;

2. ризик несанкціонованого вилучення ядерних матеріалів, що може призвести до подальшого розповсюдження матеріалу;

3. ризик диверсії.

Для створення умов, за яких відбувається належне виконання цілей фізичного захисту ядерних установок створюється система фізичного захисту.

Система фізичного захисту ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання – це сукупність організаційно-правових та інженерно-технічних заходів, що здійснюються з метою створення умов, спрямованих на мінімізацію можливості виникнення диверсії, крадіжки або будь-якого іншого неправомірного вилучення радіоактивних матеріалів та зміцнення режиму нерозповсюдження ядерної зброї.

Фізичний захист ядерних установок є невід'ємною складовою державної системи фізичного захисту, що створюється для досягнення цілей фізичного захисту на державному рівні.

Загальна ціль державного режиму ядерної захищеності – це захист осіб, майна, суспільства (людей) і навколишнього середовища від злочинних дій, що пов'язані з ядерними матеріалами та іншими радіоактивними матеріалами [4].

Функціонування державної системи фізичного захисту ґрунтується на результатах оцінки загрози вчинення диверсії, крадіжки або будь-якого іншого неправомірного вилучення радіоактивних матеріалів [2].

Цілі державного режиму фізичного захисту, що є одним з найважливіших компонентів державного режиму ядерної захищеності полягають в наступному:

1. забезпечення захисту від несанкціонованого вилучення – захист від крадіжки або іншого незаконного отримання ядерних матеріалів;

2. визначити місцезнаходження та забезпечити повернення ядерних матеріалів, що зникли – забезпечення здійснення оперативних та комплексних заходів по виявленню і в належних випадках по поверненню зниклих або викрадених ядерних матеріалів;

3. забезпечити захист від диверсії – захист ядерного матеріалу на ядерних установках від диверсії;

4. пом'якшити чи звести до мінімуму наслідки диверсії – пом'якшення або зведення до мінімуму радіологічних наслідків диверсії.

2. Необхідність адаптації ІАБ АЕС для фізичного захисту

Державна система фізичного захисту ґрунтується на проведенні державної оцінки загрози. На основі різних джерел достовірної інформації, відповідним державним органам необхідно визначити загрози і відповідний потенціал шляхом оцінки загрози і, в належних випадках, визначити проектні загрози.

Визначення проектної загрози здійснюється на основі оцінки державою загрози несанкціонованого вилучення матеріалів і диверсії [3].

Проектна загроза – це ознаки та характеристики потенційних внутрішніх правопорушників та/або зовнішніх правопорушників, що можуть зробити спробу несанкціонованого вилучення матеріалу або диверсії, для протидії яким створюється та оцінюється система фізичного захисту.

В процесі проведення оцінки вразливості ядерної установки та ядерних матеріалів складається список цілей правопорушника, на основі яких розробляються сценарії дій правопорушників, що можуть призвести до неприйнятних радіаційних наслідків.

Сценарії дій правопорушників розглядаються окремо для зовнішніх правопорушників, внутрішніх правопорушників, зовнішніх правопорушників у змові з внутрішніми [5].

Не зважаючи за яким сценарієм будуть діяти правопорушники, система фізичного захисту має забезпечити їх своєчасне виявлення, затримку правопорушників та адекватне реагування виходячи з принципів глибокоошелюваного захисту, диференційованого підходу, збалансованого захисту і мінімальних наслідків при відмові одного елемента системи [6].

Відповідно, на шляху правопорушника, що має на меті здійснити несанкціоноване вилучення ядерних матеріалів чи диверсію, створюють фізичні бар'єри захисту.

Фізичний бар'єр – це інженерні споруди, що призначені для перешкоджання переміщенню правопорушника [2]. Кожен фізичний бар'єр виконує певні функції безпеки.

Функції безпеки – це конкретна мета, яка повинна бути досягнута для забезпечення безпеки [1].

Провівши даний аналіз, отримано висновок про доцільність адаптації ІАБ АЕС для фізичного захисту, адже традиційний ІАБ АЕС охоплює відмову систем, елементів, обладнання на атомних станціях та помилки персоналу, які можуть призвести до аварії чи аварійної ситуації. При цьому, у традиційному ІАБ АЕС не розглядаються такі аспекти безпеки, як диверсія, поява внутрішнього, зовнішнього чи зовнішнього правопорушника у змові з внутрішнім. Відповідно до традиційного ІАБ АЕС у імовірнісному аналізі фіззахисту зміняться методології та процедури виконання деяких елементів, наприклад, аналізу критеріїв успіху, що викликає необхідність формулювання відповідних критеріїв прийнятності.

3. Підхід до аналізу критеріїв успіху у фізичному захисті ядерних установок

Для кожної вихідної події визначаються мінімальні вимоги до систем, що необхідні для виконання цими системами функцій безпеки та, як наслідок, для запобігання виникнення небажаних подій (для традиційного ІАБ АЕС – це пошкодження активної зони реактора та/чи викид радіоактивності). Внаслідок чого, визначаються критерії успіху для систем (первинні критерії успіху) та критерії успіху для обладнання і систем забезпечення (вторинні критерії успіху).

Критерії успіху розробляються для кожної функції безпеки, їм відповідають визначені критерії прийнятності для контролю виконання функцій безпеки.

З огляду на фізичний захист ядерних установок, під терміном «функція безпеки» мається на увазі будь-яка технологічна функція системи фізичного захисту, яка запобігає реалізації сценарію правопорушника. До основних функцій системи фізичного захисту відносяться [6]:

1. виявлення – це встановлення факту несанкціонованого проникнення в зону обмеженого доступу та виявлення інших протиправних дій щодо ядерних установок та ядерних матеріалів;
2. затримка – це сповільнення дій правопорушника при виконанні ним своєї задачі;
3. реагування – це недопущення силами реагування виконання правопорушником своєї задачі.

Якщо адаптувати визначення «критеріїв успіху» традиційного ІАБ АЕС для оцінки фізичного захисту ядерних установок, то критерії успіху – це мінімальний набір вимог до роботи системи фізичного захисту ядерних установок, що визначає умову успішного виконання функцій безпеки СФЗ з врахуванням специфічних умов, що накладаються в кожному конкретному випадку здійснення проектної загрози.

Для фізичного захисту ядерних установок, необхідний час спрацювання системи, технічна характеристика її обладнання, конкретні дії по комунікації, оповіщенню, розгортанню, реагуванню – є складовими частинами критеріїв успіху.

Критерії прийнятності – це цільовий показник верхнього рівня по відношенню до якого визначаються первинні чи вторинні критерії успіху.

Для фізичного захисту ядерних установок, первинними критеріями успіху буде вважатися мінімальний набір вимог по відношенню до системи фізичного захисту, як в цілому, так і з точки зору виконання нею необхідних функцій безпеки. Вторинні критерії успіху визначають набір вимог по відношенню до відповідної системи забезпечення з точки зору підтримання нею необхідних мінімальних умов для надійної роботи систем фізичного захисту.

У системах фізичного захисту ядерних установок можна виділити низку критеріїв успіху (КУ), яким відповідають певні критерії прийнятності (КП), з огляду на цілі імовірнісного аналізу для фізичного захисту, наприклад:

1. КУ: переривання диверсії, що спрямована на важке пошкодження активної зони реактора – КП: не перевищення проектної межі 1200 °С по температурі оболонки максимально навантаженого тепловиділяючого елемента (ТВЕЛ);

2. КУ: переривання диверсії, що спрямована на створення надграничного аварійного викиду у навколишнє середовище – КП: значення еквівалентних індивідуальних доз, розрахованих за найгірших погодних умов на території АЕС, на кордоні санітарно-захисної зони та за її межами, не повинні перевищувати:

1) 0,3 Зв/рік (30 бер/рік) на щитовидну залозу дітей за рахунок інгаляції;

2) 0,1 Зв/рік (10 бер/рік) на все тіло за рахунок зовнішнього опромінення;

3. КУ: переривання системою фізичного захисту вилучення ядерних матеріалів – КП: час на переривання силами реагування дій правопорушника по вилученню ядерних матеріалів, менший часу, який необхідний правопорушнику для досягнення мети;

4. КУ: переривання системою фізичного захисту вилучення радіоактивних матеріалів – КП: час на переривання силами реагування дій правопорушника по вилученню радіоактивних матеріалів, менший часу, який необхідний правопорушнику для досягнення мети.

Якщо говорити про вторинні критерії успіху, то критерії прийнятності – це максимальні/мінімальні допустимі значення робочих параметрів, наприклад: напруга, що подається на обладнання, температура та волога навколишнього середовища, освітленість, якість та швидкість передачі інформації і т.д.

4. Висновки

У статті наведено аргументи, які вказують, що безпосереднє використання імовірнісного аналізу безпеки АЕС для оцінки ефективності фізичного захисту ядерних установок не є можливим, так як традиційний ІАБ АЕС не враховує великої кількості аспектів, що пов'язані з фізичним захистом (поява зовнішніх, внутрішніх правопорушників, які можуть діяти окремо чи у змові; особливості системи фізичного захисту, без врахування яких, отримати реальні результати оцінки стану фізичного захисту неможливо). Відповідно з появою таких особливостей, необхідно розробляти нові методи та процедури використання імовірнісного аналізу для оцінки рівня фізичного захисту ядерних об'єктів. Зокрема, додаткових досліджень вимагає підхід до аналізу критеріїв успіху, так як на основі наявності об'єктових проектних загроз, визначаються цілі правопорушника (вразливі об'єкти критичної інфраструктури) по відношенню до яких може бути здійснена протиправна діяльність. Маючи сформовані цілі правопорушника, формуються його наміри (диверсія, неправомірне вилучення ядерних чи радіоактивних матеріалів).

Відповідно, за наявності якісної характеристики об'єктів по відношенню до яких можуть бути здійснені протиправні дії, формуються критерії успіху, яким відповідають визначені критерії прийнятності. Маючи на початковому етапі подібний набір інформації та характеристику системи фізичного захисту, в першому ітераційному кроці, можливо виконати аналіз критеріїв успіху.

Подібний підхід до розроблення методології імовірнісного аналізу системи фізичного захисту в перспективі дозволить робити оцінку рівня ядерної захищеності, знаходити «слабкі місця» у фізичному захисті ядерних установок з подальшою модернізацією фізичного захисту з мінімальним використанням часових, людських та матеріальних ресурсів для досягнення необхідного рівня ядерної захищеності.

Необхідний подальший розвиток запропонованого підходу для створення відповідної методології та процедури виконання аналізу критеріїв успіху для імовірнісного аналізу фізичного захисту.

Список використаної літератури

1. ДЕРЖАВНИЙ КОМІТЕТ ЯДЕРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ УКРАЇНИ «Про затвердження Загальних положень безпеки атомних станцій», наказ від 19.11.2007 № 162.

2. ЗАКОН УКРАЇНИ «Про фізичний захист ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання» від 19.10.2000 р. № 2064-III. Відомості Верховної Ради України, 2001, № 1, ст.1.

3. Рекомендации по физической ядерной безопасности, касающиеся физической защиты ядерных материалов и ядерных установок (INFCIRC/225/REVISION 5). Вена: МАГАТЭ, 2012. 69 с. (Серия изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности, № 13).

4. Практическое руководство «Физическая защита ядерного материала и ядерных установок» (практическое применение рекомендаций INFCIRC/225/Revision 5). Вена: МАГАТЭ, 2022. с.140 (Серия изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности, № 27-G).

5. ДЕРЖАВНИЙ КОМІТЕТ ЯДЕРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ УКРАЇНИ «Про затвердження Порядку проведення оцінки вразливості ядерних установок та ядерних матеріалів», наказ від 30.11.2010 № 169.

6. ДЕРЖАВНИЙ КОМІТЕТ ЯДЕРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ УКРАЇНИ «Про затвердження Правил фізичного захисту ядерних установок та ядерних матеріалів», наказ від 04.08.2006 № 116.

S. Gorbachyk¹, Ph.D. student, ORCID 0009-0008-4293-2064

V. Kondratyuk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-5035-311X

S. Klevtsov¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-1405-5048

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

APPLICATION OF THE ANALYSIS OF THE SUCCESS CRITERIA OF THE PROBABILISTIC ANALYSIS OF NPP SAFETY IN THE PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF PHYSICAL PROTECTION

Probabilistic safety analysis (PSA) is one of the tools that has been used for a long time to quantitatively assess the safety status of nuclear power plants (NPPs) around the world.

However, despite all the positive aspects of the PSA of nuclear power plants, it, for example, does not take into account such a component as physical protection, which carries with it a corresponding negative effect, which is associated with the vulnerability of nuclear facilities to sabotage.

It is not possible to directly involve the PSA of NPPs to evaluate the effectiveness of physical protection of nuclear facilities, since the existing methodology and procedure for applying this tool is not suitable for physical protection, which requires the development of a new methodology for the probabilistic analysis of physical protection. At the same time, it should be noted that in some cases it is possible to apply the methods of the traditional NPP PSA to perform some elements of the probabilistic analysis of physical protection without changes (for example, the analysis of equipment reliability), in other cases it is necessary to develop new methods for some of the elements of the probabilistic analysis of physical protection by analogy with the traditional NPP PSA (that is, to adapt, for example, the analysis of success criteria), and finally, in other cases, it is necessary to develop own new methods (for example, the analysis of the offender's actions) for the elements of the probabilistic analysis of physical protection, which are absent in the traditional NPP PSA.

In general, the process of applying PSA of nuclear power plants to evaluate the effectiveness of physical protection systems of nuclear facilities requires not only the development of a new methodology, but also requires a rather large expenditure of time with the involvement of significant human and material resources. Therefore, for the first iterative step of using the traditional PSA of nuclear power plants to evaluate the effectiveness of physical protection of nuclear facilities, as an example, the possibility of adapting the methodology of the analysis of the success criteria of the traditional PSA of nuclear power plants for the probabilistic analysis of physical protection of nuclear facilities is considered.

Keywords: *physical protection system, probabilistic security analysis, analysis of success criteria, acceptance criteria, internal offender, illegal removal of nuclear materials, security functions, physical protection of nuclear facilities.*

References

1. STATE NUCLEAR REGULATORY COMMITTEE OF UKRAINE "On the approval of the General Regulations for the safety of nuclear power plants", order No. 162 of 11/19/2007.
2. LAW OF UKRAINE "On physical protection of nuclear facilities, nuclear materials, radioactive waste, other sources of ionizing radiation" dated 10/19/2000 No 2064-III // *Bulletin of the VR of Ukraine*. 2001, N 1, Article 1.
3. Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (INFCIRC/225/Revision 5) Vienna: IAEA, 2012, 69 p. (IAEA Nuclear Security Series N 13).
4. Practical guidance "Physical protection of nuclear material and nuclear installations" (practical application of recommendations INFCIRC/225/Revision 5). Vienna: IAEA, 2022. p.140 (Series published by the IAEA on physical nuclear safety, No. 27-G).
5. STATE NUCLEAR REGULATORY COMMITTEE OF UKRAINE "On Approval of the Procedure for Conducting the Vulnerability Assessment of Nuclear Installations and Nuclear Materials", Order No. 169 dated November 30, 2010.
6. STATE NUCLEAR REGULATORY COMMITTEE OF UKRAINE "On approval of the Rules for physical protection of nuclear installations and nuclear materials", order No. 116 dated 04.08.2006.

Надійшла: 27.08.2024

Received: 27.08.2024

ОЦІНКА СТАНУ БІОЛОГІЧНОГО ЗАХИСТУ ЗОНИ ПАТРУБКІВ РЕАКТОРНОЇ УСТАНОВКИ ЕНЕРГОБЛОКУ 5 ЗАЕС, З МЕТОЮ ПРОДОВЖЕННЯ ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Продовження терміну експлуатації атомних електричних станцій України у понадпроектний період як і у більшості країн, які експлуатують ядерні енергоблоки, є прийнятною стратегією і здійснюється практично. У зв'язку з цим виникає потреба у проведенні перевірконого розрахунку основних елементів енергообладнання, що визначають ресурсні характеристики. Робота присвячена визначенню причин і механізмів старіння елементів біологічного захисту зони патрубків та розробці заходів з управління старінням біологічного захисту зони патрубків. Зроблена спроба розробки розрахункового обґрунтування залишкового ресурсу біологічного захисту зони патрубків, на підставі якого можна зробити висновок про можливість продовження терміну експлуатації біологічного захисту. Робота виконана шляхом адаптації результатів звітної документації, що стосується визначення ефективності та перепризначення терміну експлуатації біологічного захисту енергоблоків № 1-4 ЗАЕС. Виконана оцінка технічного стану елементів біологічного захисту на підставі даних показників потужності ефективної дози (ПЕД) гамма-випромінювання за даними вимірювань на штатних стаціонарних датчиках потужності дози в приміщенні ГА701 за десятирічний період експлуатації. При визначенні групи параметрів технічного стану, що визначають захист від нейтронного випромінювання в зоні патрубків, використано метод «довжин релаксації». Виконано рекурсивний аналіз зміни радіаційної обстановки на енергоблоці та прогнозувати зміну параметрів БЗ на короткостроковий та довгостроковий періоди. Результати виконаної оцінки технічного стану дозволяють рекомендувати продовження терміну експлуатації енергоблоку №5 Запорізької АЕС (у частині відповідності біологічного захисту зони патрубків реактора) на надпроектний період до 50 років.

Ключові слова: АЕС, біологічний захист, бетон, продовження терміну експлуатації, безпека АЕС.

Вступ.

Радіаційна обстановка в обслуговуваних приміщеннях атомної електричної станції, розташованих поблизу реактора, в основному визначається проникаючим гамма-випромінюванням і випромінюванням нейтронів з активної зони реактора. Щоб знизити інтенсивність випромінювання до рівня, що допускається нормами радіаційної безпеки, створюється біологічний захист, матеріали для якого підбирають спеціально, виходячи з технологічних вимог. Зазвичай використовують комбінацію декількох матеріалів, оскільки важко підібрати універсальний матеріал для всіх видів випромінювання.

Для уповільнення швидких нейтронів зазвичай використовуються речовини з малим атомним номером (графіт, звичайна і важка вода, пластмаси, парафін, поліетилен та ін.). Для поглинання теплових нейтронів зазвичай використовують спеціальні речовини – карбід бору, кадмій, борована сталь, бораль, бетон і ін. Гамма-випромінювання ефективно послаблюється речовинами, що мають великий атомний номер і високу густину (сталь, свинець, свинцеве скло та ін.).

Дослідження біологічного захисту (далі – БЗ) і визначення радіаційної обстановки проводяться на кожному головному блоці АЕС і, як правило, на всіх блоках першої черги кожної АЕС. Крім того, спеціально проводяться детальні дослідження полів іонізуючого випромінювання в біологічному захисті і за ним, що дозволяють перевірити нові, вдосконалені методики розрахунку і використовувати в них константи, що характеризують взаємодію випромінювання з матеріалами біологічного захисту.

Вивчення особливостей формування радіаційної обстановки при експлуатації енергоблоку № 5 Запорізької АЕС (далі – ЗАЕС) для її оцінки дозволить перевірити ефективність біологічного захисту реакторної установки від гамма-нейтронних полів.

Мета роботи.

Мета роботи полягає у тому, щоб розрахунковим методом обґрунтувати залишковий ресурс і можливість продовження терміну експлуатації біологічного захисту зони патрубків реакторної установки

енергоблоку №5 ЗАЕС. Розробити рекомендації з управління старінням для забезпечення надійної та безпечної експлуатації біологічного захисту енергоблоку у понадпроектний термін.

Матеріал і результати досліджень.

Робота виконана шляхом адаптації результатів звітної документації, що стосується визначення ефективності та перепризначення терміну експлуатації біологічного захисту енергоблоків № 1-4 ЗАЕС. Це пов'язано з наступним:

- енергоблоки ВВЕР-1000 ЗАЕС №1-5 однотипні (виконані за одним проектом);
- елементи БЗ цих енергоблоків експлуатувалися без виникнення аварійних ситуацій та інцидентів;
- склад матеріалів блоків БЗ вищезгаданих енергоблоків ЗАЕС практично однаковий.

Дослідження включає п'ять послідовних кроків:

Крок 1 – оцінка технічного стану елементів біологічного захисту;

Крок 2 – аналіз технічної документації;

Крок 3 – рекурсивний аналіз радіаційної обстановки на енергоблоці №5 ЗАЕС;

Крок 4 – розрахунок залишкового ресурсу та оцінка можливості продовження експлуатації елементів біологічного захисту енергоблоку №5 ЗАЕС;

Крок 5 – розробка рекомендованих заходів щодо управління старінням у період продовженого терміну експлуатації біологічного захисту.

На першому кроці встановлено параметри технічного стану. Залежно від конструкції, стану матеріалів біологічного захисту та умов експлуатації параметри, що визначають виконання функцій біологічного захисту, поділяються на такі групи:

- група параметрів технічного стану, що визначає конструктивну цілісність БЗ зони патрубків.

Основним параметром є об'ємна вага бетону елементів БЗ (діапазон густин від 2,1 т/м³ до 3,3 т/м³);

- група параметрів технічного стану, яка визначає ефективність захисту від нейтронного випромінювання. Основним параметром є концентрація ядер бору у матеріалі БЗ;

- група параметрів технічного стану БЗ, що визначає ефективність захисту від гамма-випромінювання.

Аналіз технічного стану проводиться на підставі даних показників потужності ефективної дози (ПЕД) гамма-випромінювання за даними вимірювань на штатних стаціонарних датчиках потужності дози в приміщенні ГА701 за десятирічний період експлуатації. Розрахунок значень рівнів ПЕД від активованого за рахунок взаємодії з нейтронами під час роботи реактора на потужності обладнання ґрунтується на оцінці величини значення тренду ПЕД за вирахуванням константи, що входить у формулу, яка описує лінійну інтерполяцію залежності ПЕД від часу.

При визначенні групи параметрів технічного стану, що визначають захист від нейтронного випромінювання в зоні патрубків, використовується метод «довжин релаксації», який визначається залежністю виду:

$$\phi(n + 1) = \frac{\Phi_0}{4\pi d^2} \sum_{j=1}^n f_j \exp\left(-\sum_{i=1}^m \frac{\Delta d_{i,j}}{L_{i,j}}\right) \cdot p(E_{0,j})$$

де $\phi(n+1)$ – щільність потоку нейтронів після ослаблення в n шарах захисту;

Φ_0 – початкова щільність потоку нейтронів до взаємодії з ядрами захисту;

$\Delta d_{i,j}$ – товщина i -го шару захисту (см) для j -го енергетичного інтервалу;

$L_{i,j}$ – довжина релаксації в i -му шарі захисту для j -го енергетичного інтервалу;

m – кількість шарів захисту;

n – число енергетичних інтервалів;

$p(E_{0,j})$ – частка нейтронів джерела в j -му енергетичному інтервалі;

f – табличний коефіцієнт, що характеризує відхилення від експоненційної форми кривої ослаблення для різних матеріалів. Для нейтронів діапазону розподілу $f = 1$.

Довжина релаксації суміші матеріалів, що складається з легких і важких ядер, у разі потреби визначається за формулою:

$$\frac{1}{L} = \sum_k \frac{c_k}{L_k}$$

де c_k – об'ємні концентрації матеріалів, що входять в суміш.

Ослаблення щільності потоку нейтронів для обстежуваних виймальних блоків БЗ (далі – ВББЗ) визначається експериментальним шляхом для промислового джерела нейтронів ІБН-27 з наступними характеристиками:

- паспортний потік нейтронів – $4,97 \cdot 10^7$ см⁻²×імп./с;

- кількість розпадів – $12,5 \times 10^{11}$ Бк;

- потік теплових нейтронів – $1083 \text{ см}^{-2} \times \text{імп./с}$;
- потік швидких нейтронів – $2797 \text{ см}^{-2} \times \text{імп./с}$;
- потужність еквівалентної дози джерела – 2842 мкЗв/год ;
- відстань від джерела до поверхні ВББЗ зверненої до джерела – $0,5 \text{ м}$;
- потужність еквівалентної дози джерела з відривом $0,5 \text{ м}$ – 682 мкЗв/год ;
- використовуваний дозиметр – DMC 2000 GN.

Ослаблення щільності потоку нейтронів для обстежуваних ВББЗ визначається шляхом вимірювання щільності потоку нейтронів до ВББЗ (ϕ_0) і після ВББЗ ($\phi(n+1)$).

Коефіцієнт послаблення k визначається експериментальним шляхом за формулою:

$$k = \frac{\phi_0}{\phi(n+1)}$$

На підставі коефіцієнта ослаблення k , знайденого експериментальним шляхом визначається довжина релаксації для нейтронів заданого спектру з проведенням наступної кількісної оцінки борного поглиначя, що залишився з рівняння:

$$\frac{1}{L} = \frac{x}{L_B} + \frac{1-x}{L_C}$$

де L_B – довжина релаксації нейтронів у карбіді бору;

L_C – довжина релаксації нейтронів у суміші;

x – доля бору у суміші.

Кількість ядер бору, що вигоріли, для кожного ряду, що складається з блоків біологічного захисту, визначається за формулою:

$$N_{i,B} = \Phi_0 \cdot (1 - k_B) \cdot k_i$$

де Φ_0 – щільність потоку нейтронів на зовнішній стороні корпусу реактора.

Розрахунок значень рівнів ПЕД активаційного походження в зоні патрубків ґрунтується на оцінці величини виходу ядер основних продуктів активації за даними про щільність потоку нейтронів на корпусі реактора та величину ослаблення потоку нейтронів елементами біологічного захисту з урахуванням вигорання карбиду бору у блоці.

Також на цьому кроці було здійснено вибір та обґрунтування критерію успішності розрахункового обґрунтування продовження терміну експлуатації біологічного захисту зони патрубків.

Критерієм оцінки технічного стану БЗ є відповідність / невідповідність значень виміряних рівнів ПЕД у зоні патрубків, як інтегрального показника ефективності біологічного захисту зі значеннями граничних станів, встановлених вимогами технічної документації. Як критерій відповідності рівнів ПЕД активаційного походження в зоні патрубків вимогам технічної документації є не перевищення розрахункових значень рівнів ПЕД активаційного походження в зоні патрубків величини 10 мЗв/год . Метод визначення відповідності / невідповідності виміряних значень рівнів ПЕД значенням граничних станів, встановлених вимогами технічної документації, проілюстрований на рисунку 1.

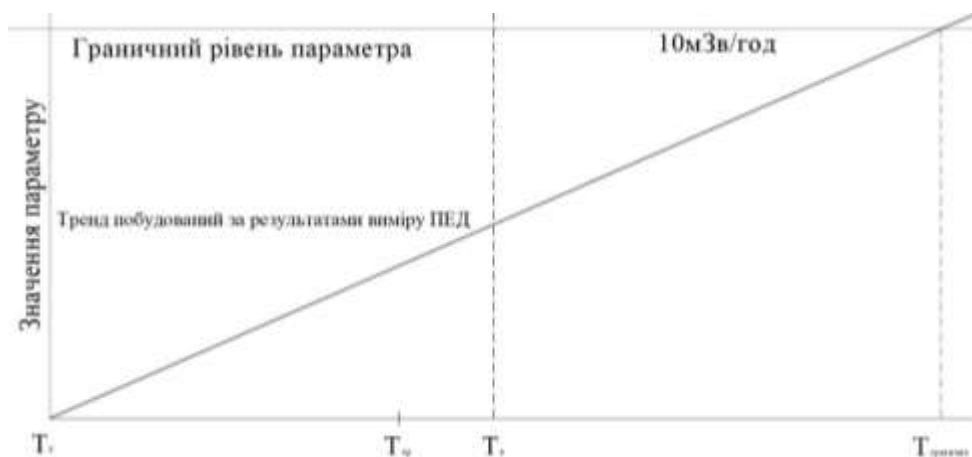


Рисунок 1 – Ілюстрація методу оцінки технічного стану БЗ на відповідність критерію

На другому кроці виконано аналіз проектної, виконавчої та експлуатаційної документації.

В результаті аналізу даних проектної, експлуатаційної документації та даних з експлуатації біологічного захисту реакторної установки енергоблока №5 встановлено, що в елементах біологічного захисту реакторної установки енергоблока №5 відсутні процеси старіння, які інтенсивно протікають.

За результатами аналізу технічної документації на елементи БЗ реактора енергоблока №5 ЗАЕС встановлено:

- конструктивна схема, особливості архітектурно-планувальних рішень, види використовуваних матеріалів конструкцій відповідають проєктним та нормативним вимогам;
- будівельно-монтажні роботи при будівництві виконані відповідно до проєктної та нормативної документації;
- усі зауваження та відхилення від вимог проєкту та нормативних документів були усунені під час будівництва;
- відмов внутрішніх конструкцій РВ №5 ЗАЕС та елементів біологічного захисту реактора №5 ЗАЕС не зафіксовано;
- регулярно проводиться контроль радіологічної обстановки на обладнанні та у приміщеннях блоку №5 ЗАЕС;
- у процесі експлуатації із встановленою періодичністю виконуються візуальні та інструментальні обстеження елементів біологічного захисту.

Таким чином, на підставі вивчення та аналізу технічної документації технічний стан елементів біологічного захисту зони патрубків реактора енергоблока №5 ЗАЕС можна класифікувати як працездатний / задовільний. Обсяг проаналізованої документації є достатнім для виконання наступних етапів робіт з оцінки технічного стану елементів біологічного захисту зони патрубків реактора енергоблока №5 ЗАЕС.

Для оцінки зміни стану БЗ за результатами ретроспективних вимірювань ПЕД на основному обладнанні ядерної установки (далі – ЯУ) та у приміщеннях гермооб'єму (далі – ГО) було виконано третій крок даної роботи – рекурсивний аналіз зміни радіаційної обстановки на енергоблоці № 5 ЗАЕС.

Рекурсивний (системний) аналіз зміни радіаційної обстановки на енергоблоці № 5 ЗАЕС виконано для оцінки ступеня деградації елементів біологічного захисту протягом періоду експлуатації, оцінки закономірності розвитку радіаційної обстановки на енергоблоці, та для прогнозу зміни параметрів БЗ на короткостроковий та довгостроковий періоди. Даний аналіз параметрів БЗ заснований на виявленні закономірності зміни ПЕД у зоні патрубків енергоблока, як інтегрального показника ефективності БЗ зони патрубків. Вихідними для проведення рекурсивного аналізу параметрів БЗ є відомості про динаміку зміни радіаційної обстановки на енергоблоці за попередні 10 років експлуатації.

На рисунках 3 та 4 (табл. 1, 2) наведено розраховані залежності ПЕД у часі в точках підведення «гарячого» та «холодного» колекторів у приміщеннях ГО на блоці № 5. Вимірювання, переважно, були виконані в однакових умовах, через три доби після зупинки енергоблоку (рис. 2).

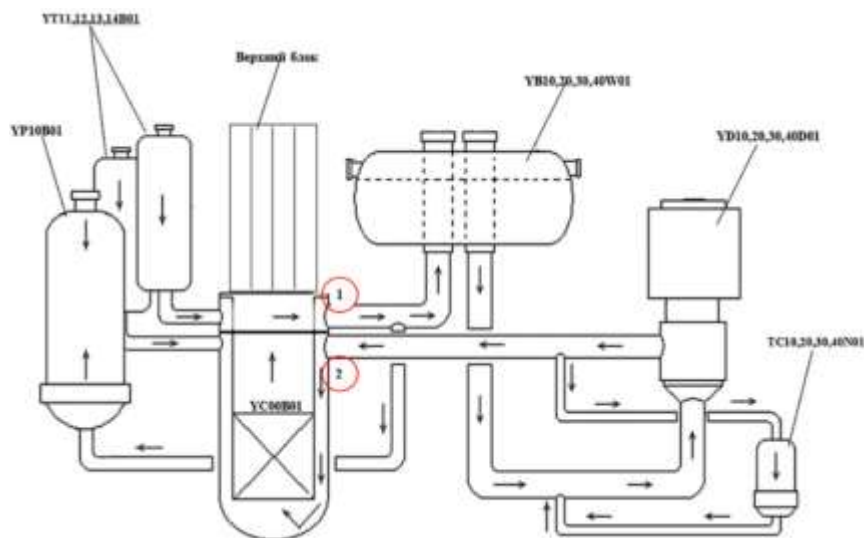


Рисунок 2 – Схема точок контрольних вимірювань ПЕД

Вимірювання ПЕД гамма-випромінювання виконувались на відстані 0,1 м від зовнішньої поверхні обладнання і трубопроводів на третю добу після виводу реакторної установки на нульову потужність.

Точки, в яких проводились вимірювання:

Точка 1 – в області приєднання патрубка «гарячої» нитки ГЦТ з реактором.

Точка 2 – в області приєднання патрубка «холодної» нитки ГЦТ з реактором.

Таблиця 1 – Динаміка зміни радіаційної обстановки енергоблоку №5 ЗАЕС для характерної точки 1

Період	Об'єкт контролю	Потужність дози (мкЗв/год)			
		Петля №1	Петля №2	Петля №3	Петля №4
ППР-2008	УС10В01	150	130	160	160
ППР-2009		350	300	355	355
ППР-2010		297	399	400	397
ППР-2011		145	146	147	147
ППР-2012		200	204	200	210
ППР-2013		234	230	231	210
ППР-2015		233	229	230	210
ППР-2016		430	480	470	505
ППР-2017		273	220	270	220
ППР-2018		295	400	402	400

Таблиця 2 – Динаміка зміни радіаційної обстановки енергоблоку №5 ЗАЕС для характерної точки 2

Період	Об'єкт контролю	Потужність дози (мкЗв/год)			
		Петля №1	Петля №2	Петля №3	Петля №4
ППР-2008	УС10В01	200	190	220	210
ППР-2009		270	258	310	286
ППР-2010		250	328	310	342
ППР-2011		140	129	120	139
ППР-2012		210	210	203	209
ППР-2013		250	220	240	230
ППР-2015		250	219	240	229
ППР-2016		300	309	305	337
ППР-2017		220	251	270	240
ППР-2018		249	358	320	377

На чисельні значення вимірюваних величин значною мірою впливали – ведення водно-хімічного режиму під час кампанії, герметичність ТВЗ під час зупину, час зняття картограми (початок та кінець ремонту), проведена чи ні дезактивація перед виміром, при вимірі зовнішньої радіаційної обстановки наявність (або відсутність) теплоізоляції.

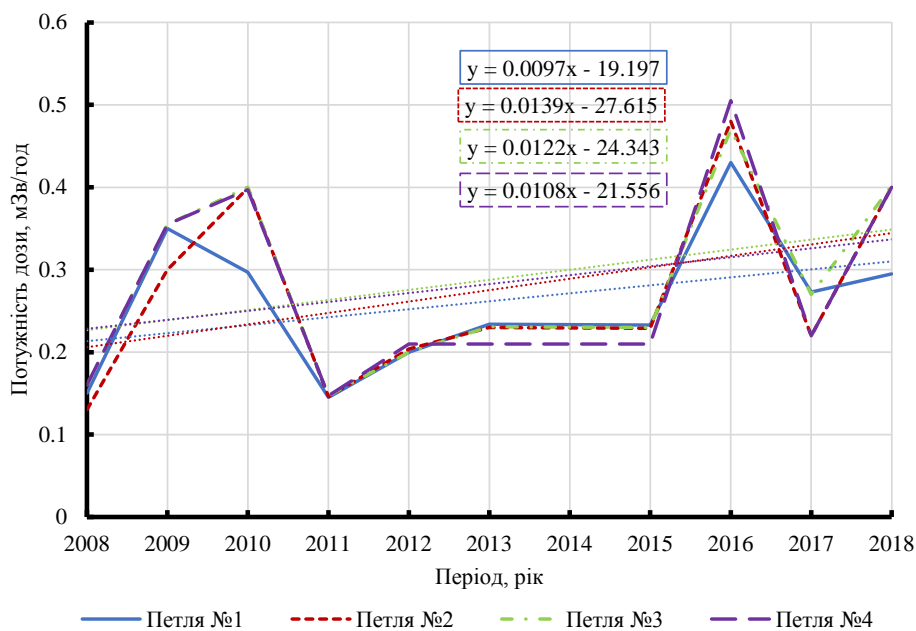


Рисунок 3 – Тренди зміни ПЕД в часі для характерної точки 1 (патрубки «гарячої» лінії)

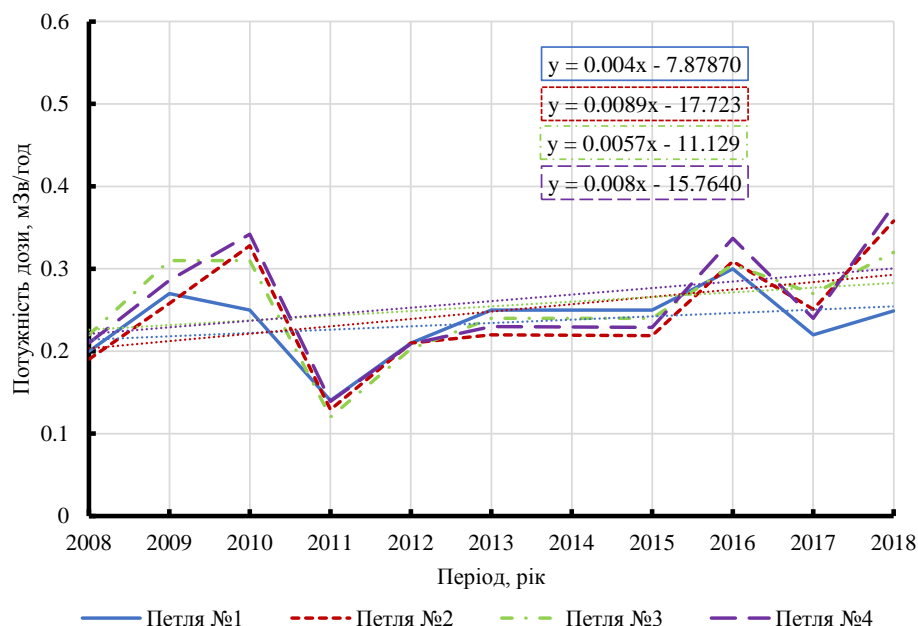


Рисунок 4 – Тренди зміни ПЕД в часі для характерної точки 2 (патрубки «холодної» лінії)

Аналіз графіків демонструє відсутність помітної тенденції зростання ПЕД у точках контролю у часі.

Зазначений факт підтверджує:

- відсутність помітної деградації БЗ на енергоблоці №5 за попередні десять років експлуатації;
- повільне зростання ПЕД за рахунок продуктів активації в обладнанні першого контуру;
- достатній рівень захисту від нейтронів.

Результати розрахунку залишкового ресурсу елементів БЗ зони патрубків реактора, які були отримані на четвертому кроці дослідження, представлені таблиці 3.

Швидкість вимірювання параметра змінна визначається графіками зміни ПЕД (рис. 3, 4).

За результатами розрахунку встановлено:

- для біологічного захисту швидкість зміни ПЕД за контрольними точками знаходиться в межах від 0,004 (мЗв/год)/рік до 0,014 (мЗв/год)/рік;
- елемент біологічного захисту із мінімальним ресурсом – точки петлі першого контуру.

З огляду на швидкість зміни ПЕД у контрольних точках залишковий ресурс біологічного захисту становить не менше 50 років.

Таблиця 3 – Результати розрахунку залишкового ресурсу елементів біологічного захисту зони патрубків

Елемент	Граничний параметр стану елемента	Оцінка зміни параметра елемента			Мінімальне значення ресурсу
		Фактичне середнє значення параметра	Швидкість зміни параметра (в рік)	Оцінка залишкового ресурсу	
Точка 1 зони патрубків					
Петля 1	ПЕД = 10 мЗв/год	0,26	0,010	Не менше 50 років	50 років
Петля 2		0,27	0,014	Не менше 50 років	50 років
Петля 3		0,29	0,012	Не менше 50 років	50 років
Петля 4		0,28	0,011	Не менше 50 років	50 років
Точка 2 зони патрубків					
Петля 1	ПЕД = 10 мЗв/год	0,23	0,004	Не менше 50 років	50 років
Петля 2		0,24	0,009	Не менше 50 років	50 років
Петля 3		0,25	0,006	Не менше 50 років	50 років
Петля 4		0,25	0,006	Не менше 50 років	50 років

На п'ятому кроці виконання робіт з оцінки технічного стану біологічного захисту реакторної установки енергоблока №5 ЗАЕС встановлено, що відмов цього обладнання через старіння не зафіксовано. Деградація параметрів, що визначають можливість експлуатації БЗ реакторної установки енергоблока №5 є незначною. Пропонується у надпроектний період експлуатації енергоблока №5 при

черговій переоцінці безпеки провести розрахункову оцінку залишкового ресурсу для встановлення закономірностей зміни визначальних параметрів. При цьому необхідно враховувати результати технічних оглядів елементів БЗ енергоблока №5, результати інструментальних досліджень міцнісних характеристик бетону та сталі шахти реактора і внутрішніх будівельних конструкцій ГО, результати вимірювань кратності поглинання нейтронного потоку виймальними блоками біологічного захисту енергоблоків №1-4 та розрахункового визначення лінійної довжини релаксації нейтронів для них.

Висновки. В результаті аналізу даних заводської, експлуатаційної документації та даних з експлуатації біологічного та теплового захисту реакторної установки енергоблока №5, а також на підставі результатів виконаного візуального огляду встановлено, що параметри технічного стану знаходяться в межах, встановлених технічною документацією, та не перевищують встановлених норм. Також встановлено, що для елементів біологічного захисту реакторної установки енергоблока №5 відсутні процеси старіння, що інтенсивно протікають. Розраховані залежності ПЕД у часі у точках підведення «гарячого» та «холодного» колекторів у приміщеннях ГО на блоці № 5 демонструє відсутність помітного тренду зростання ПЕД у точках контролю у часі. Численні дослідження показали, що флуктуації ПЕД у приміщеннях герметичного огороження реакторної установки енергоблока №5 мають випадковий характер і не є наслідком деградації матеріалів БЗ. На основі аналізу багаторічних спостережень за радіаційною обстановкою у приміщеннях ГО та облаштування РВ можна зробити висновок, що деградація матеріалів БЗ на енергоблоці № 5 Запорізької АЕС істотно не впливає на проектні характеристики БЗ.

Таким чином, результати виконаного аналізу підтверджують відсутність помітної деградації матеріалів БЗ обладнання реакторного відділення енергоблоку №5 та підтверджують відповідність біологічного захисту проектним характеристикам, у тому числі нормам радіаційної безпеки [1]. Технічний стан елементів біологічного захисту зони патрубків реактора енергоблока №5 ЗАЕС можна класифікувати як працездатний / задовільний. Результати виконаної оцінки технічного стану дозволяють рекомендувати продовження терміну експлуатації енергоблока №5 Запорізької АЕС (у частині відповідності біологічного захисту зони патрубків реактора) на надпроектний період до 50 років. Експлуатація елементів біологічного захисту зони патрубків реактора допускається у проектному режимі без обмежень.

Список використаної літератури

1. Норми радіаційної безпеки України; доповнення: Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення : затв. постановою Головного державного санітарного лікаря України від 12.07.2000 р. № 116. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0116488-00> (дата звернення: 24.03.2022).
2. Про затвердження Загальних положень безпеки атомних станцій : затв. наказом Державного комітету ядерного регулювання України від 19.11.2007 р. № 162. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-08> (дата звернення: 24.03.2022).
3. Про затвердження Вимог до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій : затв. наказом Державної інспекції ядерного регулювання України від 17.10.2016 р. № 175. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1449-16> (дата звернення: 24.03.2022).
4. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України від 08.02.1995 р. № 39/95-ВР. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95> (дата звернення: 24.03.2022).
5. Про затвердження Загальних вимог до продовження експлуатації енергоблоків АЕС у понадпроектний строк за результатами здійснення періодичної переоцінки безпеки : затв. наказом Державного комітету ядерного регулювання України від 26.11.2004 р. № 181. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1587-04> (дата звернення: 24.03.2022).

V. Konshin¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID0000-0003-2591-3589

A. Aniushkina¹, master student, ORCID 0000-0003-0169-4713

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

REACTOR NOZZLES AREA BIOLOGICAL SHIELDING ASSESSMENT OF THE ZNPP UNIT 5 FOR THE PURPOSE OF EXTENDING SERVICE LIFE

Extension of the service life of nuclear power plants in Ukraine beyond the design life, as in most countries operating nuclear power units, is an accepted strategy and is being implemented in practice. In this regard, verification calculations are needed to determine the service life of the main elements of power equipment. The paper is devoted to determining the causes and mechanisms of the ageing of the biological protection elements of the spigot zone and developing measures to manage the ageing of the biological protection of the spigot zone. An attempt was made to develop a calculation justification for the residual life of the biological protection of the spigot zone, based on which it is possible to conclude that the life of the biological protection can be extended. The work was carried out by adapting the results of the reporting documentation related to determining the effectiveness and reassignment of the service life of biological protection of ZNPP Units 1-4. The technical condition of the biological protection elements was assessed based on the data of gamma radiation effective dose rate (EDR) based on measurements on standard stationary dose rate sensors in the GA701 room for a ten-year period of operation. The method of ‘relaxation lengths’ was used to determine the group of technical condition parameters that determine protection against neutron radiation in the area of the spigots. Recursive analysis of changes in the radiation situation at ZNPP Unit 5 was performed to assess the degree of degradation of biological protection elements during the operating period, which allowed to assess the regularities of the radiation situation development at the unit and to predict changes in the parameters of the BP for short- and long-term periods. The results of the technical condition assessment allow us to recommend extending the lifetime of Zaporizhzhia NPP Unit 5 (in terms of compliance with the biological protection of the spigot area of the reactor) for an over-design period of up to 50 years.

Keywords: NPP, biological protection, concrete, extension of service life, NPP safety.

References

1. Radiation safety standards of Ukraine; addition: Radiation protection from potential radiation sources: approved. Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of Ukraine of July 12, 2000 № 116. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0116488-00> (access date: March 24, 2022).
2. On approval of the General safety provisions of nuclear power plants: approved. by the order of the State Committee for Nuclear Regulation of Ukraine dated 19.11.2007 № 162. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-08> (appeal date: 24.03.2022).
3. On approval of the Requirements for seismic design and assessment of seismic safety of nuclear power units: approved. by the order of the State Inspectorate for Nuclear Regulation of Ukraine dated 17.10.2016 № 175. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1449-16> (access date: 24.03.2022).
4. On the use of nuclear energy and radiation safety: Law of Ukraine of 08.02.1995 № 39/95-VR. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95> (access date: 24.03.2022).
5. On approval of the General Requirements for Continuation of Operation of NPP Power Units in the Over-Project Term based on the Results of Periodic Safety Reevaluation: Approved. by the order of the State Committee for Nuclear Regulation of Ukraine dated November 26, 2004 № 181. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1587-04> (appeal date: March 24, 2022).

Надійшла: 29.10.2024

Received: 29.10.2024

В.П. Калінчик¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-4028-0185

О.В. Бориченко¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6127-2945

О.В. Мейта¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-4132-5202

В.В. Калінчик¹, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-3931-646X

В.А. Побігайло¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2673-7329

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РАНЖУВАННЯ СПОЖИВАЧІВ - РЕГУЛЯТОРІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Показано, що управління електроспоживанням за рахунок регулювання потужності споживачів-регуляторів є важливим фактором зменшення пікових навантажень промислових підприємств. Показано, що в години пікових навантажень енергосистеми доцільно зменшувати потужність підприємств для вирівнювання загального графіка електричних навантажень. Процедуру зниження загального навантаження можна досягти шляхом регулювання електроспоживання споживачами – регуляторами або їх відключенням. Для ранжування споживачів – регуляторів необхідно виконати процедуру оптимізації. Для процедури оптимізації запропоновано застосування комбінаторних алгоритмів, в основі яких лежать евристичні схеми знаходження рішень. Досліджено спосіб знаходження оптимального списку таких споживачів за допомогою генетичного алгоритму – евристичного методу пошуку, що використовується для рішення задач оптимізації і моделювання шляхом випадкового підбору комбінування і варіації шуканих параметрів з використанням механізмів аналогічних природньому відбору. Для реалізації поставленої задачі створюється програмна модель еволюційного процесу – розвитку деякої популяції особин. Описано алгоритм, за яким можна отримати найбільш оптимальне рішення вибору споживачів на підприємстві. Генетичний алгоритм розглядається для вирішення задачі вибору складу споживачів на нижньому рівні електричної мережі підприємства. В процесі вибору аналізуються функції збитку і кількості перемикання, які при пошуку рішення прямують до мінімуму. Програмна модель еволюційного процесу включає наступні етапи: створення початкової популяції; схрещування; мутація. Розглянуто детальний опис генетичного алгоритму, його сутність, принципи застосування для регулювання навантаження, шляхом вибору оптимального варіанту споживачів для регулювання електричного навантаження. В якості критеріїв, за якими обирається найбільш оптимальний список споживачів-регуляторів обрано функції збитку та кількості перемикань.

Ключові слова: електроспоживання, потужність, навантаження, оптимізація, генетичний алгоритм.

Вступ.

Управління електроспоживанням за рахунок регулювання потужності споживачів-регуляторів (СР) [1–3] стає важливим фактором зменшення навантажень промислових підприємств, яке направлене на виконання обмежень, заданих енергопостачальними організаціями.

Важливо в години пікових навантажень енергосистеми сприяти зменшенню навантаження підприємств, які мають великий вплив на енергоспоживання в цілому, що позитивно вплине на енергосистему і дозволить вирівняти загальний графік електричних навантажень. Це можна досягти відключенням окремих споживачів, за допомогою яких можна регулювати обсяги споживання електричної енергії і, які називаються споживачами-регуляторами (СР). Для ранжування СР необхідно виконати процедуру оптимізації.

Як правило, задачі дискретної оптимізації, що виникають і вимагають вирішення, характеризуються великою кількістю змінних, і, як наслідок, великим простором пошуку, що не дає можливості перебрати всі множини розв'язків за «розумний» час. З другої сторони, на практиці часто і не потрібно знаходження глобального розв'язку, достатньо знайти «прийнятне» рішення по заданому критерію. Цими обставинами пояснюється підвищений інтерес до комбінаторних методів оптимізації. В основі багатьох комбінаторних алгоритмів лежать евристичні схеми знаходження рішень, які експлуатують особливості об'єкта дослідження [4].

Метою роботи є підвищення ефективності управління режимом споживання електричної енергії на підприємствах.

Викладення основного матеріалу.

Одним із алгоритмів оптимізації є генетичний алгоритм (ГА) – евристичний метод пошуку, що використовується для рішення задач оптимізації і моделювання шляхом випадкового підбору комбінування і варіації шуканих параметрів з використанням механізмів аналогічних природньому

відбору. ГА базується на теоретичному дослідженні синтетичної теорії еволюції, що враховує мікробіологічні механізми наслідування ознак в природних і штучних популяціях організмів, а також на накопиченому людством досвіді в селекції тварин і рослин [5].

Методологічна основа ГА ґрунтується на гіпотезі селекції, яка в самому загальному вигляді може бути сформульована так: чим вище пристосованість особини, тим вища ймовірність того, що в нащадках, отриманих з її участю, ознаки, що визначають пристосованість, будуть виражені ще сильніше.

Для реалізації поставленої задачі створюється програмна модель еволюційного процесу – розвитку деякої популяції особин. [4-7]. Кожна особина в даному випадку представляє собою деяке рішення задачі [5]. Особини популяції схрещуються, розмножуються, мутують, при цьому гірші з них гинуть. Загальний розвиток популяції організовується таким чином, щоб в кінцевому підсумку через деяку кількість поколінь отримати оптимальний розв’язок задачі. При цьому покоління, що відповідає оптимуму буде складатися з однакових особин, які відповідають оптимальному рішення задачі. На даному етапі розвиток популяції зупиняється – у однакових батьків з’являються діти, які нічим не кращі своїх предків – тому вони гинуть, так як алгоритм будується таким чином, що із нащадків виживають тільки ті, які знаходяться ближче до оптимального рішення, чим їх батьки.

Генетичний алгоритм розглядається для вирішення задачі вибору складу споживачів на нижньому рівні електричної мережі підприємства. В процесі вибору аналізуються функції збитку і кількості перемикачів, які при пошуку рішення прямують до мінімуму [8-10].

Створення початкової популяції.

Кожна особина популяції кодується однією хромосомою (G), яка визначає склад споживачів, які рекомендовані для регулювання електричного навантаження підприємства. Кількість генів, що утворюють хромосому визначається числом споживачів m_n , які відносяться до нижнього рівня ієрархії електричної мережі підприємства.

Хромосому G деякої особини Z (G^Z) можна схематично представити наступним чином:

G^Z :

1-й ген	2-й ген	...	m_n – й ген
1	0	...	1

Значення окремого гена хромосоми G_i^Z із множини $D = \{0,1\}$ визначається виразом

$$G_i^Z = \begin{cases} 1 & \text{— споживач нижнього рівня, включений у список для регулювання;} \\ 0 & \text{— в іншому випадку.} \end{cases}$$

де $i = 1, \dots, m_n$; $Z = 1, \dots, \lambda_j$ (λ_j - кількість особин j -ї популяції).

При створенні початкової популяції в хромосому кожної особини на місце гена споживача G_i^Z випадковим чином записується число із двійкової множини D [4].

Далі для кожної особини (списку споживачів для регулювання електричного навантаження) розраховується, побудована за адаптивним принципом узагальнена цільова функція

$$F^Z = F_1^Z \varphi_1 + F_2^Z \varphi_2, Z = 1, \dots, \lambda_j,$$

де φ_1, φ_2 - вагові коефіцієнти, що відбивають важливість функції F_1^Z, F_2^Z , які встановлюються особою, що приймає рішення по регулюванню режиму електричного споживання підприємства, виходячи з виразу $\varphi_1 + \varphi_2 = 1$; F_1^Z - функція оцінки збитку від зміни режиму роботи споживачів електричної енергії, що розраховується для особини Z ; F_2^Z - функція перемикачів електричної мережі підприємства для Z -ї особини популяції.

Задача вибору споживачів-регуляторів вирішується на нижньому рівні, отже, складові узагальненої цільової функції визначаються виходячи з наступних виразів:

$$F_1^Z = \sum_{i=1}^{m_n} y_i k_i G_i^Z,$$

$$F_2^Z = \sum_{i=1}^{m_n} k_i G_i^Z,$$

Функція k_i визначається булевим виразом:

$$k_i = \alpha_i \wedge \beta_i \wedge \gamma_i$$

де $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ - булеві змінні:

$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{— якщо } i \text{ – й споживач може бути використаний для регулювання;} \\ 0 & \text{— якщо } i \text{ – й споживач може бути використаний для регулювання.} \end{cases}$

$$\beta_{ij} = \begin{cases} 1 - \text{якщо } i - \text{й споживач увімкнений;} \\ 0 - \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} 1 - \text{якщо } i - \text{й споживач рекомендується для регулювання навантаження;} \\ 0 - \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

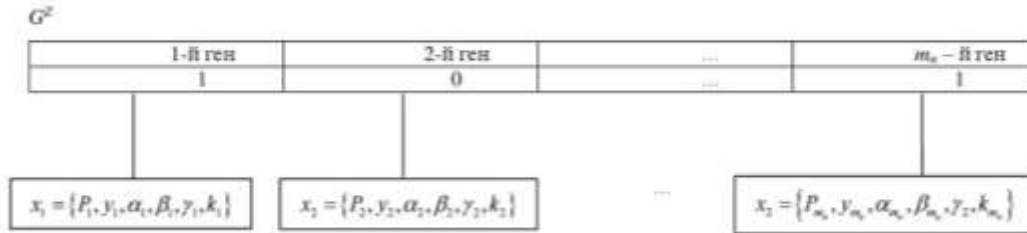
При розрахунку значень функції F_1^Z, F_2^Z використовується інформація про стан системи електропостачання X . Тому з кожним споживачем пов'язується набір параметрів

$$x_i = \{P_i, y_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i, k_i\}, i = 1, \dots, m_n,$$

де P_i - навантаження i -го прийнятого рішення нижнього рівня електромережі підприємства.

Параметри P_i і y_i для кожного прийнятого рішення є апріорно заданими постійними параметрами, а булеві змінні $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, k_i$ - динамічно змінювані параметри, що залежать від особливостей виробничих процесів в даний момент часу.

Співвідношення $\forall i \in [1, m_n](G_i^Z \rightarrow x_i)$ можна інтерпретувати у вигляді



Оскільки кожна особина являє собою список споживачів нижнього рівня, які рекомендовані для регулювання електричного навантаження, то, окрім функції F^Z , з кожною особиною популяції повинно бути пов'язане значення сумарної потужності споживачів, представлених у ній.

Сумарна потужність, що відповідає окремій особині популяції, вираховується за виразом

$$Q^Z = \sum_{i=1}^{m_n} P_i (\alpha_i \wedge \beta_i \wedge \gamma_i) G_i^Z = \sum_{i=1}^{m_n} P_i k_i G_i^Z.$$

Виходячи з цього, справедливі наступні співвідношення для особин популяції:

$$\forall i \in [1, \lambda_i](G^Z \rightarrow F^Z(F_1^Z, F_2^Z));$$

$$\forall i \in [1, \lambda_i](G^Z \rightarrow Q^Z).$$

Враховуючи специфіку поставленої задачі, список споживачів для регулювання навантаження повинен мати мінімальну потужність. Але рівномірне заповнення двійковими цифрами особин початкової популяції робить їх насиченими одиницями. Таке заповнення не дозволяє отримати прийнятні за точністю результати.

Тому для забезпечення ефективної роботи даного методу при різних вхідних параметрах в початкову популяцію особин вводяться пусті особини (складаються з нулів), процентний вміст яких від загальної кількості особин популяції визначається на основі експериментів.

Схрещування.

Після створення початкової популяції починається її розвиток і розмноження, тобто рух до оптимуму. Схрещування особин відбувається наступним чином: із поточного покоління випадково обираються два різні особини і далі кожний ген хромосоми нащадку з однаковою ймовірністю $p = 0,5$ може прийняти значення відповідного гена одного або іншого із батьків.

Процедуру схрещування можна представити у вигляді схеми, приведеної на рис. 1.

Із схеми видно, що перший і m_n - гени нащадку успадкував від одного із батьків, а i -й ген – від другого із батьків.

На наступному етапі обраховується сумарна потужність $Q_{\text{спож}}$ списку споживачів, представленого нащадком $G_{\text{спож}}$

$$Q_{\text{спож}} = \sum_{i=1}^{m_n} P_i k_i G_{i\text{спож}}$$

до того ж, якщо отримана сумарна потужність не дорівнює і не перевищує на даному кроці потужності, що скидається ΔP , то нащадок гине, в іншому випадку він виживає.

Умова $Q_{\text{спож}} \geq \Delta P$ - умова життєвої придатності нащадку. Якщо ця умова для отриманого нащадку виконується, то здійснюється порівняння його оціночної функції $F_{\text{спож}}$ з усередненою функцією

$\bar{F} = \frac{1}{\lambda_j} \sum_{i=1}^{\lambda_j} F^i$ по всьому поколінню особин. Проте таке порівняння, що є основоположною умовою просування до оптимуму, для задачі вибору оптимального складу споживачів, що розглядається може призвести до результатів далеких від оптимальних.

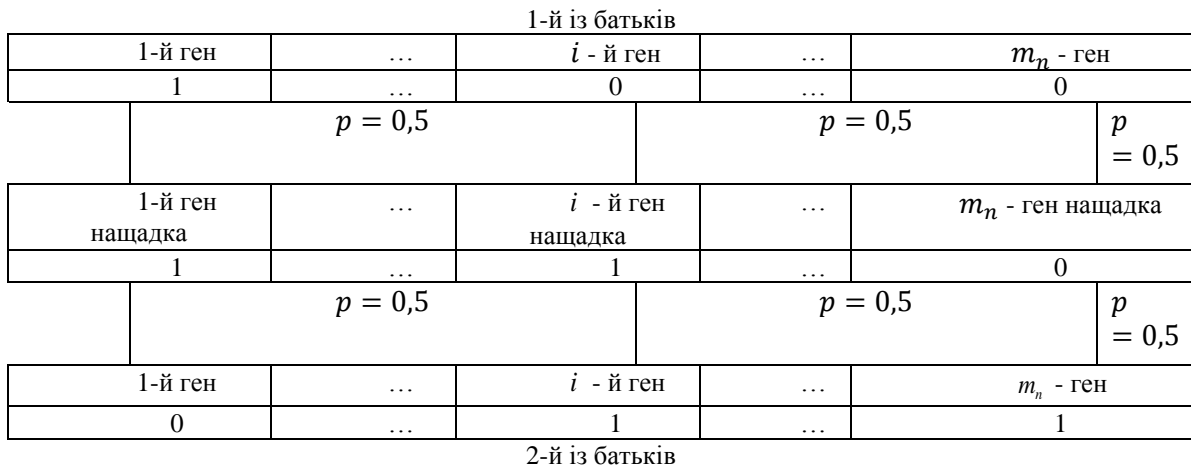


Рисунок 1 – Процедура схрещування особин популяції

З метою підвищення ефективності даного методу пропонується проводити порівняння функції $F_{спож}$, що визначається виразом

$$F_{спож} = \varphi_1 \sum_{i=1}^{\lambda_i} y_i k_i G_{іспож} + \varphi_2 \sum_{i=1}^{\lambda_i} k_i G_{іспож}$$

з функцією оцінювання найгіршої особини G^H поточного покоління, що визначається виходячи з виразу

$$F^H = \max_{i \in [1, \lambda_j]} \{F^i\}.$$

Оскільки, за умовою задачі $F^Z \rightarrow \min$, то у випадку $F_{спож} > F^H$ отриманий нащадок гине, в іншому разі виживає і записується до наступного покоління.

В цьому випадку в просторі параметрів відбувається рух у напрямленні до оптимуму.

Таким чином, узагальнена цільова функція F^Z - це оцінна функція кожної особини, середнє значення цієї функції \bar{F} за всією популяцією – це оцінна функція поточного покоління.

У випадку, якщо нащадок $G_{спож}$ виживає, то в поточному поколінні батьків знищується найгірша особина G^H .

Таким чином, при розмноженні поточне покоління батьків убуває, а наступне покоління нащадків зростає.

Мутація.

В процесі еволюції можлива ситуація, коли серед генів особин популяції може не виявитися того гена, який відповідає оптимальному рішення. Наприклад, ген, що відповідає i-му споживачу електричної енергії в силу випадкового заповнення хромосом для всіх особин популяції може виявитися рівним 0, а для досягнення оптимального рішення він повинен бути рівним 1, або навпаки.

З метою виключення цього застосовується процедура мутації – генетичної зміни, що призводить до якісно нової прояви основних властивостей генетичного матеріалу.



Рисунок 2 – Процедура мутації

Мутація полягає в наступному:

- із поточного покоління випадковим чином обирається деяка особина G^L , $L = \text{rand}\{1, \dots, \lambda_j\}$;
- параметри цієї особини ($F^L; Q^L; G_i^L, i = 1, \dots, N$) записуються в деякий буфер пам'яті;
- із хромосоми даної особини випадково обирається ген, значення якого змінюється шляхом інвертування його значення, тобто $G_i^L = \bar{G}_i^L, i = \text{rand}\{1, \dots, m_n\}$; в результаті утвориться особина $G^{L'}$ - мутант особини G^L ;
- розраховуються параметри мутанта $Q^{L'}, F^{L'}$, причому, якщо виконуються умови представлені системою

$$\begin{cases} Q^{L'} \geq \Delta P \\ F^{L'} < F^L \end{cases}$$

то вважається, що відбулася «добра мутація» і особина $G^{L'}$, набуваючи характеристик і параметрів утвореного мутанту, залишається в поточному поколінні особин, якісно покращуючи дане покоління.

Якщо умови з попередньої системи не виконуються, то мутація відміняється, «погана мутація», і з буфера пам'яті повертаються початкові значення вибраної мутації особини.

Послідовне виконання процедур схрещування і мутації дає покоління особин (нащадків, що надають нові поєднання споживачів-регуляторів), яке якісно перевершує попередні покоління предків (знаходиться ближче до оптимального рішення).

Таким чином, для задачі вибору списку споживачів-регуляторів електричного навантаження кожне нове покоління містить списки, обраних споживачів, які дозволяють знизити електричне навантаження на величину рівну або перевищує ΔP , і що мають прямуючих до мінімуму функції збитку і перемикання обладнання, тобто для кожного заново утвореного покоління справедливо

$$\forall i \in [1, \lambda_i](Q_j^Z \geq \Delta P), j = 2, \dots, kp,$$

$$\bar{F}_{j-1} \geq \bar{F}_j, j = 2, \dots, kp,$$

де j - індекс покоління; Z - індекс особини в поколінні; kp - кількість поколінь, що утворилися в процесі еволюції; \bar{F}_j - усереднена узагальнена цільова функція по j - му поколінню.

В запропонованому алгоритмі процес розвитку поточного покоління особин організований таким чином, що при спостереженні послідовності довжиною ω із невдалих схрещувань, що йдуть поспіль, розвиток поточного покоління зупиняється і здійснюється перехід до наступного покоління. Це дозволяє отримувати якісно кращі покоління нащадків, знизити їх розмірність, досягаючи при цьому прийнятні за точністю результати роботи алгоритму. При цьому зменшується час, який затрачається на рішення поставленої задачі, що є істотним при великій кількості прийнятих рішень.

Таким чином, для даного алгоритму справедливо

$$\lambda_{j-1} \geq \lambda_j, j = 2, \dots, kp,$$

де λ_j - список споживачів j - го покоління.

У випадку, коли утворюється популяція однакових особин, оптимальне рішення вважається знайденим. Тому умову завершення алгоритму можна записати у вигляді

$$G^{Z-1} = G^Z, Z = 2, \dots, \lambda_{kp}.$$

Рішення задачі представляється окремою особиною популяції, що відповідає списку споживачів, які рекомендовані для регулювання навантаження на нижньому рівні електромережі підприємства.

Після рішення задачі на нижньому рівні мережі здійснюється процедура об'єднання отриманих споживачів шляхом визначення вузлів вищих рівнів ієрархії що містять вибрані на нижньому рівні споживачі. При виявленні таких вузлів вони включаються в список обраних для регулювання навантаження замість споживачів, що їм належать.

Генетичний алгоритм вибору оптимального складу споживачів нижнього рівня електричної мережі підприємства для регулювання навантаження представлений на рисунку 3.

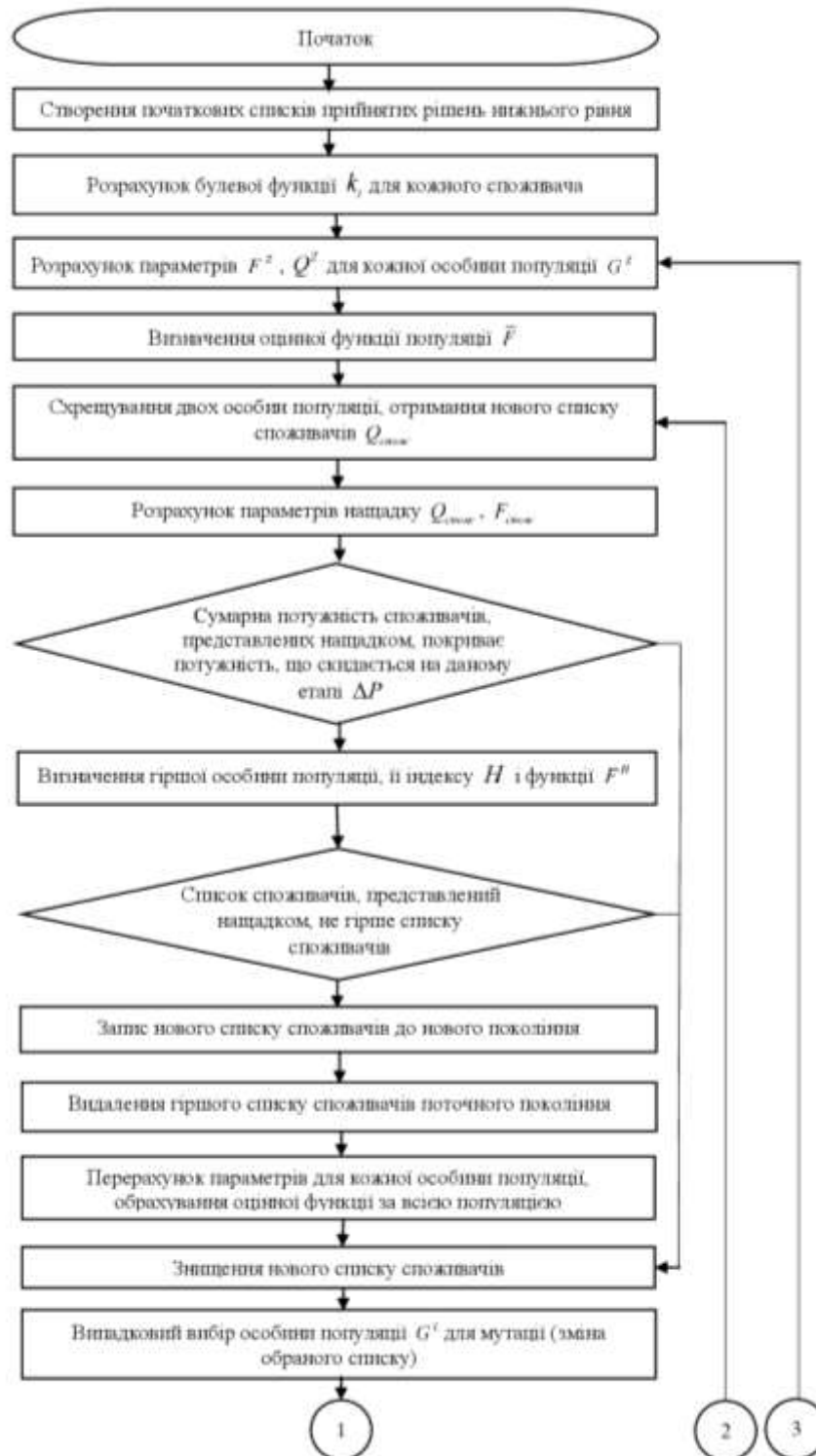
Розглянуто детальний опис генетичного алгоритму, його сутність, принцип застосування для регулювання навантаження, шляхом вибору оптимального варіанту споживачів для регулювання електричного навантаження. В якості критеріїв, за якими обирається найбільш оптимальний список споживачів-регуляторів обрано функції збитку та кількості перемикань. Складено детальний генетичний алгоритм для вибору найкращого списку споживачів, за допомогою яких відбуватиметься контроль навантаження.

Послідовне виконання процедур схрещування і мутації дає покоління особин (нащадків, що надають нові поєднання споживачів-регуляторів), яке якісно перевершує попередні покоління предків (знаходиться ближче до оптимального рішення).

Таким чином, для задачі вибору списку споживачів-регуляторів електричного навантаження кожне нове покоління містить списки, обраних споживачів, які дозволяють знизити електричне навантаження і, що мають прямуочих до мінімуму функції збитку і перемикання обладнання.

Генетичний алгоритм має високу точність по навантаженню, що скидається, тому його доцільно використовувати для управління електричним навантаженням потужних підприємств.

Виконані дослідження дозволяють підвищити якість управління електроспоживанням підприємств із безперервним характером виробництва, а також знизити втрати підприємства від неефективного регулювання електричних навантажень при вимушених обмеженнях потужностей енергопостачальною компанією.



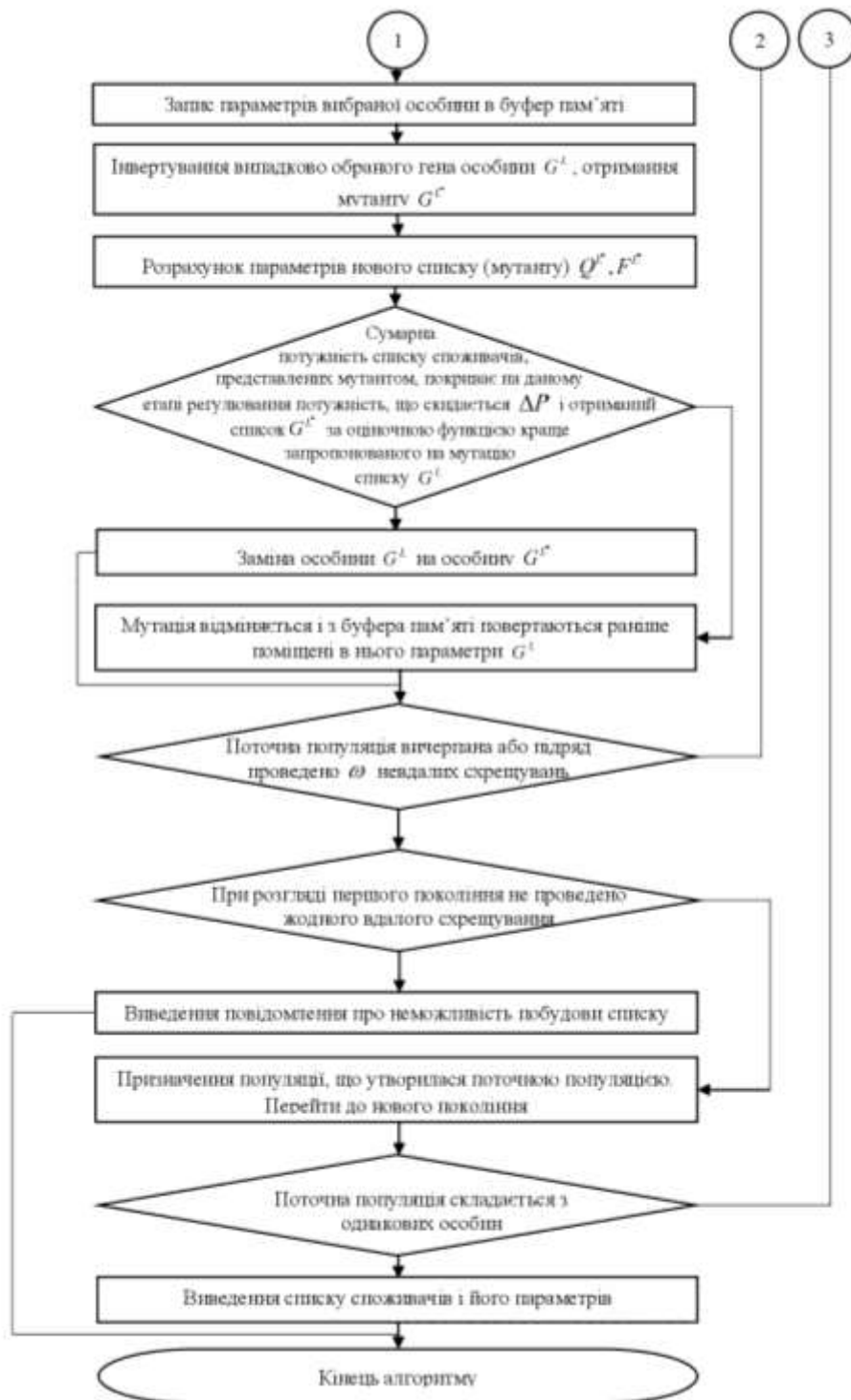


Рисунок 3 – Детальний генетичний алгоритм вибору споживачів-регуляторів

Висновок.

Зниження навантаження промисловими підприємствами за допомогою споживачів-регуляторів в години максимуму енергосистеми сприяє вирівнюванню графіка навантаження, що знизить необхідність додаткових маневрових потужностей, а також вартість електричної енергії. В якості критеріїв, за якими обирається найбільш оптимальний список споживачів-регуляторів обрано функції збитку та кількості перемикачів. Досліджено та побудовано генетичний алгоритм вибору споживачів-регуляторів, та метод експертного оцінювання для ранжування та вибору оптимального списку споживачів, за допомогою яких відбуватиметься регулювання навантаження.

V.P. Kalinchyk ¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4028-0185

O. Borychenko ¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-6127-2945

O. Meita ¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4132-5202

V.V. Kalinchyk ¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-3931-646X

V. Pobigaylo ¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-2673-7329

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

RANKING OF CONSUMERS-REGULATORSELECTRICAL LOAD

It is shown that managing electricity consumption by regulating the power of consumer-regulators is an important factor in reducing the loads of industrial enterprises. It is shown that during peak hours of the power system, it is advisable to reduce the capacity of enterprises to level the overall schedule of electrical loads. The procedure for reducing the total load can be achieved by regulating the power consumption of consumers - regulators or by disconnecting them. To rank consumers-regulators, it is necessary to perform an optimization procedure. For the optimization procedure, we propose the use of combinatorial algorithms based on heuristic schemes for finding solutions. The method of finding the optimal list of such consumers using a genetic algorithm, a heuristic search method used to solve optimization and modeling problems by randomly selecting a combination and variation of the noise parameters using mechanisms similar to natural selection, is investigated. To solve the problem, a software model of the evolutionary process - the development of a certain population of individuals - is created. An algorithm is described that can be used to obtain the most optimal solution for the choice of consumers at an enterprise. The genetic algorithm is considered to solve the problem of selecting the composition of consumers at the lower level of the enterprise's power grid. In the process of selection, the functions of loss and number of switching are analyzed, which tend to minimize when searching for a solution. The program model of the evolutionary process includes the following stages: creation of the initial population; crossing; mutation. A detailed description of the genetic algorithm, its essence, and the principle of its application for load regulation by selecting the optimal consumer option for regulating the electric load are considered. The criteria for selecting the most optimal list of consumer-regulators are the functions of loss and the number of switching operations.

Keywords: electricity consumption, power, electrical load, optimization, genetic algorithm.

References

1. Prakhovnyk, A.V. Ways and Stages of Establishing a Scientific Direction on the Issue of Comprehensive Management of Electricity Utilization. Scientific News of NTUU "KPI". – 1999. - № 1. – P. 58 – 70.
2. Optimal Management of Electrical Loads. Kalinchyk V.P., Kalinchyk I.V., Lukianchuk A.D., Tkachuk A.O. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". - Kyiv. 2009.- 12 p. – Ukr. – Deposited in DNTB of Ukraine on 12.10.09, No. 95-Ukr – 2009.
3. Kalinchyk V.P. Management of power consumption modes of industrial consumers // V.P. Kalinchyk, V.A. Pobigaylo, V.V. Kalinchyk, O.V. Meita, Y. M. Chunya / Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of improvement of electric machines and devices. Theory and practice. - № 1(7)- 2022.- P.38-41
4. Vakal L.P. Genetic algorithms as a tool for solving nonlinear boundary value problems // L.P. Vakal / Computer tools, networks and systems. - 2015. - № 14. - P.16-23
5. Sivanandam S. N. Introduction to Genetic Algorithms / S. N. Sivanandam, S.N.Deepa –Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. - 318 p.
6. Koss V. A cybernetic approach to the analysis of information transformation in human thinking procedures // V. Koss // Svitoglyad. - 2010. - № 4. - P. 14 - 17.
7. Clement R. Genetic Algorithms and Dus-Driver Scheduling. // Clement R., Wren A./ Presented at the 6th International Conference for Computer-Aided Transport Scheduling. Lisbon. Portugal. 1993.
8. Shkrebtiiy M.V. Application of genetic algorithms for the selection of consumers-regulators / Shkrebtiiy M.V., Kalinchyk V.P. / Collection of scientific papers. Materials of the VII International Scientific and Technical Conference. Energy. ecology. human. - Kyiv: Igor Sikorsky Ky-iv Polytechnic Institute, IEE, 2016. - P. 115-117.
9. Kalinchyk V. Choosing the priority scale of consumers-regulators of electricity consumption // V. Kalinchyk, G. Khitko / Collection of scientific papers. Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Internet Conference "Problems and Prospects for the Development of Science at the Beginning of the Third Millennium in Europe and Asia" - Pereyaslav-Khmelnytskyi - 2016.- P.245-246.
10. Kalinchyk V. Management of electric load with the help of consumers-regulators // V. Kalinchyk, M. Shkrebtiiy. Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Internet Conference "Problems and Prospects for the Development of Science at the Beginning of the Third Millennium in Europe and Asia" - Pereyaslav-Khmelnytskyi - 2016.- P.246-248.

Надійшла: 29.08.2024

Received: 29.08.2024

РОЗРАХУНОК НА СЕЙСМОСТІЙКІСТЬ СИСТЕМИ ПУСКОВОГО ПОВІТРЯ РДЕС

Земля під нашими ногами жива, хоч вона є кам'янистою планетою. Попри те, що геологічну активність неможливо відчутти, іноді вона проявляє себе різко та небезпечно. Землетруси та сейсмічні явища відповідають за передачу цих тектонічних ударів і змусили людей бути готовими до різних ситуацій із коливанням земної кори. Сейсмічні поштовхи викликають багато небезпечних явищ: зсуви і лавини в горах, хвилі паводків (цунамі) на берегах морів і океанів, тріщини і розрідження на поверхні суші.

Залежно від магнітуди землетрусів, відповідно, щороку відбувається від одного до двох десятків землетрусів, потужністю понад 7 балів за шкалою Ріхтера. Як можна запобігти руйнуванням обладнання будівель, катастрофам і смертям та що таке «сейсмостійкість» — питання нашого дослідження.

Для підтвердження того, що обладнання гарантовано буде виконувати свої функції в умовах сейсмічних впливів виконується кваліфікація обладнання. Оцінка початкового стану сейсмічної кваліфікації полягає у проведенні зіставлення сейсмічних кваліфікаційних характеристик з сейсмічними кваліфікаційними вимогами, а також встановлення наявності в заводській та проектній документації інформації щодо закріплення обладнання, і дозволяє встановити, чи були враховані пред'явлені в процесі сейсмічної кваліфікації його кваліфікаційні вимоги під час розробки та постановки на виробництво, виготовлення та монтажу.

Сейсмічні кваліфікаційні характеристики містяться в конструкторській документації розробників та виробників обладнання та можуть бути зазначені у різному вигляді: значень амплітуд прискорення; інтенсивності землетрусу та рівня встановлення обладнання над нульовою відміткою; параметрів випробувань, групи механічного виконання тощо.

Якщо кваліфікаційні характеристики обладнання відповідають визначеним або розрахованим кваліфікаційним вимогам, то кваліфікація такого обладнання на сейсмостійкість є встановленою.

Ключові слова: сейсмостійкість, стійкість, землетрус, коливання, земна кора.

Вступ

Землетруси — одні із найжахливіших явищ природи через несподівані події, від яких немає засобів для захисту. Єдиний спосіб зберегти життя та майно – підготуватися до неминучого: застосувати знання та досвід щодо сейсмостійкості. Зроблено спробу коротко дізнатися про сейсмостійкість та проаналізувати наявні методи антисейсмічного проектування. Сейсмостійкість є важливим аспектом проектування та будівництва будівель та інфраструктури в зоні сейсмічної активності. Підвищення сейсмостійкості може істотно зменшити ризик пошкодження будівель і споруд, а також втрати життя під час землетрусу.

Рух гірських порід породжує коливання, які поширюються у вигляді хвиль, які досягають поверхні землі як руйнівні поверхневі хвилі. Які види землетрусів ми знаємо і що таке сейсмічні райони. Магнітуда землетрусу виражається в градусах магнітуди. Сейсмічні поштовхи вимірюються за допомогою сейсмографів. Наукою, що вивчає землетруси, є сейсмологія. Епіцентр землетрусу - цей термін використовується для опису місць на земній поверхні, які розташовані безпосередньо над місцем землетрусу; означає місце, де сейсмічні хвилі, що поширюються від фокуса в кожному напрямку, досягають поверхні найшвидше; зазвичай в епіцентрі ці хвилі характеризуються найбільшою руйнівною силою, спричиняючи найбільшу вібрацію ґрунту (епіцентрально зона), але це не правило, оскільки інтенсивність поштовхів також значною мірою залежить від типу ґрунту та геологічних умов; місце землетрусу - точка, в якій почалося виділення енергії, накопиченої на лінії розлому, це теоретична точка, оскільки насправді енергія землетрусу розряджається на деяку поверхню розлому; сейсмічна хвиля - одиночна хвиля вібрації, в якій накопичена енергія вивільняється під час переміщення гірських масивів уздовж лінії розлому; швидкість її поширення залежить від типу хвилі та ґрунту; *homoseist* — лінія, що з'єднує зони, що вібрують одночасно.

Однак найбільш руйнівний вплив мають самі сейсмічні поштовхи, які можуть бути посилені шляхом поширення в конкретних ґрунтових умовах. Найсильніший головний поштовх зазвичай супроводжується серією наступних поштовхів меншої або подібної інтенсивності до початкового поштовху. Ці поштовхи передаються від землі до будівельних конструкцій через фундаменти, створюючи

динамічні навантаження у вигляді сил інерції. Часто в зоні землетрусів одні будівлі не руйнуються, а інші з іншими динамічними характеристиками повністю руйнуються, незважаючи на те, що побудовані за схожою технологією. Будівлі пошкоджуються або повністю руйнуються, коли діючі на них сили інерції викликають в елементах конструкцій напруги, що перевищують їх міцність.

Проектування та будівництво сейсмостійких будівель вимагають міждисциплінарного підходу, співпраці та використання різних методів і технологій. У конструктивних системах сейсмостійких будівель зазвичай використовують залізобетонні або сталеві каркаси. Архітектори та інженери в усьому світі постійно впроваджують інноваційні методи проектування та будівництва, щоб підвищити безпеку та стійкість будівель. Використання сейсмічних кодів і стандартів має важливе значення для забезпечення того, що будівлі спроектовані таким чином, щоб витримувати землетруси, а моніторинг і технічне обслуговування сейсмостійких будівель має вирішальне значення для забезпечення їх постійної безпеки та ефективності.

Пластичність, або здатність матеріалу деформуватися без руйнування, є важливою характеристикою для матеріалів, що використовуються в сейсмостійкій конструкції будівель, і проектування маси конструкції, жорсткості, системи фундаменту та поведінки матеріалів є важливими факторами, які слід враховувати у разі будівництва. Різні стратегії, такі як бічні системи опору силі, ізоляція основи та пристрої розсіювання енергії, можуть бути використані в сейсмостійкій конструкції будівлі. Наприклад, зсувні стіни та каркаси є прикладами методів, які передають бічні сили на фундамент. При проектуванні сейсмостійких будівель інженери працюють над зміцненням конструкції та протидією потенційним силам землетрусів. Важливо також відзначити, що перед впровадженням сейсмостійких проектів у регіоні слід враховувати місцеві методи будівництва та наявність ресурсів.

У роботі запропоновано проаналізувати наявні методи дослідження сейсмостійкості та їх вплив на подальший розвиток різних сфер та напрямів людського життя.

Аналіз літературних джерел

Одним із перших науковців, який пояснював сейсмостійкість був Аристотель. Він припустив, що у землетрусах винні вітри, які шукають спосіб вийти із печер у земних надрах. У 132 році китайський науковець Чжан Хен теж досліджував землетрус і вважав, що він може виникнути на відстані 400-500 км.

Джон Мічелл припускав, що землетруси — пружні хвилі, які викликані процесом проходження через кору землі. У 1760 році він видав свою книгу, «Припущення про причини виникнення землетрусів і спостереження за цим феноменом». У ній він дав визначення самому поняттю землетрусів та оцінив швидкість сейсмічних хвиль в 1930 км/год. На його думку розташування центру поштовху (епіцентру) можна визначити, зіставляючи показники про час прибуття коливачів. Саме його дослідження стали основою для наступних досліджень науковців кількох століть.

У XIX столітті відбувся новий стрибок у вивченні сейсмології. Завдяки Роберту Маллету було опубліковано каталог сейсмічності. До його складу увійшли 6831 землетрусів, дані про які зібрав науковець протягом 20 років.

Мета роботи.

Мета роботи — аналіз розрахунку на сейсмостійкість системи пускового повітря ДРЕС.

Метод кваліфікації.

Сейсмостійкість залежить від багатьох факторів, включаючи геологічні умови місцевості, потужність і тривалість землетрусу, конструктивні характеристики будівлі і якість будівельних матеріалів. Існує безліч методів і технологій, які використовуються для підвищення сейсмостійкості споруд та інфраструктури.

Існує велика різниця між сейсмостійкою будівлею, сконструйованою так, щоб вона стояла навіть у разі пошкодження та сейсмостійкою будівлею, сконструйованою таким чином, щоб неушкодженою пережити землетруси. Сейсмостійку будівлю зміцнюють, щоб не розсипалася на уламки (це дозволяє людям втекти); сейсмостійка конструкція має додаткові функції, призначені для захисту під час колювання. Це зміщення є звичайним явищем під час землетрусів, тому що сейсмічні хвилі та вібрація змушують будівлі колюватися під все більшими кутами, поки вони не зруйнуються. Чим вища будівля, тим сильніше рухатимуться її верхні поверхи під час землетрусу.

Інженери та сейсмологи протягом багатьох років віддавали перевагу ізоляції фундаменту як засобу захисту будівель під час землетрусу. Як впливає з назви, ця концепція ґрунтується на відокремленні підструктури будівлі від її надбудови.

Ще одна перевірена технологія, яка допомагає будівлям витримувати землетруси, бере приклад з автомобільної промисловості. Ви знайомі з амортизатором — пристроєм, який контролює небажаний рух пружини у вашому автомобілі. Амортизатори сповільнюють і зменшують величину вібраційних рухів, перетворюючи кінетичну енергію вашої підстрибуючої підвіски в теплову енергію, яка може розсіюватися через гідравлічну рідину. Однак, амортизатори можуть бути корисними при проектуванні сейсмостійких будівель. Інженери зазвичай розміщують заслінки на кожному рівні будівлі, прикріплюючи один кінець до колони, а інший — до балки. Кожен демпфер складається з головки поршня, яка рухається всередині

циліндра, наповненого силіконовою олією. Під час землетрусу горизонтальний рух будівлі змушує поршень у кожній заслінці тиснути на масло, перетворюючи механічну енергію землетрусу на тепло.

Демпфування може приймати різні форми. Інше рішення, особливо для хмарочосів, передбачає підвищення величезної маси біля верхньої частини конструкції. Сталеві троси підтримують масу, а амортизатори в'язкої рідини лежать між масою та будівлею, яку вона намагається захистити. Коли сейсмічна активність викликає коливання будівлі, маятник рухається у протилежному напрямку, розсіюючи енергію.

Інженери називають такі системи налаштованими масовими демпферами, оскільки кожен маятник точно налаштований на власну частоту коливань конструкції. Якщо рух землі змушує будівлю коливатися на її резонансній частоті, будівля буде вібрувати з великою кількістю енергії та, ймовірно, зазнає пошкоджень. Завдання налаштованого демпфера маси полягає в протидії резонансу та мінімізації динамічної реакції конструкції. Пластичність матеріалів — серйозна проблема для інженерів, які намагаються створити сейсмостійкі конструкції. Пластичність описує деформацію, яка виникає в будь-якому матеріалі під час дії на нього сил. Якщо сили досить сильні, форма матеріалу може бути змінена назавжди, що ставить під загрозу його здатність функціонувати належним чином. Сталь може зазнавати пластичних деформацій, як і бетон. І все ж обидва ці матеріали широко використовуються практично у всіх комерційних забудовах.

Деякі з них включають в себе:

1. Використання сейсмостійких матеріалів, таких як армований бетон, сталь, дерево та інші матеріали з високою міцністю.
2. Застосування спеціальних конструктивних методів, таких як гнучкі деформації, механізми газових коливань, зміщення та ін.
3. Підсилення та модернізація існуючих приміщень за для підвищення сейсмостійкості.
4. Будівництво будівель на спеціальних фундаментах, які дозволяють будівлі підніматися і опускатися під час землетрусу.
5. Встановлення спеціальних сейсмічних датчиків і систем автоматичного управління, які можуть попередити про можливий землетрус і прийняти відповідні заходи безпеки.

Чисельні дослідження та фізичні експерименти показали, що існують різні методи розрахунку сейсмостійкості, які використовують при проектуванні будівель. Сьогодні ефективні інструменти моделювання кінцевих елементів дозволяють проводити динамічні розрахунки, які можуть точно передбачити поведінку підпирних стін під впливом різних сейсмічних навантажень, включаючи внутрішні сили, деформації, підвищення тиску води та прогнозовані моделі руйнувань.

Як метод аналізу використовується метод кінцевих елементів. За основу взято методику граничної сейсмостійкості (МГС), затверджену Держатомрегулювання відповідно до Листа 18-31/5508 від 01.09.2014 р.

Склад вихідних даних для виконання розрахунків на сейсмостійкість включає:

- проектну документацію: проектні та монтажні креслення, розрахунки;
- визначення параметрів та навантажень, що відповідають робочому режиму (режим нормальної експлуатації), який передбачається спільним із настанням землетрусу;
- поверхові спектри відповіді.

Результати виконання розрахункового аналізу елементів під час статичних і динамічних навантажень дозволяють визначити внутрішні силові чинники, виходячи з яких обчислюються напруги.

Розрахунковий аналіз сейсмостійкості елементів АЕС, що діють, в рамках методу граничної сейсмостійкості проводиться з метою визначення інтегрального параметра сейсмостійкості HCLPF, що характеризує рівень сейсмічної стійкості цього елемента. Параметр HCLPF, який виражається в одиницях прискорення вільного падіння g , порівнюється з величиною максимального прискорення на ґрунті (PGA), визначеною для майданчика АЕС та характеризує інтенсивність землетрусу, прийнятого як сейсмічні кваліфікаційні вимоги.

Для обчислення величини граничної сейсмостійкості HCLPF використовується коефіцієнт запасу FS, який визначається залежно від:

$$FS = \frac{C - D_{NS}}{(D_S^2 + D_{SAM}^2)^{1/2} + \delta C_S} \quad (1)$$

У спрощеному вигляді формула (3.1) має наступний вигляд:

$$FS = \frac{C - D_{NS}}{D_S} \quad (2)$$

де:

- C - значення допустимого параметра (наприклад, напруги, що допускається);
- D_{NS} – внесок у оцінюваний параметр всіх несейсмічних навантажень, що входять до запропонованої комбінації навантажень;
- D_S - вклад в оцінюваний параметр тільки сейсмічних інерційних навантажень;

D_{SAM} – вклад в оцінюваний параметр навантажень від сейсмічного зміщення опор;

δC_s – зниження величини допустимого параметра внаслідок дії сейсмічного навантаження (наприклад, міцність стіни по відношенню до зсувних навантажень може бути зменшена вертикальним розтягуючим навантаженням на цю стіну, викликану сейсмічною подією).

APM Structure 3D дозволяє обчислювати напруги окремо лише від вкладу сейсмічних навантажень, тобто створюється окрема комбінація завантажень – МРЗ, яка враховує векторне додавання сейсмічних навантажень за трьома напрямками. При цьому напруги (s), одержувані при комбінації МРЗ, можуть бути безпосередньо підставлені у формулу. У такому разі формула набуває наступного вигляду:

$$FS = \frac{(1,8 \cdot [\sigma] - \sigma_2)}{\sigma_s} (3)$$

Розрахунки елементів на сейсмостійкість виконуються з урахуванням фактичної геометрії, розміщення, стану опор та властивостей матеріалу.

Для опорних металокопункцій оцінка сейсмостійкості виконується відповідно до спеціальних норм.

Геометричні розміри опорних копункцій уточнюються за місцем експлуатації. Опорні копункції, для яких відсутня точна інформація щодо матеріалу, приймаються консервативно з матеріалом найменшого класу міцності – С235. Допустима напруга для матеріалу з класом міцності С235:

$$R_d = \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n} = 184, \text{ H/мм}^2 (4)$$

де:

γ_c - коефіцієнт умов роботи;

γ_n - Коефіцієнт надійності.

З метою коректного обліку навантажень від арматури, розміщеній на опорній металокопункції проводиться розрахунок її сейсмостійкості. В результаті розрахунку сейсмостійкості арматури встановлюються зусилля, що впливають на елементи опорної металокопункції.

Відповідно до визначених положень, розрахунок на сейсмостійкість арматури проводиться у схемі жорсткого закріплення патрубків, з використанням спектрів відповіді для найвищої позначки розміщення арматури однієї групи опорних металокопункцій. Виходячи з того, що арматури знаходяться на проміжних опорних копункціях, то сейсмічні навантаження приймаються з коефіцієнтом, що дорівнює 2. Додатково при розрахунку сейсмостійкості арматури враховується значення її власної ваги та умови експлуатації. Для подальшого розрахунку опорної металокопункції вибирається арматура із найбільшим значенням отриманих зусиль (арматура з найбільшою масою).

Розрахунки елементів на сейсмостійкість виконуються з урахуванням фактичної геометрії, розміщення, стану опор та властивостей матеріалу. Для опорних металокопункцій оцінка сейсмостійкості виконується відповідно до норм. Геометричні розміри опорних копункцій уточнюються за місцем експлуатації. Опорні копункції, для яких відсутня точна інформація щодо матеріалу, приймаються консервативно з матеріалом найменшого класу міцності – С235. Розрахунковий опір для даного класу міцності дорівнює

$$R_y = 230, \text{ H/мм}^2 (5)$$

Допустима напруга для матеріалу з класом міцності С235:

$$R_d = \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n} = 184, \text{ H/мм}^2 (6)$$

де:

γ_c - коефіцієнт умов роботи;

γ_n - коефіцієнт надійності.

Для металокопункцій коефіцієнт запасу FS визначається за наступною залежністю:

$$FS = \frac{(R_d - \sigma_2)}{\sigma_s} (7)$$

Сейсмостійкість металокопункцій вважається забезпеченою при виконанні наступних умов:

- величина граничної сейсмостійкості $HCLPF > PGA$;
- максимальні значення еквівалентних напруг у всіх вузлах та елементах не перевищують значення розрахункового опору (критерій міцності). Виконуються такі умови: виконуються критерії міцності та стійкості конструктивних елементів металокопункції; виконуються умови міцності та сейсмостійкості зварних та болтових з'єднань.

Відповідно до визначених положень, розрахунок на сейсмостійкість арматури проводиться у схемі жорсткого закріплення патрубків, з використанням спектрів відповіді для найвищої позначки розміщення арматури однієї групи опорних металокопункцій. Виходячи з того, що арматури знаходяться на проміжних опорних копункціях, то сейсмічні навантаження приймаються з коефіцієнтом, що збільшує, рівним 2 (п.6.1.6 [6]). Додатково при розрахунку сейсмостійкості арматури враховується значення її

власної ваги та умови експлуатації.

Для груп опорних металоконструкцій, де на конструкціях одного виду встановлена арматура різних типів, проводиться додатковий аналіз, метою якого є визначення арматури, що надає найбільший вплив на опорну металоконструкцію. Для подальшого розрахунку опорної металоконструкції вибирається арматура із найбільшим значенням отриманих зусиль (арматура з найбільшою масою).

Метод розрахункового аналізу обладнання проводиться відповідно до методу граничної сейсмостійкості [6].

Метою розрахунків було визначення граничної сейсмостійкості обладнання.

У рамках Звіту щодо підвищення кваліфікації обладнання енергоблоку № 2 ВП ХАЕС на сейсмічні впливи розглядається обладнання з невідповідністю групи «А». Для обладнання, у якого, крім невідповідностей групи «А», також присутні зауваження групи «В», «С» або «D» має бути виконаний додатковий аналіз зауважень, уточнено обсяг та якість реалізованих компенсуючих заходів, на підставі чого буде виконано підвищення кваліфікації на наступних етапах проведення кваліфікації обладнання згідно з ТЗ.

Систематичне використання або невикористання відомих сейсмостійких методів у будь-якому суспільстві залежить від сприйняття ризику землетрусу та наявних фінансових ресурсів. Практика сейсмостійкого будівництва значно дорожча, ніж звичайне будівництво. На сприйняття в основному впливає коротка індивідуальна і більш тривала соціальна пам'ять. Якщо час повторення землетрусу довший за збереження соціальної пам'яті, якщо руйнівні землетруси відходять у минуле, суспільства знову і знову допускають одні й ті самі помилки при будівництві. Довговічність пам'яті, можливо, становить від одного до трьох поколінь, тобто менше 100 років. Події, які відбуваються рідше, можна легко забути, а ризик повторення вважається незначним і не вартує витрат на безпечні методи будівництва. Часті землетруси підтримують безпечну практику будівництва.

Необхідно зазначити, що через різні причини частина обладнання з невідповідностями групи «А» не розглядається в рамках цього звіту, а саме:

- баки запасу технічної води групи «А» 2VF10B01; 2VF20B01; 2VF30B01, зважаючи на їх відключення згідно з технічним рішенням №2.ТЦ.0130.ТР-VF «Про відключення баків запасу технічної води групи «А» 2VF10B01; 2VF20B01; 2VF30B01 за постійною схемою»;

- баки спринклерного розчину 2TQ11B01; 2TQ21B01; 2TQ31B01, баки аварійного запасу концентрованого розчину бору 2TQ13B01; 2TQ23B01; 2TQ33B01, баки аварійного запасу концентрованого розчину бору 2TQ14B01; 2TQ24B01; 2TQ34B01 через те, що для такого обладнання необхідно уточнювати окремі розміри за місцем експлуатації, зокрема для коректного завдання навантажень на патрубки необхідно уточнити трасування незареєстрованих ділянок трубопроводів після першої запірної арматури. Розрахунок сейсмостійкості такого обладнання буде виконано на підставі результатів візуального обстеження у ППР-2015;

- теплообмінники аварійного розхолодження 2TQ10W01, 2TQ20W01, 2TQ30W01 через те, що для такого обладнання необхідно уточнювати окремі розміри за місцем експлуатації, зокрема для коректного завдання навантажень на патрубки необхідно уточнити трасування незареєстрованих ділянок трубопроводів. Розрахунок сейсмостійкості такого обладнання буде виконано на підставі результатів візуального обстеження у ППР-2015;

- теплообмінники розхолодження басейну витримки 2TG11W01, 2TG12W01, 2TG13W01 через те, що для такого обладнання необхідно уточнювати окремі розміри за місцем експлуатації, зокрема для коректного завдання навантажень на патрубки необхідно уточнити трасування незареєстрованих ділянок трубопроводів. Розрахунок сейсмостійкості такого обладнання буде виконано на підставі результатів візуального обстеження у ППР-2015;

- сітчасті фільтри 2TQ13N01, 2TQ23N01, 2TQ33N01, через відсутність за ними технічної документації в архіві РЦ та необхідність здійснення вимірів за місцем експлуатації, зокрема уточнення трасування трубопроводу. Розрахунок сейсмостійкості такого обладнання буде виконано на підставі результатів візуального обстеження у ППР-2015;

- баки проміжні 2QC12B01, 2QC22B01, 2QC32B01 у зв'язку з відсутністю адекватної можливості оцінити обладнання за місцем експлуатації та необхідністю збору додаткових вихідних даних;

- арматура систем ТГ, ТК, УТ, для сейсмічної кваліфікації якої необхідне підтвердження сейсмостійкості відповідних трубопроводів. Для окремих незареєстрованих ділянок трубопроводів необхідно уточнити трасування для коректного обліку фізичних меж трубопроводів. Оцінку сейсмостійкості таких трубопроводів буде виконано на підставі результатів візуального обстеження у ППР-2015.

Для того, щоб визначити реакцію конструкції на сейсмічні навантаження використовується методика розрахунку конструкцій від узагальненого сейсмічного навантаження.

Відповідно до даної методики розрахунок поділяють на три етапи:

1.Обрахування власних форм та частоту коливань. Це перший та обов'язковий крок, який відбувається без урахування динамічних навантажень. Рівняння має вигляд:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0(8)$$

2. Обчислення модальних (що відповідають кожній з власних форм) інерційних сейсмічних навантажень на конструкцію для заданого напрямку впливу. Для визначення сейсмічних навантажень в просторовій динамічній системі при трикомпонентній сейсмічній взаємодії, що задана спектрами відгуку для трьох взаємно перпендикулярних напрямків.

У результаті проведених розрахунків частот власних коливань щодо X, отримуємо наступні дані.

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** X DIRECTION								
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS	
1	5.90002	0.16935	-0.10406E-04	0.000018	0.108288E-09	0.129217E-09	0.108573E-09	
2	31.5199	0.31726E-01	0.21022	0.368719	0.441910E-01	0.527322E-01	0.432059E-01	
3	32.4971	0.30772E-01	0.40427E-02	0.007091	0.163438E-04	0.527517E-01	0.159794E-04	
4	37.0585	0.26984E-01	0.26039E-02	0.115091	0.740270E-04	0.528401E-01	0.723768E-04	
5	44.8386	0.22302E-01	0.52857E-01	0.093413	0.289435E-02	0.542244E-01	0.277311E-02	
6	47.0655	0.21246E-01	0.28682	0.503082	0.822662E-01	0.154391	0.804320E-01	
7	55.9322	0.17879E-01	0.21473E-01	0.037663	0.461086E-03	0.154941	0.480806E-03	
8	81.2003	0.12315E-01	-0.45474E-02	0.007976	0.206784E-04	0.154966	0.202174E-04	
9	89.3346	0.11194E-01	0.20138	0.353226	0.405556E-01	0.203360	0.396514E-01	
10	95.2114	0.10182E-01	-0.96027E-02	0.16843	0.92127E-04	0.203470	0.901567E-04	
11	100.633	0.09371E-02	-0.57013	1.000000	0.325046	0.591340	0.317799	
12	137.399	0.72780E-02	0.15005	0.263195	0.225164E-01	0.618209	0.220143E-01	
13	176.755	0.56575E-02	-0.35098E-01	0.061562	0.123188E-02	0.619679	0.120441E-02	
14	186.512	0.53616E-02	0.37400E-02	0.006560	0.139873E-04	0.619695	0.136754E-04	
15	192.998	0.51814E-02	0.19001E-02	0.003333	0.361032E-05	0.619700	0.352952E-05	
16	206.870	0.48388E-02	-0.10751	0.188580	0.115894E-01	0.623493	0.113017E-01	
17	234.409	0.42660E-02	0.35102	0.615622	0.123213	0.780521	0.120466	
18	241.874	0.41395E-02	-0.70323E-01	0.123345	0.494526E-02	0.786422	0.483500E-02	
19	252.020	0.39679E-02	-0.33130E-01	0.058110	0.109760E-02	0.787732	0.107313E-02	
20	259.144	0.38589E-02	0.73207E-02	0.012840	0.535926E-04	0.787796	0.523977E-04	
21	273.623	0.36847E-02	0.17602	0.308731	0.309817E-01	0.824766	0.302909E-01	
22	287.844	0.34777E-02	-0.28277E-02	0.004960	0.799604E-05	0.824775	0.781776E-05	
23	294.740	0.33928E-02	0.62063E-01	0.108858	0.385182E-02	0.829371	0.376594E-02	
24	297.128	0.33686E-02	-0.48840E-01	0.085664	0.238831E-02	0.832218	0.233218E-02	
25	312.614	0.31988E-02	-0.24202E-01	0.042451	0.585756E-03	0.832917	0.572696E-03	
26	323.179	0.30943E-02	-0.37316E-01	0.065452	0.139247E-02	0.834878	0.136147E-02	
27	330.965	0.30215E-02	0.19003E-01	0.033330	0.361100E-03	0.835009	0.353049E-03	
28	335.928	0.29768E-02	0.17121E-02	0.004960	0.293125E-05	0.835013	0.286590E-05	
29	348.897	0.28662E-02	-0.25472	0.446781	0.648834E-01	0.912437	0.634368E-01	
30	377.823	0.26467E-02	-0.11221E-01	0.019681	0.125902E-03	0.912887	0.123099E-03	
31	390.974	0.25577E-02	0.45542E-01	0.079881	0.207408E-02	0.915062	0.202784E-02	
32	404.601	0.24716E-02	0.32405E-01	0.058839	0.105011E-02	0.916315	0.102669E-02	
33	408.878	0.24457E-02	-0.85180E-01	0.149405	0.725562E-02	0.924973	0.709388E-02	
34	419.245	0.23652E-02	0.15857	0.273395	0.242954E-01	0.923964	0.237537E-01	
35	421.253	0.23739E-02	0.84924E-01	0.148956	0.721211E-02	0.962870	0.705131E-02	
36	451.750	0.22136E-02	0.65186E-01	0.114335	0.424919E-02	0.967641	0.415445E-02	
37	467.699	0.21381E-02	0.25880E-01	0.045393	0.669772E-03	0.968440	0.654839E-03	
38	497.483	0.20101E-02	-0.10574	0.185474	0.111818E-01	0.981783	0.109325E-01	
39	518.215	0.19297E-02	-0.10546	0.184977	0.111219E-01	0.995054	0.108739E-01	
40	535.323	0.18576E-02	-0.64378E-01	0.112919	0.414456E-02	1.00000	0.405219E-02	
sum					0.838027		0.819342	

Коли сейсмічні хвилі досягають поверхні землі, вони змушують землю та все, що на ній знаходиться, вібрувати на певних частотах. Під час землетрусу будівля має тенденцію вібрувати навколо однієї певної частоти, відомої як її природна або основна частота. Коли будівля та земля мають спільну власну частоту будівлі, вони називаються резонансними. Це погано. Резонанс посилює наслідки землетрусу, спричиняючи більші пошкодження будівель.

Навіть симетричні будівлі повинні витримувати значні бічні сили. Інженери протидіють цим силам як у горизонтальних, так і у вертикальних структурних системах будівлі. Діафрагми є ключовим компонентом горизонтальної конструкції. До них відносяться підлоги будівлі, а також її дах. Інженери зазвичай розподіляють кожну діафрагму на окремому майданчику та змінюють її горизонтально, щоб вона могла розподіляти бічні сили з вертикальними елементами конструкції.

Метою сейсмостійких будівель є збереження життя. Це означає, що будівля, яка не руйнується і дозволяє своїм мешканцям втекти, вважається успішною, навіть якщо її зрештою знесуть.

Обговорення результатів.

Землетруси відбуваються, коли масиви гірських порід у земній корі ковзають і ковзають одна об одну. Цей вид руху найчастіше зустрічається вздовж розлому, розриву в тілі скелі, який може простягатися на милі або навіть сотні миль. Коли шматки гірської кори раптово ковзають і рухаються, вони вивільняють величезну кількість енергії, яка потім поширюється через земну кору у вигляді сейсмічних хвиль. На поверхні Землі ці хвилі змушують ґрунт тремтіти й вібрувати, іноді сильно.

За останні роки наука про будівництво сейсмостійких конструкцій значно просунулася вперед, але це не зовсім нова тема. Фактично, кілька старовинних будівель все ще стоять сьогодні, незважаючи на їх розташування в активних сейсмічних зонах. Цікаво, що більшість майбутнього сейсмічної інженерії передбачає огляд назад, а не вперед. Це тому, що модернізація старих будівель із покращенням дизайну та матеріалів так само важлива, як будівництво нових будівель з нуля. Інженери виявили, що додавання систем ізоляції основи до конструкцій є здійсненним і економічно привабливим.

Багаторічний досвід проведення експертних розрахунків дозволяє стверджувати, що в окремих випадках положення методики не забезпечує достатнього рівня.

Отримані результати можуть бути використані при розрахунку сейсмостійкості в архітектурі та плануванні забудов. Сучасна модернізація дозволить забезпечити сейсмостійкість та зберегти життя людей у разі аварії. Розрахункова модель (схема) будівельних конструкцій, обладнання та трубопроводів АЕС повинна відображати важливі для оцінки сейсмостійкості особливості геометрії елементів, а також розподілу мас і жорсткостей.

Висновки

1. Монументальні споруди найкраще підходять для вивчення антисейсмічних методів будівництва.
2. Застосування передового досвіду, отриманого з місцевих сейсмічних культур, значно знизило б вразливість громад, які живуть у сейсмонебезпечних районах.
3. Можливість зробити будівлі здатними протистояти коливанню землі та знати способи швидкої реконструкції після руйнування, залежить від наявного матеріалу та знання належної практики будівництва.
4. Кожному виду обладнання визначено методи та порядок підвищення кваліфікації обладнання з метою уникнення руйнувань під час землетрусу.
5. Групування обладнання відбувається відповідно до визначених критерій.
6. Для кожної групи кваліфікації обладнання потрібні інші методи.

Список використаної літератури

1. Kagan Y.Y. Universality of the seismic moment-frequency relation // Pure Appl. Geoph. — 1999. — V. 155. — P. 537—573.
2. Немчинов Ю.І., Хавкін О.К., Мар'єнков М.Г. та ін. Практичні питання динаміки будівель // Будівництво Ук раїни. — 2013. — № 6. — С. 6—21.
3. Національний атлас України / за ред. Л.Г. Руденка та ін. — К.: Картографія, 2007. — 640 с.
4. ДБН В.1.1-12:2006. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво в сейсмічних районах України. — К.: Мінрегіонбуд України, Укрархбудінформ, 2006. — 84 с.
5. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво в сейсмічних районах України. — К.: Мінрегіонбуд України, Укрархбудінформ, 2014. — 110 с.
6. Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. — Vienna: IAEA, 2010. — 62 p.
7. Ohsaki Y. On the significance of phase content in earthquake ground motions // Int. J. Earthquake Eng. Struct. Dyn. — 1979. — V. 7. — P. 427—439.
8. 75.111-00.03.02-12-17-ПР «Забезпечення сейсмостійкості елементів, систем та споруд, важливих для безпеки. Побудова комплексу поверхових акселерограм та спектрів відповіді для будівель та споруд енергоблоків №5 та №6. Книга2. Результати розрахунку поверхових спектрів відповіді будівлі РО-5, РО-6».
9. ГОСТ 30546.1-98 «Загальні вимоги до машин, приладів та інших технічних виробів та методи розрахунку їх складних конструкцій у частині сейсмостійкості».
10. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування, Київ, Мінрегіонбуд України, 2014.
11. ЗВІТ- Кваліфікація тепломеханічного обладнання РДЕС енергоблока №5 ВП «Запорізька АЕС» на сейсмічні дії.

T.Bibik¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-0134-6022

I.Ostapenko¹, engineer, ORCID 0000-0003-3980-1609

D. Havryl'chyk¹, master student, ORCID 0009-0002-8315-7769

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

CALCULATION OF THE SEISMIC RESISTANCE OF THE START-UP AIR SYSTEM OF RDES

The earth beneath our feet is alive, even though it is a rocky planet. Despite the fact that geological activity cannot be felt, sometimes it manifests itself sharply and dangerously. Earthquakes and seismic phenomena are responsible for the transmission of these tectonic shocks and have forced people to be prepared for different situations with the oscillation of the earth's crust. Seismic shocks cause many dangerous phenomena: landslides and avalanches in the mountains, flood waves (tsunamis) on the shores of seas and oceans, cracks and liquefaction on the land surface.

Depending on the magnitude of the earthquakes, each year there are from one to two dozen earthquakes with a power of more than 7 points according to the Richter scale. How can the destruction of building equipment, disasters and deaths be prevented and what is "seismic resistance" is the question of our research.

In order to confirm that the equipment is guaranteed to perform its functions under seismic conditions, equipment qualification is performed. The assessment of the initial state of seismic qualification consists in comparing the seismic qualification characteristics with the seismic qualification requirements, as well as establishing the availability of information in the factory and project documentation regarding the fastening of the equipment, and allows to establish whether the qualification requirements presented in the process of seismic qualification were taken into account during development and staging for production, manufacturing and installation.

Seismic qualification characteristics are contained in the design documentation of equipment developers and manufacturers and can be specified in different forms: values of acceleration amplitudes; the intensity of the earthquake and the level of installation of equipment above the zero mark; test parameters, mechanical performance groups, etc.

If the qualification characteristics of the equipment meet the defined or calculated qualification requirements, then the qualification of such equipment for earthquake resistance is established.

Key words: seismic resistance, stability, earthquake, oscillations, earth's crust.

References

1. Kagan Y.Y. Universality of the seismic moment-frequency relation // Pure Appl. Geoph. — 1999. — V. 155. — P. 537—573.
2. Nemchynov Y.I., Khavkin O.K., Maryenkov M.G. etc. Practical issues of building dynamics // Construction of Ukraine. — 2013. — № 6. — p. 6—21.
3. National atlas of Ukraine / edited by L.G. Rudenko and others. — K.: Cartography, 2007. — 640 p.
4. DBN B.1.1-12:2006. Protection from dangerous geological processes, harmful operational influences, from fire. Construction in seismic areas of Ukraine. — K.: Ministry of Regional Construction of Ukraine, Ukrarchbudinform, 2006. — 84 p.
5. DBN B.1.1-12:2014. Construction in seismic areas of Ukraine. — K.: Ministry of Regional Construction of Ukraine, Ukrarchbudinform, 2014. — 110 p.
6. Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. — Vienna: IAEA, 2010. — 62 p.
7. Ohsaki Y. On the significance of phase content in earthquake ground motions // Int. J. Earthquake Eng. Struct. Dyn. — 1979. — V. 7. — P. 427—439.
8. 75.111-00.03.02-12-17-PR «Ensuring seismic resistance of elements, systems and structures important for safety. Construction of a complex of floor accelerograms and response spectra for buildings and structures of power units No. 5 and No. 6. Book 2. The results of the calculation of floor spectra of the response of buildings RO-5, RO-6».
9. GOST 30546.1-98 «General requirements for machines, devices and other technical products and methods of calculating their complex structures in terms of seismic resistance».
10. DBN B.2.6-198:2014. Steel structures. Design standards, Kyiv, Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2014.
11. REPORT - Qualification of the thermomechanical equipment of the RDES of power unit No. 5 of the Zaporizhzhya NPP VP for seismic actions.

Надійшла: 12.08.2024

Received: 12.08.2024

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗОВНІШНЬОЇ ТЕМПЕРАТУРИ НА ПИТОМЕ СПОЖИВАННЯ ГАЗУ ТЕПЛОДЖЕРЕЛ

У статті розглядається вплив зовнішньої температури на питомих споживання газу теплогенеруючих установок з урахуванням тарифів на централізоване опалення по регіонах України. Дослідження спрямоване на виявлення закономірностей між зовнішніми кліматичними умовами і споживанням газу для опалення, що дозволяє оптимізувати енергоспоживання та підвищити ефективність використання енергоресурсів.

Проведено аналіз даних по тарифах на централізоване опалення, чисельності населення та площі регіонів України. Виконано кластерний аналіз та ієрархічну класифікацію регіонів, що дозволило виявити групи з подібними характеристиками споживання газу та тарифами на опалення. Досліджено співвідношення населення відносно площі регіонів та його вплив на споживання газу і тарифну політику.

Ключові слова: питомих споживання газу, зовнішня температура, теплові втрати, тарифи на опалення, чисельність населення, густина населення, кластерний аналіз, ієрархічна класифікація, регресійний аналіз, енергоефективність, централізоване опалення.

Вступ.

Питомих споживання газу є важливим показником ефективності роботи теплогенеруючих установок. На нього значно впливають зовнішні фактори, зокрема температура зовнішнього повітря [1]. Соціально-економічні фактори, такі як чисельність населення [3, 17], тариф на опалення [2, 16] також відіграють важливу роль у формуванні обсягів споживання газу.

Аналіз впливу цих факторів на споживання газу є необхідним для підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів. Розуміння взаємозв'язків між кліматичними умовами, соціально-економічними показниками та споживанням газу дозволяє оптимізувати роботу теплогенеруючих установок, зменшити витрати на енергоресурси та підвищити енергетичну безпеку.

Співвідношення площі, населення та тариф на опалення по регіонах України наведено на рисунку 1.

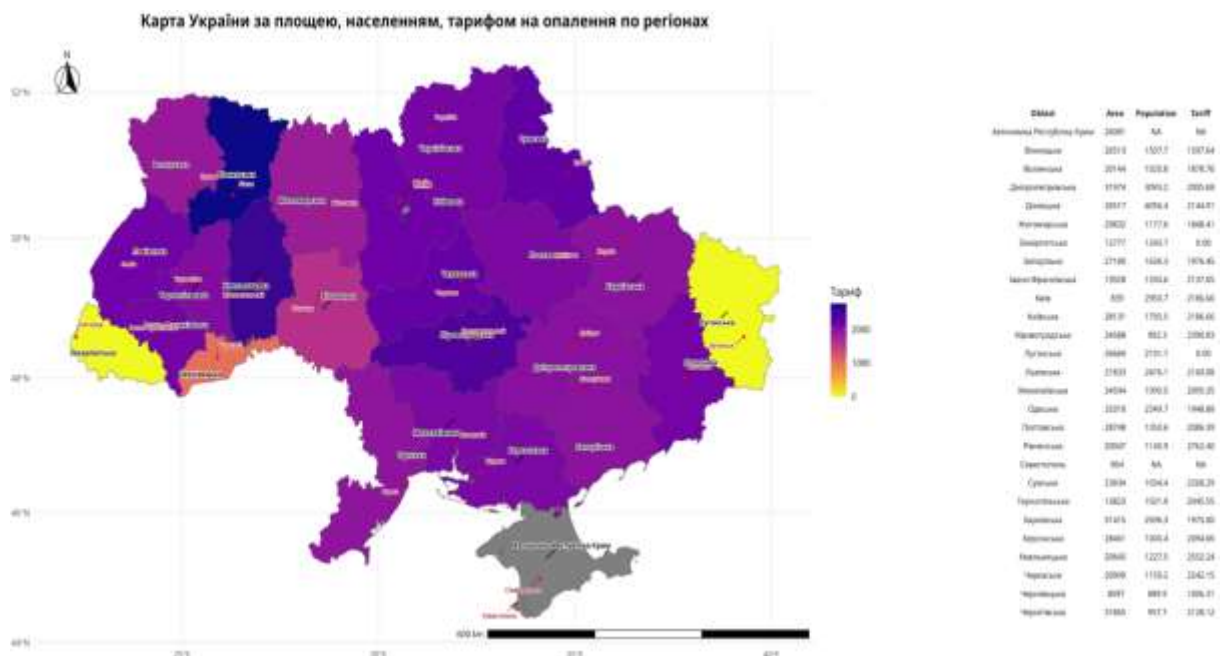


Рисунок 1 - Карта України за площею, населенням, тарифом на опалення по регіонах

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Вплив зовнішньої температури на споживання газу теплогенеруючими установками активно досліджується в сучасній науковій літературі. Значна увага приділяється аналізу тарифів на централізоване

опалення, впливу соціально-економічних факторів на енергоспоживання та застосування методів кластерного аналізу для групування регіонів за схожими паливно-енергетичними характеристиками.

Мета та завдання. Метою дослідження є підвищення адекватності прийняття рішень під час планування споживання теплової енергії шляхом аналізу впливу зовнішньої температури на питоме споживання газу теплогенераторами з урахуванням тарифів на централізоване опалення по регіонах України.

Матеріали і результати дослідження.

Дані для дослідження були отримані з офіційних джерел, включаючи Державну службу статистики України та інші національні агентства, що надають інформацію про тарифи на опалення, чисельність населення та площу областей [9, 10, 16, 17, 18].

Для виявлення груп регіонів з подібними характеристиками було проведено кластерний аналіз методом *k*-середніх [4]. Цей метод дозволяє розділити сукупність даних на *k* груп, так щоб регіони всередині кожної групи були максимально схожими між собою за обраними ознаками (тарифами на опалення та чисельністю населення), а регіони з різних груп – максимально відрізнялися.

Для оцінки зв'язку між чисельністю населення та тарифами на опалення було проведено регресійний аналіз [9, 10]. Це дозволило виявити можливі кореляції та взаємозалежності між соціально-економічними показниками та енергоспоживанням.

Для кращого розуміння та інтерпретації результатів аналізу були створені графіки та діаграми, що відображають розподіл тарифів по регіонах, зв'язок між чисельністю населення та тарифами, а також результати кластерного та ієрархічного аналізу.

Основою для аналізу впливу зовнішньої температури на споживання газу є закони теплопередачі. Питоме споживання газу залежить від тепловтрат будівлі або споруди, які визначаються різницею температур між внутрішнім і зовнішнім середовищем. Теплопередача відбувається за трьома основними механізмами: теплопровідність, конвекція та випромінювання. У контексті будівель найважливішим є процес теплопровідності, який описує передачу тепла через матеріали будівельних конструкцій.

Тепловий баланс будівлі можна описати рівнянням теплопередачі [6, 8]:

$$Q = k \cdot A \cdot (T_{\text{вн}} - T_{\text{зовн}}),$$

де: *Q* – теплові втрати, *k* – коефіцієнт теплопередачі, *A* – площа поверхні будівлі, *T_{вн}* – внутрішня температура, *T_{зовн}* – зовнішня температура.

Для підтримки комфортної температури всередині приміщення необхідно компенсувати ці теплові втрати. Споживання газу для цієї компенсації визначається кількістю тепла, необхідного для підтримання заданої температури. Це споживання описується наступною формулою [5, 6, 7, 8, 11]:

$$G = \frac{Q}{\eta \cdot H} \cdot \eta \cdot H,$$

де: *G* – споживання газу, *Q* – теплові втрати, η – ефективність теплогенератора, *H* – теплотворна здатність газу.

Оптимізація споживання газу включає в себе заходи щодо зменшення тепловтрат (покращення теплоізоляції, встановлення енергоефективних вікон тощо) та підвищення рівня ефективності теплогенераторів (використання сучасних котлів з високим коефіцієнтом корисної дії).

Врахування всіх цих аспектів дозволяє значно знизити витрати на опалення та підвищити енергоефективність будівель.

Тарифи на централізоване опалення в Україні значно варіюються в залежності від області (рисунок 2). Ці відмінності зумовлені різними факторами, включаючи економічний розвиток регіону, вартість енергоресурсів, інфраструктурні особливості, а також політику місцевих органів влади.

Для аналізу зв'язку між чисельністю населення та тарифом на опалення використовувалось лінійне регресійне рівняння [2, 3, 4, 11, 14]:

$$T = a + b \cdot N,$$

де: *T* – середньозважений тариф на опалення, *N* – чисельність населення, *a* і *b* – коефіцієнти регресії, що визначаються методом найменших квадратів.

Чисельність населення взята за даними станом на лютий 2022 року, а середньозважений тариф на опалення — від 25 червня 2024 року [16, 17].

Аналіз даних показує, що існує певний зв'язок між чисельністю населення та тарифами на опалення (рисунок 3). Регіони з більшою чисельністю населення мають тенденцію до нижчих тарифів.

Таким чином, зв'язок між чисельністю населення та тарифами на опалення вказує на те, що регіони з більшою чисельністю населення мають певні переваги в економії на масштабі та ефективності інфраструктури. Це підкреслює важливість стратегічного планування розвитку теплопостачальних систем, особливо в менш густонаселених та економічно слабких регіонах.

Для кластерного аналізу областей використовувався метод *k*-середніх. Цей метод дозволяє групувати регіони за схожими характеристиками, такими як чисельність населення та тариф на опалення. Кількість кластерів *k* визначалась за допомогою методу "лікоть", який полягає в аналізі залежності суми квадратів відхилень (RSS) від кількості кластерів.

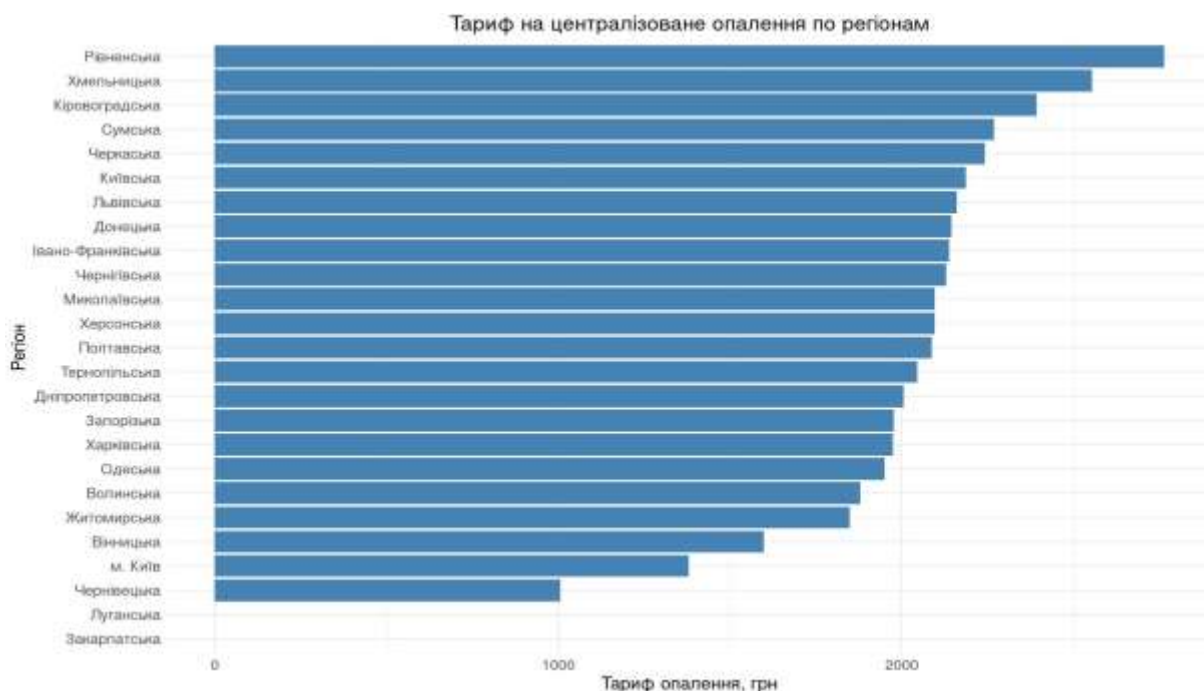


Рисунок 2 - Тариф на централізоване опалення по регіонам

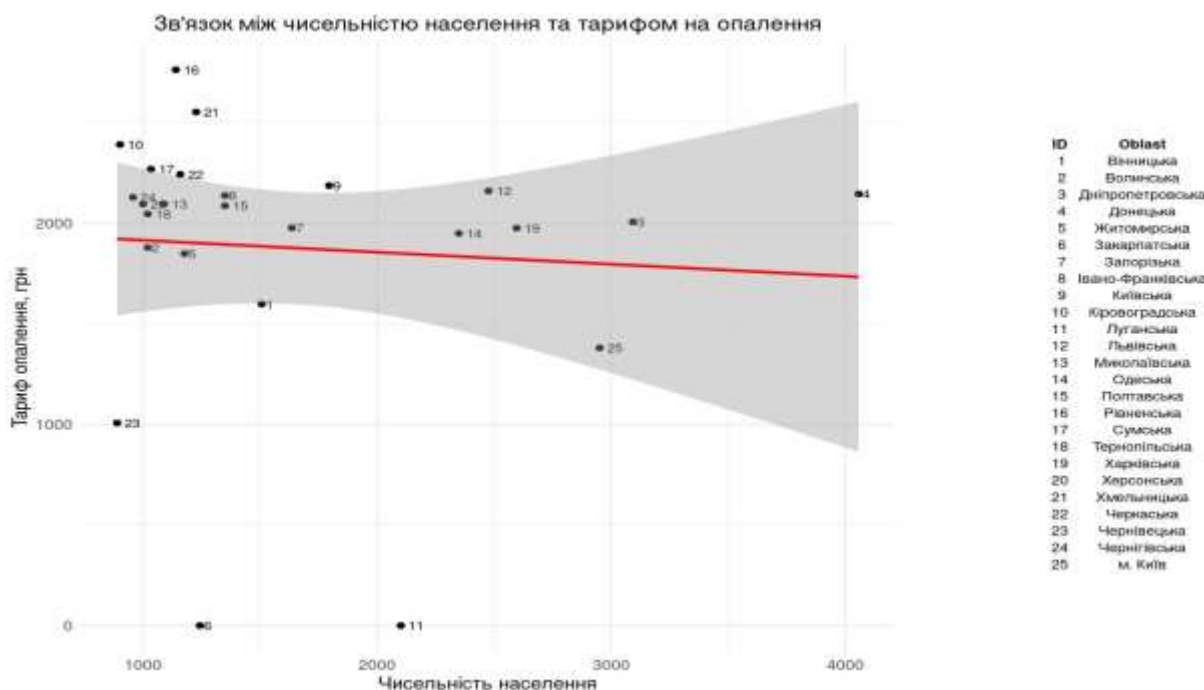


Рисунок 3 - Зв'язок між чисельністю населення та тарифом на опалення

Формально, RSS визначається як [4]:

$$RSS(k) = \sum_{i=1}^k \sum_{j \in C_i} \|x_j - \mu_i\|^2,$$

де: C_i – кластер, x_j – точка даних (наприклад, область), μ_i – центроїд (середнє значення) кластера C_i , RSS – сума квадратів відхилень.

Попередня обробка даних: Дані нормалізуються для забезпечення порівнянності різних параметрів, таких як чисельність населення і тарифи на опалення.

Інтерпретація результатів: регіони з подібними характеристиками групуються в одні й ті ж кластери, що дозволяє виявити регіональні особливості та патерни.

Результати кластерного аналізу дозволяють визначити регіони, які мають схожі показники чисельності населення та тарифів на опалення (рисунок 4). Це може допомогти в розробці цільових стратегій щодо оптимізації витрат на опалення та підвищення ефективності використання енергоресурсів.

Кластерний аналіз також може виявити регіони, які потребують додаткових інвестицій у інфраструктуру або мають потенціал для зниження тарифів завдяки економії на масштабі. Таким чином, застосування методу k-середніх сприяє кращому розумінню регіональних відмінностей та допомагає у прийнятті обґрунтованих рішень щодо політики у сфері теплопостачання.

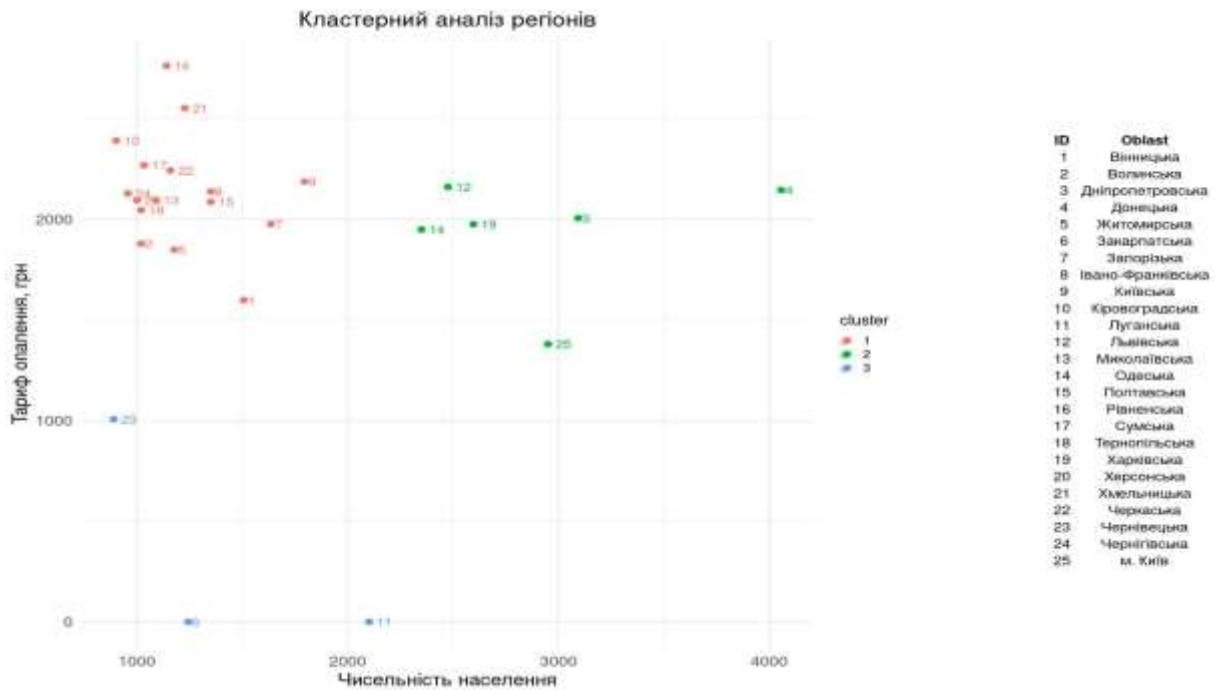


Рисунок 4 - Кластерний аналіз регіонів

Ієрархічна класифікація є методом кластерного аналізу, який використовується для побудови дерева (дендрограми), що відображає ієрархічну структуру об'єднання регіонів в кластери. У цьому дослідженні застосовувався метод агломеративної кластеризації, де кожна область спочатку розглядається як окремий кластер, а потім поступово об'єднується з найближчими кластерами, формуючи більші групи.

На початку кожний регіон є окремим кластером. Таким чином, якщо є n регіонів, то спочатку є n кластерів.

На кожному кроці алгоритму обчислюється відстань між всіма парами кластерів. Відстань між кластерами визначається за формулою [4]:

$$d(A, B) = \min_{a \in A, b \in B} d(a, b),$$

де: A і B – два кластери, $d(a, b)$ – евклідова відстань між об'єктами a та b , що належать до кластерів A і B відповідно.

Після обчислення відстаней, два кластери, між якими відстань мінімальна, об'єднуються в один кластер. Це об'єднання мінімізує загальну відстань між об'єктами у новому кластері.

Процес обчислення відстаней та об'єднання кластерів повторюється до тих пір, поки всі об'єкти не будуть об'єднані в один великий кластер. На кожному кроці кількість кластерів зменшується на один.

Результатом ієрархічної кластеризації є дендрограма – дерево, що відображає процес об'єднання кластерів. Дендрограма дає змогу візуально оцінити структуру даних та визначити оптимальну кількість кластерів, аналізуючи висоту гілок дерева.

Ієрархічна класифікація регіонів в цьому дослідженні дозволяє виявити групи регіонів з подібними соціально-економічними та тарифними характеристиками. Це особливо корисно для порівняння регіонів і розробки цільових стратегій управління енергоресурсами.

Наприклад, використовуючи метод Варда (Ward's method), який мінімізує суму квадратів відхилень в межах кластерів, можна побудувати дендрограму, де на осях вказані назви регіонів, а не просто номери. Це забезпечує наочність та зручність у трактуванні результатів, дозволяючи легко ідентифікувати регіони, які мають схожі властивості щодо споживання енергії та тарифів.

Ієрархічна класифікація регіонів України дозволяє виявити приховані закономірності та взаємозв'язки між регіонами, що сприяє більш ефективному управлінню енергоресурсами та розробці регіональних енергетичних стратегій. Результати ієрархічної кластеризації областей України за площею регіонів, за густиною опалення та за тарифами на опалення наведені відповідно на рисунках 5-7.

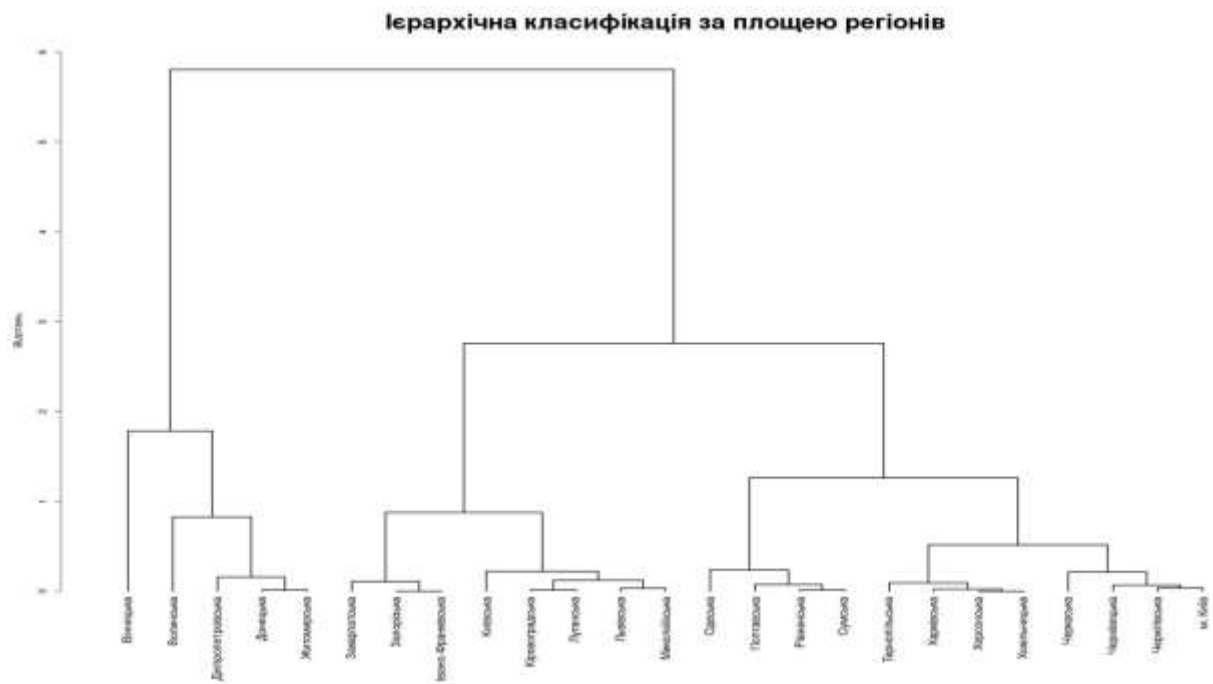


Рисунок 5 - Ієрархічна класифікація за площею регіонів

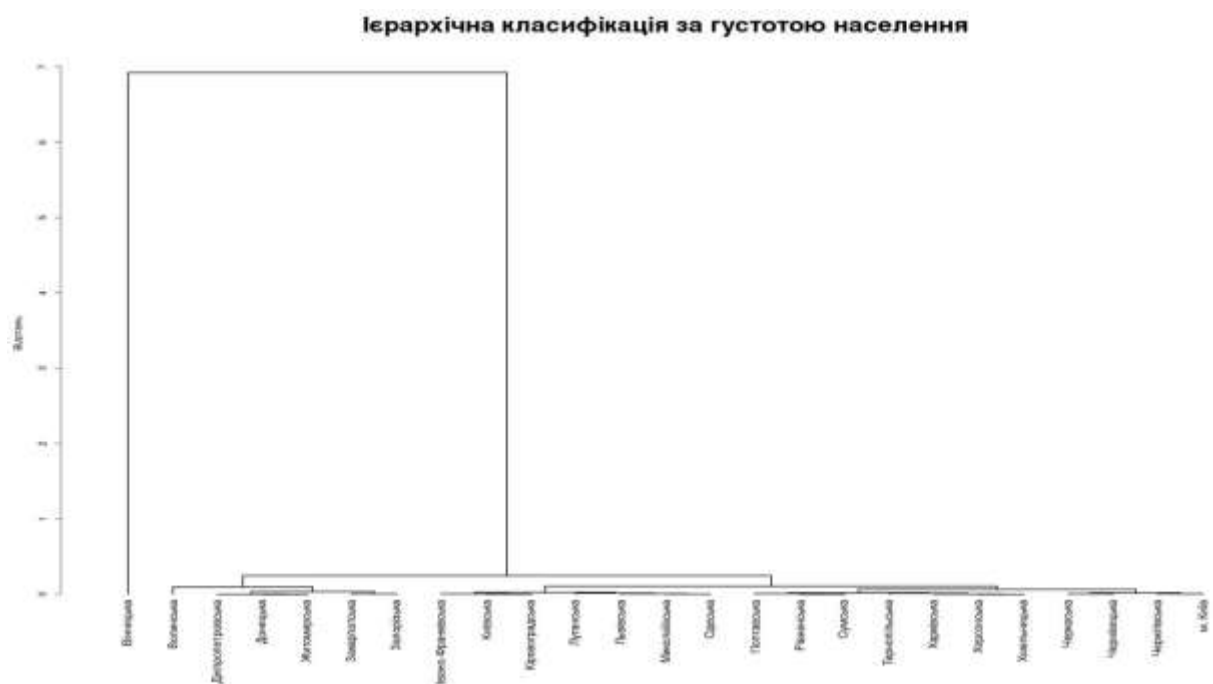


Рисунок 6 - Ієрархічна класифікація за густиною населення

Співвідношення чисельності населення до площі регіону є важливим показником, який характеризує густину населення. Густина населення відображає, наскільки щільно заселені різні регіони, і є ключовим фактором при плануванні економічної та соціальної інфраструктури. Це співвідношення може впливати на різні аспекти регіонального розвитку, включаючи доступність послуг, транспортну інфраструктуру, а також на тарифи на централізоване опалення.

Густина населення (ρ) визначається за формулою [3, 9]:

$$\rho = \frac{S}{N}$$

де: ρ – густина населення (осіб на квадратний кілометр), N – чисельність населення області, S – площа регіону (квадратні кілометри).

Чисельність населення взята за даними станом на лютий 2022 року [16, 18].

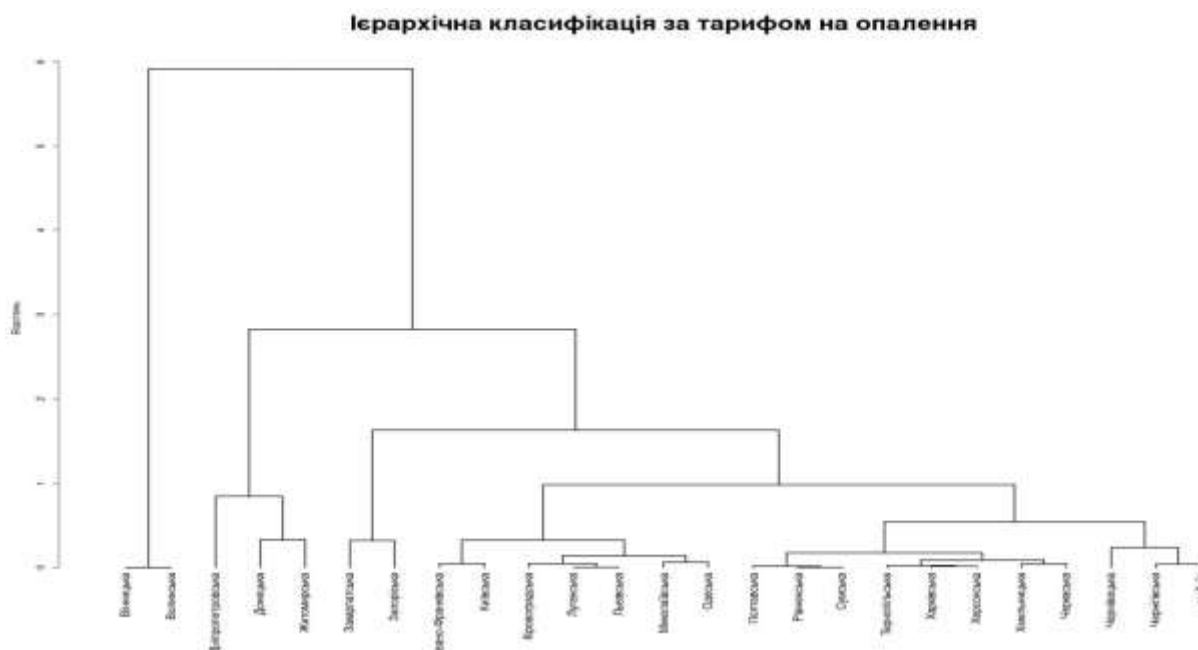


Рисунок 7 - Ієрархічна класифікація за тарифом на опалення

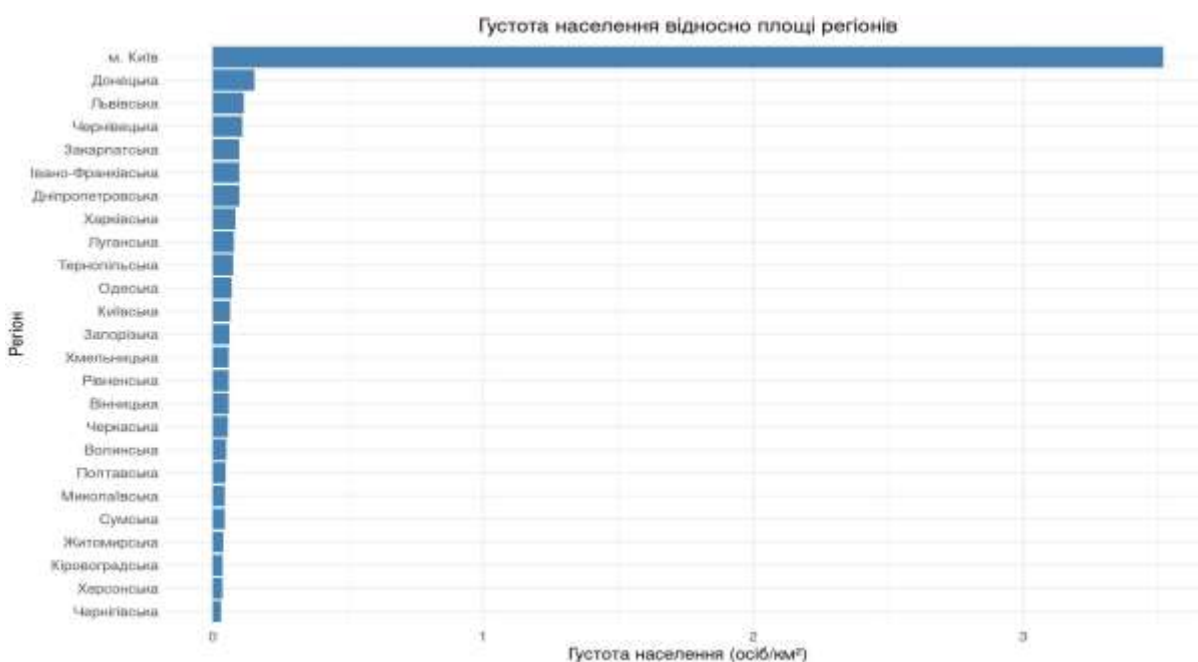


Рисунок 8 - Густина населення відносно площі регіонів

При аналізі густини населення регіонів України виявлено значні відмінності між регіонами. Наприклад, густанаселені регіони, такі як Київська та Донецька, мають вищу концентрацію населення на одиницю площі порівняно з менш густанаселеними регіонами, такими як Чернігівська та Житомирська області.

Візуалізація густини населення по регіонах дозволяє наочно побачити, як розподіляється населення по країні. Це може бути корисним для розробки політики регіонального розвитку, планування нових проектів інфраструктури та оптимізації розподілу ресурсів.

Таким чином, аналіз густини населення відносно площі регіонів є важливим інструментом для розуміння соціально-економічних умов та планування розвитку регіонів України. Співвідношення густини населення відносно площі регіонів наведено на рисунку 8.

Аналіз тарифів на опалення залежно від чисельності населення проводився з використанням регресійних моделей, які включали класифікацію регіонів. Це дозволило врахувати не лише чисельність населення, але й інші регіональні характеристики, які могли впливати на тарифи.

Для оцінки впливу чисельності населення та класифікаційної змінної (кластеру) на тарифи на опалення використовувалась наступна регресійна модель [1, 2, 10]:

$$T_i = \alpha + \beta \cdot N_i + \gamma \cdot C_i,$$

де: T_i – середньозважений тариф на опалення в регіоні i , N_i – чисельність населення в регіоні i , C_i – класифікаційна змінна (кластер) для регіону i , α – константа (вільний член), β – коефіцієнт регресії для чисельності населення, γ – коефіцієнт регресії для класифікаційної змінної.

Чисельність населення взята за даними станом на лютий 2022 року, а середньозважений тариф на опалення — від 25 червня 2024 року [16, 17].

Аналіз показав, що чисельність населення є значущим фактором, який впливає на тарифи на опалення. В регіонах з більшою чисельністю населення тарифи на опалення можуть бути нижчими завдяки економії на масштабі та ефективнішому використанню інфраструктури.

Додавання класифікаційної змінної до моделі дозволило врахувати регіональні відмінності, які не можна пояснити лише чисельністю населення. Регіони, згруповані в різні кластери, показали відмінності в тарифах на опалення, що свідчить про важливість врахування додаткових регіональних характеристик.

Результати моделювання можуть бути використані для прогнозування тарифів на опалення в різних регіонах на основі чисельності населення та кластерних характеристик. Це дозволяє планувати енергетичну політику та оцінювати вплив змін у чисельності населення на тарифи на опалення.

Для візуалізації результатів аналізу побудовано графік (рисунок 9), що показує тариф на опалення залежно від чисельності населення з класифікацією областей. На графіку видно різницю в тарифах для різних кластерів, що підтверджує значущість врахування регіональних особливостей.

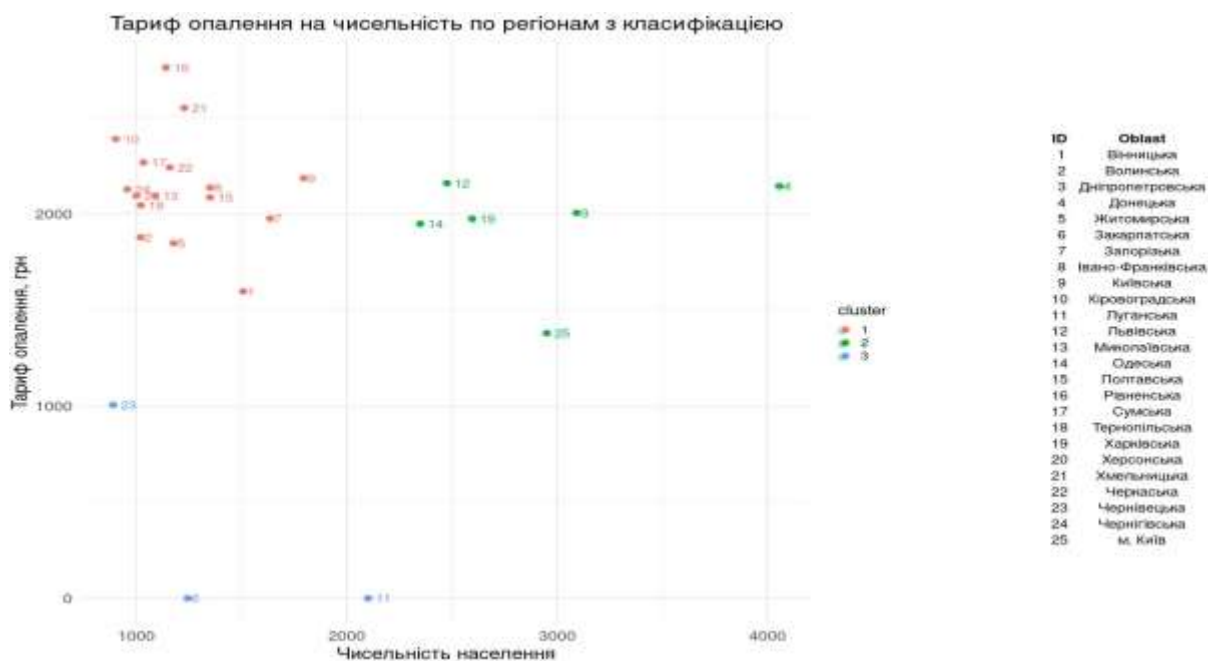


Рисунок 9 - Тариф опалення на чисельність населення по регіонам з класифікацією

Такий підхід до аналізу дозволяє глибше зрозуміти взаємозв'язок між соціально-економічними показниками та тарифами на енергетичні послуги, що є важливим для прийняття обґрунтованих рішень у сфері енергетики та комунальних послуг.

Висновки.

Аналіз впливу зовнішньої температури на питоме споживання газу теплогерел показав значний вплив цього фактору на енергетичні потреби. Зниження температури зовнішнього повітря призводить до збільшення теплових втрат будівель, що вимагає більших обсягів споживання газу для підтримання комфортних внутрішніх умов. Це підкреслює важливість врахування кліматичних умов при плануванні та управлінні енергоспоживанням.

Врахування тарифів на опалення, чисельності населення та інших регіональних особливостей є критично важливим для розробки стратегій підвищення ефективності використання газу. Висока варіабельність тарифів по регіонах України свідчить про неоднорідність економічного розвитку та інфраструктури, що вимагає індивідуального підходу до кожного регіону.

Кластерний аналіз методом k-середніх дозволив виявити групи регіонів з подібними характеристиками. Це допомагає розуміти, як різні соціально-економічні фактори впливають на тарифи та споживання газу. Класифікація на основі подібностей у характеристиках регіонів сприяє ефективнішому плануванню та оптимізації енергетичної політики.

Ієрархічна класифікація регіонів, проведена методом агломеративної кластеризації, надала додаткову інформацію про структурні зв'язки між регіонами. Цей метод дозволяє побудувати "дерево" схожостей між областями, що може бути використане для більш глибокого розуміння регіональних відмінностей і взаємозв'язків.

Практичні висновки дослідження включають: розробка адаптованих енергетичних стратегій: врахування регіональних особливостей дозволяє розробляти більш точні та ефективні стратегії управління енергоспоживанням; оптимізація тарифної політики: аналіз тарифів та їх взаємозв'язок з іншими показниками може сприяти формуванню справедливої тарифної політики; підвищення енергоефективності: виявлені залежності допомагають визначити ключові фактори, що впливають на енергоефективність, та розробити заходи для її підвищення; інвестиції в інфраструктуру: виявлені кластерні групи областей можуть бути використані для визначення пріоритетів інвестицій в енергетичну інфраструктуру; регіональні програми зниження споживання газу: на основі результатів дослідження можна розробляти регіональні програми, спрямовані на зниження споживання газу.

Загалом, дослідження підтвердило важливість комплексного підходу до управління енергоспоживанням, який враховує кліматичні, економічні та соціальні фактори, а також дозволяє знаходити оптимальні рішення для різних регіонів України.

Список використаної літератури

1. Іванов, О. О., Ковальчук, А. П. Вплив температурного режиму на споживання природного газу для опалення в різних регіонах. *Енергетика України*, 2020. – 145 с.
2. Смирнов, Д. М., Лебедев, І. В. Аналіз тарифів на централізоване опалення в країнах Європи. *Міжнародний енергетичний журнал*, 2019. – 120 с.
3. Петренко, Ю. В. Вплив чисельності населення на споживання газу: регіональний аспект. *Соціально-економічні дослідження в Україні*, 2021. – 110 с.
4. Сидоренко, М. С., Захарченко, В. І. Кластерний аналіз регіонів України за споживанням енергоресурсів. *Науковий вісник Національного університету "Києво-Могилянська академія"*, 2022. – 95 с.
5. Голубев, П. П., Романюк, О. Г. Ефективність використання конденсаційних котлів у теплогенерації. *Технічні науки: сучасні дослідження та інновації*, 2021. – 134 с.
6. Петров В.В. "Енергозбереження в будівлях: теорія та практика". – Київ: Наукова думка, 2018. – 210 с.
7. Іваненко О.М. "Теплопостачання та теплогенерація". – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 180 с.
8. Сидоренко П.П. "Моделювання теплових процесів у будівлях". – Львів: ЛНУ, 2020. – 160 с.
9. Державна служба статистики України. Показники чисельності населення по областях. – Статистичний звіт.
10. Міністерство енергетики України. Тарифи на централізоване опалення по областям. – Офіційний звіт.
11. Кравченко І.Г. "Енергетичний менеджмент: принципи та практика". – Одеса: ОНУ, 2021. – 200 с.
12. Литвиненко С.В. "Вплив кліматичних умов на споживання енергії". – Дніпро: ДНУ, 2017. – 175 с.
13. Науменко Т.А. "Економіка енергозбереження в житлово-комунальному господарстві". – Запоріжжя: ЗНУ, 2019. – 190 с.
14. Журнал "Енергетика та електрифікація". Щорічні випуски за 2018-2023 роки. – Періодичне видання.
15. Андрієнко М.В. "Стратегії розвитку систем централізованого теплопостачання". – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 140 с.
16. Середньозважені тарифи. *Держенергоефективності України*: веб-сайт. URL: <https://saee.gov.ua/uk/content/serednozvazheni-taryfy>. (дата звернення 27.06.2024)
17. Населення України. *Мінфін*: веб-сайт. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/reference/people/> (дата звернення: 27.06.2024)
18. Територія України. *Інформаційно-довідковий сайт «Україна»*: веб-сайт. URL: http://proukraine.net.ua/?page_id=20. (дата звернення 27.06.2024)

M. Sasko¹, Ph.D student, ORCID 0009-0008-9046-7259

V. Rozen¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-0440-4251

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL TEMPERATURE ON THE SPECIFIC GAS CONSUMPTION OF HEAT SOURCES

The article examines the impact of outdoor temperature on the specific consumption of gas from heat sources, taking into account tariffs for district heating in the regions of Ukraine. The study is aimed at identifying patterns between external climatic conditions and gas consumption for heating, which allows optimizing energy consumption and increasing the efficiency of energy use.

Data on district heating tariffs, population and area of Ukrainian regions were analyzed. The cluster analysis and hierarchical classification of regions were performed, which allowed us to identify groups with similar characteristics of gas consumption and heating tariffs. The ratio of population to area of regions and its impact on gas consumption and tariff policy is investigated.

Keywords: *specific gas consumption, external temperature, heat losses, heating tariffs, population size, population density, cluster analysis, hierarchical classification, regression analysis, energy efficiency, centralized heating.*

References

1. Ivanov, O.O., Kovalchuk, A.P. The influence of the temperature regime on the consumption of natural gas for heating in different regions. *Energy of Ukraine*, 2020. - 145 p.
2. Smirnov, D. M., Lebedev, I. V. Analysis of tariffs for centralized heating in European countries. *International Energy Journal*, 2019. – 120 p.
3. Petrenko, Yu. V. The influence of population on gas consumption: regional aspect. *Socio-economic research in Ukraine*, 2021. – 110 p.
4. Sydorenko, M. S., Zakharchenko, V. I. Cluster analysis of regions of Ukraine by energy consumption. *Scientific Bulletin of the National University "Kyiv-Mohyla Academy"*, 2022. – 95 p.
5. Golubev, P. P., Romanyuk, O. G. Effectiveness of using condensing boilers in heat generation. *Technical sciences: modern research and innovations*, 2021. - 134 p.
6. Petrov V.V. "Energy conservation in buildings: theory and practice". - Kyiv: Naukova dumka, 2018. - 210 p.
7. Ivanenko O.M. "Heat supply and heat generation". – Kharkiv: Khnure, 2019. – 180 p.
8. Sydorenko P.P. "Modeling of thermal processes in buildings". – Lviv: LNU, 2020. – 160 p.
9. State Statistics Service of Ukraine. *Population indicators by region*. - Statistical report.
10. Ministry of Energy of Ukraine. *Tariffs for centralized heating by region*. - Official report.
11. Kravchenko I.H. "Energy management: principles and practice". – Odesa: ONU, 2021.–200 p.
12. Lytvynenko S.V. "Influence of climatic conditions on energy consumption". - Dnipro: DNU, 2017. - 175 p.
13. Naumenko T.A. "Economics of energy saving in housing and communal economy". – Zaporizhzhia: ZNU, 2019. – 190 p.
14. "Energy and Electrification" magazine. Annual issues for 2018-2023. — Periodical.
15. Andrienko M.V. "Development strategies of centralized heat supply systems". – Vinnytsia: VNTU, 2020. – 140 p.
16. Weighted average tariffs [in Ukrainian]. *State Energy Efficiency of Ukraine* [in Ukrainian] [Online]. Available: <https://saee.gov.ua/uk/content/serednozvazheni-taryfy> Accessed on: June 27, 2024)
17. Population of Ukraine [in Ukrainian]. *Ministry of Finance* [in Ukrainian] [Online]. Available: <https://index.minfin.com.ua/ua/reference/people/> Accessed on: June 27, 2024)
18. Territory of Ukraine [in Ukrainian]. *Information and reference site Ukraine* [in Ukrainian] [Online]. Available: http://proukraine.net.ua/?page_id=20 Accessed on: June 27, 2024)

Надійшла: 26.08.2024

Received: 26.08.2024

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT.

УДК 622.276

DOI 10.20535/1813-5420.4.2024.315569

В. М. Сліденко¹, д-р. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-9313-331X
С.П. Шевчук¹, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-7517-0501
Л.К. Лістовщик¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-3413-1802
В. О. Бут¹, аспірант, ORCID 0009-0003-7024-1184
¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АДАПТИВНА ІМПУЛЬСНА СИСТЕМА ВПЛИВУ З ПОВЕРХНІ НА ПРИВИБІЙНУ ЗОНУ НАФТОВОЇ СВЕРДЛОВИНИ

В даній статті досліджено функціонування адаптивної імпульсної системи з електрогідравлічним приводом для впливу на привибійну зону нафтової свердловини з поверхні без зупинки видобутку вуглеводнів. Особливу увагу приділено визначенню структури та функцій електрогідравлічного приводу імпульсної системи та визначено раціональну зону спрацювання імпульсного генератора імпульсів з встановленням обмежень на його функціонування. В статті наведено математичну модель імпульсного процесу та функціонально-логістичну модель адаптації імпульсної системи до умов робочого середовища. Розглянуто варіант компоновки системи з встановленням імпульсного генератора імпульсів на насосному агрегаті для дії з поверхні на привибійну зону нафтової свердловини. Визначено раціональну довжину імпульсної камери та встановлено область функціонування адаптивної імпульсної системи з генерацією раціональних значень тиску гідроудару. Експериментально встановлено, що одним з напрямків застосування адаптивної імпульсної системи є можливість генерації частотного режиму з виникненням резонансних коливань тиску в привибійній зоні нафтової свердловини, що дозволить значно підвищити ефективність запропонованої системи.

В роботі наведені результати промислової апробації адаптивної імпульсної системи з електрогідравлічним керуванням попередньої модифікації за промислових умов України. Наведена характеристика пристроїв, які були застосовані в процесі промислової апробації.

Ключові слова: адаптація, електрогідравлічна система, генератор імпульсів, математична модель, імпульсія, прямий гідроудар, вуглеводні, нафтова свердловина.

Вступ

Підвищення дебіту нафтових свердловин є проблемою енергетичної незалежності не тільки в Україні, але й у всьому світі. Для підвищення дебіту використовуються різноманітні засоби, які сприяють очищенню фільтраційної зони свердловини, що призводить до збільшення притоку нафти в свердловину і, відповідно, до підвищення продуктивності видобутку вуглеводнів [1, 2]. Проведення робіт, які значимо впливають на збільшення продуктивності в більшості випадків здійснюється під час проведення поточних або капітальних ремонтів, які проводяться при тимчасовій повній зупинці видобутку вуглеводнів. Після проведення ремонтів значний час відводиться для запуску свердловини в експлуатацію. Проте вже в міжремонтному циклі зона перфорації знову кольматується, що призводить знову до зниження продуктивності видобутку та необхідності проведення нових ремонтних робіт [3].

Застосування генераторів імпульсів тиску для проведення ремонтних робіт проводиться з поверхні [4] або, в більшості випадків, при опусканні обладнання до рівня перфораційних отворів в обсадній колоні за допомогою колтюбінгових установок або підйомного агрегату [5].

Доведена ефективність пристроїв з генерацією імпульсів тиску на основі реалізації прямого гідроудару, імпульсії чи ефекту Юткіна в залежності від технологічних умов робочого середовища, але при проведенні ремонтних робіт. Тому розробка і застосування технологій, які проводять профілактичний вплив на перфораційну зону і пластову систему без зупинки видобутку вуглеводнів або з короткочасною

зупинкою, але без спуско-підйомних робіт, є актуальною проблемою. При цьому, актуальним є застосування адаптивних методів впливу на привибійну зону з урахуванням змінних статистичних характеристик технологічного процесу та пластової системи [6].

Мета та завдання

Метою дослідження є формування структури та розробка умов оптимізації технологічного процесу функціонування адаптивної імпульсної системи з застосуванням імпульсного генератора імпульсів, з розташуванням елементів системи на поверхні з дією на привибійну зону без зупинки видобутку вуглеводнів.

Завданнями є розробка умов оптимального функціонування адаптивної імпульсної системи з електрогідравлічним приводом системи керування, з визначенням співвідношення конструктивних та технологічних параметрів імпульсного генератора імпульсів, розробка структури системи з формуванням функціонально-логістичної моделі адаптації до умов робочого середовища.

Матеріал і результати досліджень

На рис. 1 наведена структурна схема адаптивної імпульсної системи (АІС) з автономним гідравлічним приводом та імпульзійним генератором імпульсів тиску.

АІС (рис.1) включає імпульзійний генератор імпульсів (ІГІ) та автономний електрогідравлічний привод, в якому шестерневий насос (НШ) з електроприводом подає робочу рідину з бака (Б1) на електрогідравлічний розподільвач (ЕГР), що керується програмованим логічним контролером (ПЛК) за показаннями датчиків тиску (ДТ1), (ДТ2). Датчики тиску контролюють поточний тиск в затрубному просторі (затруб'ї) свердловини при роботі насосного агрегату та при генерації імпульсу тиску ІГІ. Для підтримання, необхідного для роботи АІС, тиску в затруб'ї доцільне застосування насосного агрегату, наприклад, ЦА-320, який захищений від дії імпульсів регульованим дроселем (Др). При досягненні тиску в затруб'ї заданої величини, за подачею насосного агрегату, який реєструється датчиками тиску (ДТ1) та (ДТ2) (в цьому випадку показання датчиків практично співпадають) і передаються в ПЛК, який спрямовує керуючий сигнал через підсилювач на електрогідравлічний розподільвач (ЕГР), який керує клапаном ІГІ, що прискорено відкриває приток рідини під тиском з свердловини в імпульзійну камеру (К1), яка розташована в ємності (Б2), наприклад, баку насосного агрегату. При цьому генерується імпульзійний потік, з наступним перекриттям потоку рідини на відстані L_k , що створює прямий гідроудар з генерацією хвилі репресії через затруб колоні обсадних труб в зону перфорації. При цьому датчик тиску ДТ2 реєструє підвищений тиск гідроудару, а датчик тиску ДТ1 реєструє тиск, створений насосним агрегатом, оскільки і він і насосний агрегат захищений регульованим дроселем Др від гідроудару.

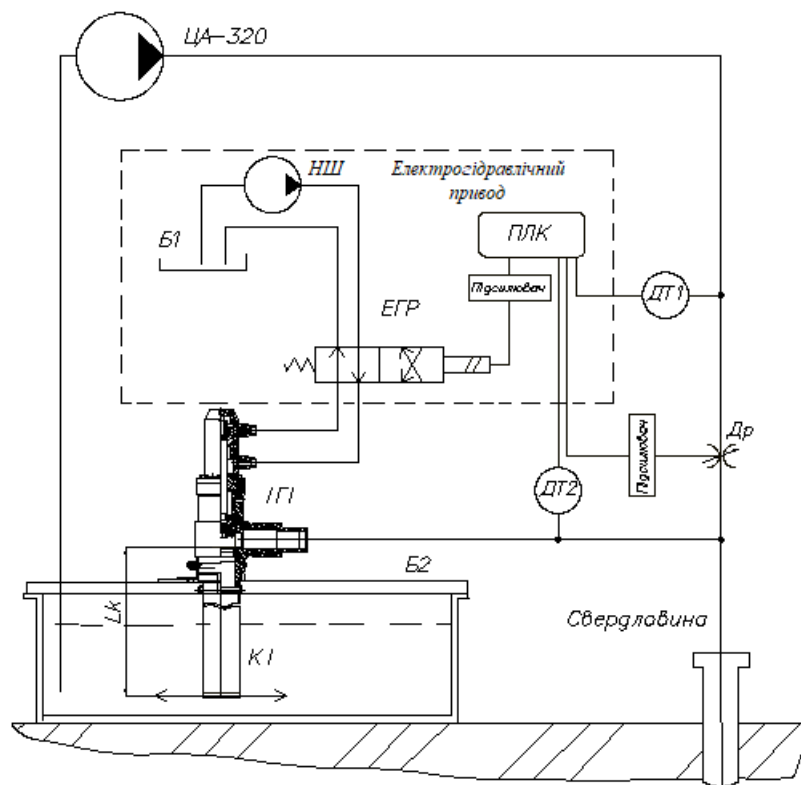


Рисунок 1 – Структурна схема адаптивної імпульсної системи

Тиск прямого гідроудару при імпульсному процесі в залежності від довжини $x=0...L_k$ імпульсної камери (КІ) та тиску p_0 в затруб'ї, від дії насосного агрегату, визначається залежністю з урахуванням формули Жуковського [2] :

$$p(x, p_0) = \rho \cdot c \cdot \varphi \sqrt{\frac{2p_0 d}{\rho \cdot \lambda \cdot x} \left[1 - \exp\left(-\frac{\lambda (x-l_0)}{d}\right) \right]} \quad (1)$$

Для визначення конструктивного параметру L_k – раціональної довжини імпульсної камери (КІ) розглянемо усереднені параметри процесу функціонування АІС: φ – коефіцієнт швидкості, прийнятий для даної конструкції $\varphi=0,71$; p_0 – тиск в свердловині, $p_0 = 5$ МПа; ρ – густина рідини, $\rho = 1000$ кг/м³; d – внутрішній діаметр імпульсної камери, $d=0,059$ м; λ – коефіцієнт гідравлічного опору тертя, $\lambda = 0,02$; x – довжина імпульсної камери, приймається $x=0, \dots, 1,3$ м; l_0 – розмір, який характеризує втрати довжини імпульсної камери через розташування механізму різкого перекриття, $l_0 = 0,07$ м; c – швидкість звуку в рідині, $c=1400$ м/с. .

Для визначення раціональної довжини камери, розглянемо залежність за умови постійного значення $p_0=5,5$ МПа. На рис. 2 наведена залежність за зазначених умов.

Як випливає з графіка рис.2 раціональний діапазон довжини імпульсної зони лежить в межах від $L_{kmin} = 0,2$ м до $L_{kmax} = 1,3$ м, що дозволило встановити дослідний зразок ІГІ безпосередньо над баком насосного агрегату ЦА-320 (рис.3) і провести випробування за виробничих умов [4].

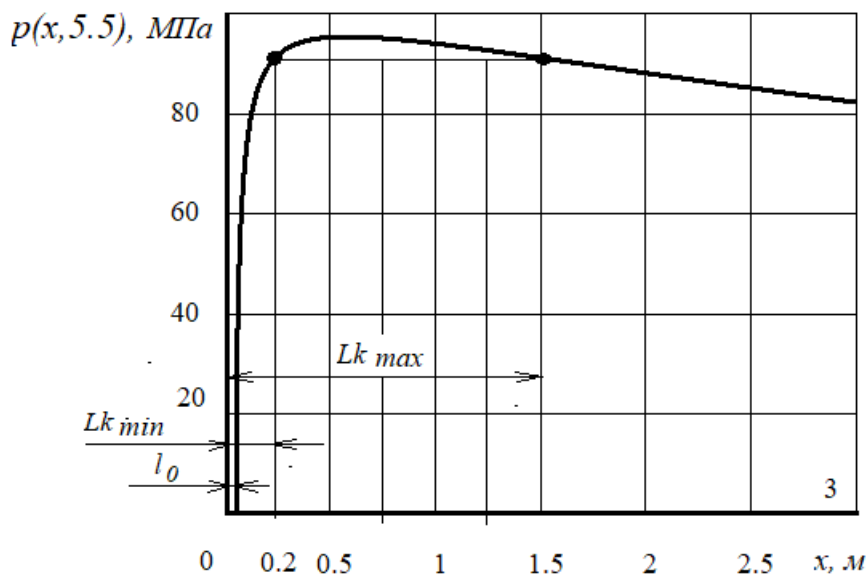


Рисунок 2 – Графік залежності тиску гідроудару на поверхневій частині свердловини від довжини L_k імпульсної камери КІ (рис.1)



Рисунок 3 – Установка дослідного зразка ІГІ над баком робочої рідини насосного агрегату ЦА-320: 1 – ІГІ, 2 – бак насосного агрегату; 3 – насосна установка

На рис. 4 наведений графік з визначенням раціональної області Ω функціонування адаптивної імпульсної системи за умови зміни довжини імпульсної камери в межах 0,2...0,4 м та тиску p_0 в межах 0...10 МПа за залежністю (1).

Для реалізації адаптивного керування системою слід враховувати два основних впливових чинники: глибину свердловини та спроможність пластової системи поглинати енергію імпульсів. В останньому випадку таке поглинання енергії сприяє підвищенню проникливості пластової системи, а отже - підвищенню продуктивності видобутку вуглеводнів.

Реалізація адаптивних функцій здійснюється підсистемами корекції: енергорозподілу, подачі рідини від насосного агрегату з тиском p_0 та продуктивністю Q ; амплітуди та частоти імпульсу тиску відбитого від вибою свердловини, який реєструється датчиком ДТ2. Метою адаптивного керування є забезпечення такої оптимальної дії ІГІ на нафтовий пласт, при якому реалізується максимальна передача енергії пластовій системі при мінімальних витратах енергетичних ресурсів насосної установки.

Досягнення мети керування адаптивними методами [7] відображається за допомогою функціонально-логістичної моделі, яка реалізується через мінімізацією функціонала Q при заданих обмеженнях

$$Q = \int_{t_0}^{t_k} q[t, u(t), \omega(t), \vec{v}(t), \vec{r}(t)] \cdot dt, \quad (2)$$

де $u(t)$ – сигнал керування, що подавався на електрогідорозподілювач (ЕГР); $\omega(t)$ – динамічні впливи, що вносять збурення; $\vec{v}(t)$ – вектор вихідних сигналів об'єкта, які характеризують стан свердловини та характеристику міцності обсадної колони; $\vec{r}(t)$ – бажане значення виходу: тиск p_0 та час спрацювання ІГІ; $q[t, u(t), \omega(t), \vec{v}(t), \vec{r}(t)]$ – задана додатна функція адаптивної корекції; t_0 і t_k – моменти початку й кінця функціонування системи адаптації відповідно.

Алгоритм керування АІС повинен забезпечити оптимум

$$u_{opt}(t) = \arg \min_{u \in \Omega} \tilde{Q}[u/I(t)], \quad (3)$$

де Ω – задана область допустимих значень тиску гідродару, що служать сигналом для керування системою; $I(t)$ – наявна в теперішній момент часу апостеріорна інформація про функціонування об'єкта в проміжку часу (t_0, t_k) .

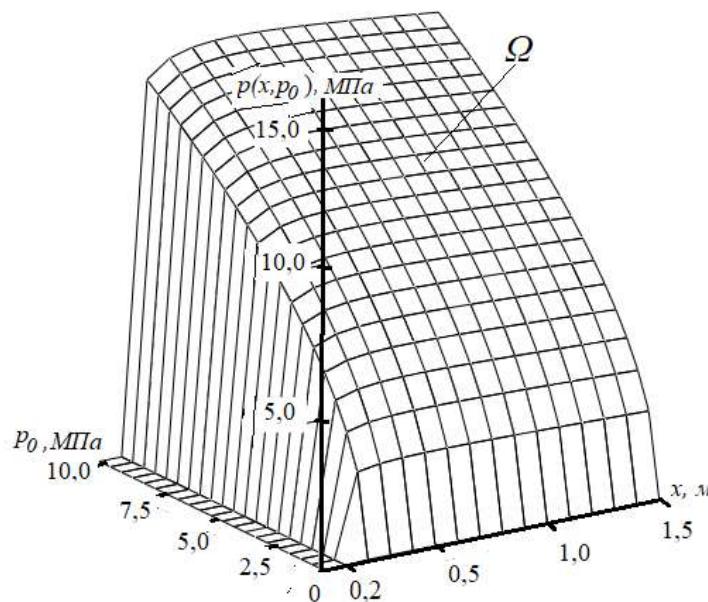


Рисунок 4 – Графік залежності тиску гідродару на поверхневій частині свердловини від довжини L_k та тиску p_0 з формуванням області Ω допустимих значень тиску гідродару

Апостеріорна інформація про функціонування об'єкта в проміжку часу (t_0, t_k) базується на проведенні попередніх пошукових досліджень та промислового застосування дослідного зразка з генерацією ІГІ пробних імпульсів невеликої амплітуди для вивчення динамічних можливостей свердловини з визначенням часу t_p реакції свердловини на дію імпульсу тиску та декремента затухання $\Delta = p_{i0}/p_{i1}$. Для

конкретного випадку досліджень [4] встановлено $t_p = 4,5$ с, $\Delta \approx 1,4$ за осцилограмою (рис. 5). Основні апаратні компоненти дослідного зразка АІС наведені на рис. 6.

Результати моделювання такої системи адаптації показують, що система працездатна для широкого класу моделей об'єктів впливу на привибійну зону нафтової свердловини.

У розглянутому методі структура функціоналу (3) функціонально-логістичної моделі будується відповідно до мети керування - поліпшення показників взаємодії ІГІ з нафтовим пластом, підвищення значення коефіцієнту передачі ударного імпульсу та, в результаті, підвищення видобутку вуглеводнів.

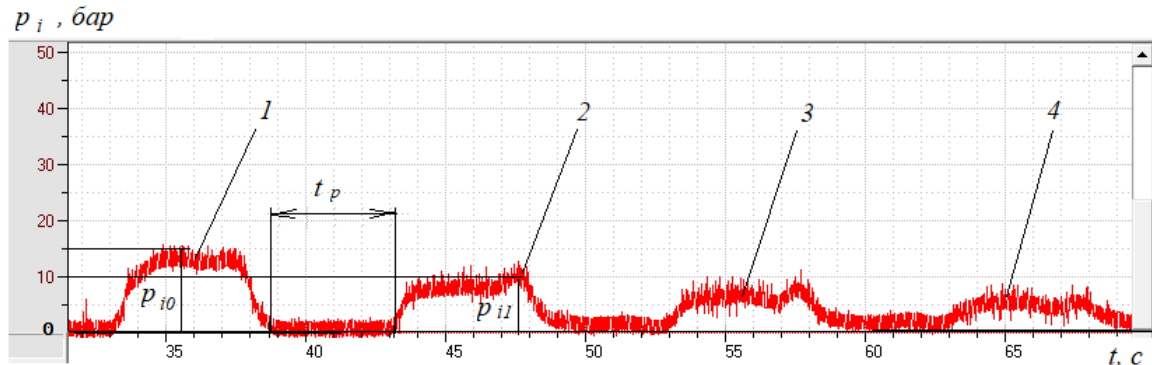


Рисунок 5 – Фрагмент осцилограми дії одиночного імпульсу ІГІ з реєстрацією відбитих хвиль: 1 – хвиля прямого імпульсу ІГІ; 2, 3, 4 – відбиті від вибою свердловини затухаючі хвилі тиску; t_p – час реєстрації відбитої від вибою хвилі тиску, p_{i0} – максимальна амплітуда початкової хвилі від прямого імпульсу, p_{i1} – максимальна амплітуда першої відбитої хвилі

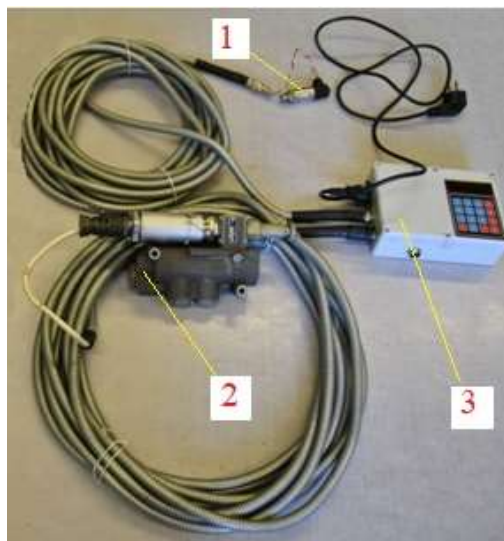


Рисунок 6 – Основні компоненти дослідного зразка АІС : 1 – електрогідророзподільвач, 2 – ПЛК, 3 – датчик тиску

Одним з ефективних напрямків застосування АІС є можливість генерація ІГІ наступного імпульсу в момент приходу від вибою і зворотного відбиття попереднього імпульсу. В цьому випадку можливе виникнення процесу резонансної дії на привибійну зону, що дозволить значно підвищити ефективність застосування АІС.

В запропонованій технології з використанням АІС передбачено використання дозволених хімічних реагентів (розріджувачів, кислот, ПАВ та інших), але в значно менших об'ємах ніж при традиційній хіміко-технологічній обробці привибійної зони, що є економічно більш вигідним варіантом.

Проведена промислова апробація елементів адаптивної імпульсної системи попередньої модифікації за умов сервісних компаній «Укркарпатоїл Лтд» (Україна, США, технологія «Імпульс»), «Азгард» (Україна), «Plato» (Індонезія, технологія «Pulse Jet») на протязі 2000 – 2013 років підтверджує ефективність технології для свердловин глибиною до 3500 м з проникливістю колекторів не менше 10 мД, густиною флюїдів 600...900 кг/м³, в'язкістю 1...5 мПа. В результаті обробки добувних малодобітних нафтових свердловин безпосередньо з поверхні на протязі восьми годин (через затрубний простір або колону насосно-компресорних труб) досягалось підвищення продуктивності видобутку в межах 20...30%.

Висновок.

1. Розроблена математична модель імпульсного процесу, за допомогою якої встановлено раціональний діапазон довжини імпульсної камери в межах 0,2 м до 1,3 м, що дозволило встановити дослідний зразок ПІ безпосередньо над баком насосного агрегату ЦА-320 і провести промислові випробування. Визначено раціональну область функціонування адаптивної імпульсної системи за умови зміни довжини імпульсної камери в межах 0,2...0,4 м та тиску в межах 0...10 МПа.

2. Для реалізації адаптивного керування системою слід враховувати два основних впливових чинники: глибину свердловини та спроможність пластової системи поглинати енергію імпульсів. В останньому випадку таке поглинання енергії сприяє підвищенню проникливості пластової системи, а отже - підвищенню продуктивності видобутку вуглеводнів.

3. Розроблено функціонально-логістична модель, за якої реалізація адаптивних функцій здійснюється підсистемами корекції: енергорозподілу, подачі рідини з тиском від насосного агрегату; амплітудою та частотою імпульсу тиску відбитого від вибою свердловини з забезпеченням такої оптимальної дії на нафтовий пласт, при якому реалізується максимальна передача енергії пластовій системі при мінімальних витратах енергетичних ресурсів насосної установки.

4. Апостеріорна інформація про функціонування об'єкта в заданому проміжку часу базується на проведенні попередніх пошукових досліджень та промислового застосування дослідного зразка з генерацією пробних імпульсів невеликої амплітуди, що дозволило встановити динамічні можливості та реакцію свердловини на дію імпульсу тиску: час хвильового руху прямого та відбитого імпульсів тиску, а також декремент затухання. Для конкретного випадку досліджень встановлено час руху в межах 4,5 с, а декремент затухань близько 1,4.

5. Одним з ефективних напрямків застосування адаптивної імпульсної системи є можливість генерації наступного імпульсу в момент приходу від вибою і зворотного відбиття попереднього імпульсу. В цьому випадку можливе виникнення процесу резонансної дії на привибійну зону, що дозволить значно підвищити ефективність застосування АІС.

6. В запропонованій технології з використанням АІС передбачено використання дозволених хімічних реагентів (розріджувачів, кислот, ПАВ та інших), але в значно менших об'ємах ніж при традиційній хіміко-технологічній обробці привибійної зони, що є економічно більш вигідним варіантом.

7. Дослідженнями встановлена ефективність промислової апробації функціонування адаптивної імпульсної системи, попередньої модифікації, в комплексі з насосним агрегатом, що розташовані на поверхні, для очищення привибійної зони від кольматантів та знеміцнення колектору пластової системи, що дозволяє, без зупинки процесу поточного видобутку нафти, підвищити продуктивність малодебітних свердловин на 20-30% .

Список використаної літератури

1. Світлицький В.М. Поточний та капітальний ремонт свердловин/ В.М. Світлицький, С.І. Ягодівський, Г.Р. Галустян. К.: Логос, 2001. 344с.

2. E. Nesvold and R. V. Bratvold, "Debiasing probabilistic oil production forecasts," Energy, vol. 258, p. 124744, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124744>.

3. Катеринчук П.О. Освоєння, інтенсифікація та ремонт свердловин/ П.О. Катеринчук, Д.В. Римчук, С.В. Цибулько, О.Л. Шудрик – Х.: Пром-Арт, 2018. – 608 с.

4. Сліденко В.М., Лістовщик Л.К., Бут В.О. Адаптивна мехатронна система імпульсно-хвильової дії на гірський масив //Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XVI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів (м. Кременчук 12–13 квітня 2018 р.) Кременчук, КрНУ, 2018. С. 27-28.

5. Інструкція застосування установки з гнучкими трубами для виконання підземного ремонту і інтенсифікації роботи свердловин. СТП 320–30019775.002-2004 [Чинний від 15.01.2004] ДК «Укргазвидобування», 2004. – 234 с.

6. Сліденко В.М. Статистична оцінка ефективності імпульсного генератора для активізації видобутку вуглеводнів/ В.М. Сліденко, Л.Р. Марчук// Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 3/2023 (140). С. 132-148 DOI <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.3.15>

7. Сліденко В.М., Шевчук С.П., Замараєва О.В., Лістовщик Л.К. Адаптивне функціонування імпульсних виконавчих органів гірничих машин: монографія. Київ: НТУУ "КПІ", 2013. 180 с .

V. Slidenko¹, Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-9313-331X

S. Shevchuk¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-7517-0501

L. Listovshchik¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-3413-1802

V. But¹, Ph.D. student, ORCID 0009-0003-7024-1184

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ADAPTIVE IMPULSE SYSTEM OF IMPACT FROM THE SURFACE ON THE NEAR-PRODUCTION ZONE OF THE OIL WELL

This article examines the functioning of an adaptive impulse system with an electro-hydraulic drive for influencing the near-bore zone of an oil well from the surface without stopping hydrocarbon production. Particular attention was paid to the definition of the structure and functions of the electrohydraulic drive of the pulse system, and the rational zone of operation of the implosion pulse generator was determined with the establishment of restrictions on its operation. The article presents a mathematical model of the implosive impulse process and a functional-logistic model of adaptation of the impulse system to the conditions of the working environment. The variant of the system layout with the installation of an implosion pulse generator on the pump unit for action from the surface on the near-breakout zone of the oil well was considered. The rational length of the implosion chamber was determined and the area of operation of the adaptive pulse system with the generation of rational values of water hammer pressure was established.

The paper presents the results of the industrial approval of the adaptive impulse system with electrohydraulic control of the previous modification under the industrial conditions of Ukraine. The characteristics of the devices that were used in the process of industrial approval are given.

Keywords: adaptation, electrohydraulic system, pulse generator, mathematical model, implosion, direct hydraulic shock, hydrocarbons, oil well.

References

1. Svitlytskyi V.M. Current and major repair of wells/ V.M. Svitlytskyi, S.I. Yagodovskyi, H.R. Galustyan K.: Logos, 2001. 344p.
2. E. Nesvold and R. B. Bratvold, "Debiasing probabilistic oil production forecasts," *Energy*, vol. 258, p. 124744, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124744>.
3. Katerynchuk P.O. Development, intensification and repair of wells/ P.O. Katerynchuk, D.V. Rymchuk, S.V. Tsibulko, O.L. Shudrik - Kh.: Prom-Art, 2018. - 608 p.
4. Slidenko V.M., Listovshchik L.K., But V.O. Adaptive mechatronic system of pulse-wave action on a mountain massif // *Electromechanical and energy systems. Methods of modeling and optimization. Collection of scientific papers of the 16th International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists (Kremenchuk, April 12–13, 2018) Kremenchuk, KrNU, 2018. C. 27-28.*
5. Instructions for using the installation with flexible pipes for underground repair and intensification of wells. STP 320–30019775.002-2004 [Effective from 15.01.2004] DK "Ukrgezvydobuvannya", 2004. - 234 p.
6. Slidenko V.M. Statistical assessment of the effectiveness of the implosion generator for the activation of hydrocarbon production/ V.M. Slidenko, L.R. Marchuk// *Mykhailo Ostrogradskyi KrNU Bulletin. Issue 3/2023 (140). C. 132-148 DOI <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.3.15>*
7. Slidenko V.M., Shevchuk S.P., Zamaraeva O.V., Listovshchik L.K. Adaptive functioning of impulse executive bodies of mining machines: monograph. Kyiv: NTUU "KPI", 2013. 180 p.

Надійшла: 10.09.2024

Received: 10.09.2024

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕНЕРГОКОМПАНІЙ ОПТИМАЛЬНИМ РОЗПОДІЛОМ ВИТРАТ НА ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТ ОБЛАДНАННЯ

Наразі існує висока імовірність виникнення аварійних ситуацій в електроенергетичній системі (ЕЕС) внаслідок відмов електрообладнання викликаних перш за все об'єктивно існуючим старінням і значним вичерпанням його ресурсу працездатності. Аварійні ситуації, що виникають при відмовах електрообладнання, призводять до порушення динамічної стійкості енергосистем та вузлів навантаження ЕЕС за напругою, каскадному розвитку аварій і, як наслідок, до порушення технологічних процесів підприємств-споживачів, що супроводжуються значними збитками. Одним із шляхів запобігання раптовим відмовам або максимального зниження ризику їх виникнення є забезпечення раціонального і ефективного управління функціонуванням та зниження витрат на експлуатацію обладнання без ризику зниження надійності ЕЕС.

Для вирішення задач оптимального розподілу експлуатаційних витрат енергокомпанії з урахуванням об'єктивно існуючих обмежуючих факторів запропонована узагальнена балансова модель рознесення витрат по групам і одиницям електрообладнання, яка є функцією сумарних витрат від низки експлуатаційних факторів.

Отримано математичні моделі для розрахунку коефіцієнтів дольової участі електрообладнання в формуванні витрат на його ремонт і експлуатацію за кожним з виділених факторів. Запропонована лінгвістична математична модель для визначення узагальнених оцінок ступеню значущості одиниць і груп електрообладнання у формуванні розподілу ремонтно-експлуатаційних витрат з урахуванням основних експлуатаційних факторів.

Розроблено алгоритм і програмне забезпечення моделювання режимів електроенергетичної системи зі схемою електричних з'єднань електричних мереж напругою 35–330кВ для оцінки індексу ризику функціонування і розподілу ремонтно-експлуатаційних витрат енергокомпанії. Виконано розрахунковий розподіл ремонтно-експлуатаційних витрат енергокомпанії за поточними технічними характеристиками обладнання і режимів підсистеми ЕЕС.

Ключові слова: технічне обслуговування, ремонт, виробничі фонди, енергосистема, електрообладнання, нечітка логіка, ресурс, ризик, відмова, технічний стан, діагностика.

Вступ.

Сучасні електроенергетичні системи за своїм складом і зв'язками, процесам і способам керування належать до категорії складних багаторівневих ієрархічних систем для яких все більшу актуальність набувають питання раціональної організації експлуатації і ефективного управління функціонуванням [1,2]. Технічне обслуговування і ремонт обладнання (ТО і Р) енергосистем являє собою один з основних інструментів в забезпеченні їх тривалості і надійної експлуатації [2-4]. В зв'язку з цим особлива увага приділяється стратегіям ТО і Р електрообладнання, призначеним для забезпечення зниження витрат на експлуатацію без ризику зниження надійності [5]. Однією з найбільш визнаних стратегій ТО і Р є стратегія профілактичного обслуговування. У відповідності з даною стратегією запобігання аварійних відмов електрообладнання (ЕО) досягається шляхом проведення превентивних профілактичних заходів, направлених на усунення небезпечних пошкоджень (дефектів) і підтримання працездатного стану [5,6].

На сьогоднішній день відомі декілька модифікацій стратегій профілактичного обслуговування, які використовуються в світовій практиці або знаходяться в стадії розвитку [5-7,10,11]: стратегія планово-попереджувальних ремонтів (ППР) (Time Based Maintenance - TBM); стратегія експлуатації до відмови (Run to Fail – RTF); стратегія обслуговування за обґрунтованою надійністю (Reliability Centered Maintenance - RCM); стратегія обслуговування на підставі оцінки ризиків (Risk Based Maintenance – RBM); стратегія повної заміни або відновлення обладнання за фактичною відмовою; оптимальне попереджувальне обслуговування (Prevention Maintenance Optimization - PREMO). Між тим незалежно від прийнятої стратегії профілактичного обслуговування останнім часом в промислово розвинених країнах широко використовується стратегія «ризик-менеджменту» для отримання комплексної оцінки стану електроенергетичної системи та прийняття ефективних рішень щодо стратегії експлуатації підсистеми на основі аналізу причинно-наслідкових зв'язків між рівнем ТС зношеного електрообладнання та порушеннями нормального режиму системи [7-10]. Планування ТО і Р обладнання енергосистем згідно з

даною стратегією забезпечує мінімізацію сумарних експлуатаційних витрат енергокомпаній. з урахуванням економічних, технічних та експлуатаційних обмежень.

На сьогоднішній день не існує єдиного методичного підходу щодо розподілу ремонтно-експлуатаційних витрат енергокомпанії з урахуванням усіх найбільш важливих експлуатаційних факторів. Це не дозволяє визначити ефективність прийнятої стратегії управління експлуатацією обладнання та розробити способи її корегування.

Наразі існує низка робіт, присвячених питанням оцінки технічного стану, визначення імовірності відмови силового і комутаційного обладнання, аналізу ризику виникнення аварійних ситуацій в енергосистемі та розподілу ремонтно-експлуатаційних витрат енергокомпаній [1,3, 7,8,11].

В [6,11] наведено результати моделювання і оцінки технічного стану та імовірності відмови електрообладнання ЕЕС, але не визначаються кількісні показники режимної надійності при відмовах обладнання, зокрема збитки від порушення електропостачання споживачів.

Існуючі стратегії ТО і Р, котрі використовуються в світовій практиці, або знаходяться на стадії розвитку детально описані в [5,7,11], але більшість з них не враховують рівень значущості електрообладнання з точки зору пріоритету виводу в ремонт і впливу на режим енергосистеми.

Питання застосування стратегії «ризик-менеджменту» для отримання агрегованої оцінки стану підсистеми ЕЕС та прийняття ефективних рішень щодо експлуатації підсистеми на основі аналізу причинно-наслідкових зв'язків між рівнем ТС зношеного ЕО та аварійними порушеннями режиму підсистеми ЕЕС розглянуто в [5,7], але розглядається в основному економічна складова ризику.

Застосування комплексного підходу до управління експлуатацією електрообладнання підсистем ЕЕС з оптимізацією сумарних експлуатаційних затрат енергокомпаній наведено в [7-10], але не враховано невизначеність інформації щодо параметрів технічного стану обладнання та обмеженість річних ремонтно-експлуатаційних витрат на ТО і Р.

В зв'язку з цим, розробка методики (комплексної математичної моделі) (оптимального) розподілу річного виділеного енергокомпанією ремонтно-експлуатаційного фонду для задач управління експлуатацією ЕЕС з урахуванням найбільш важливих факторів впливу на кількісні характеристики витрат на технічне обслуговування і ремонт на основі оцінки технічного стану обладнання та визначення індексу ризику системи при аварійних відмовах електрообладнання є актуальною задачею.

Мета та завдання досліджень.

Метою роботи є розробка методики і математичної моделі розподілу річного виділеного енергокомпанією ремонтно-експлуатаційного фонду для задач управління експлуатацією обладнанням електроенергетичної системи.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі: побудувати узагальнену модель балансову модель рознесення витрат по групам і одиницям електрообладнання; визначити фактори впливу та отримати моделі для розрахунку коефіцієнтів часткової участі електрообладнання в формуванні витрат на його ремонт і експлуатацію по кожному з виділених факторів; розробити лінгвістичну математичну модель і алгоритм агрегованої оцінки ступеню важливості електрообладнання в частині розподілу витрат на технічне обслуговування і ремонт; з використанням розробленого математичного і програмного забезпечення виконати розрахунковий розподіл ремонтно-експлуатаційних витрат енергокомпанії за поточними технічними характеристиками обладнання;

Матеріал і результати досліджень. Для вирішення задач з використанням даних підходів, зокрема, формування кількісних характеристик витрат енергокомпанії розглянемо балансову модель у вигляді деякої функції сумарних витрат від низки експлуатаційних факторів

$$F_{i,j} = 1, N^F, \text{ де } N^F - \text{число факторів.}$$

Узагальнена балансова модель рознесення витрат по групам і одиницям електрообладнання.

Сумарні експлуатаційно-ремонтні витрати по j-й групі електрообладнання енергокомпанії в залежності від заданих факторів визначаються:

$$B_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{N^g} B_j^g, \quad B_j^g = B_{\Sigma} \cdot \sum_{i=1}^{N^F} r_i K_{ji}^g(F_i),$$

де N^g - кількість груп електрообладнання; B_{Σ}, B_j^g - сумарні витрати і витрати по j-й групі

електрообладнання енергокомпанії; r_i - значущість (важливість) i-го фактора; $F_i, K_{ji}^g(F_i)$ - нормований

коефіцієнт частинної участі електрообладнання в формуванні витрат на підтримання його в працездатному стані для j -ї групи обладнання, за i -м фактором, який визначається:

$$K_j^g(F_j) = \sum_{k=1}^{L_j} K_{jk}^g(F_i),$$

де K_{jk}^g - нормований коефіцієнт частинної участі обладнання в формуванні витрат на підтримку його в працездатному стані для j -ї групи, k -ї одиниці обладнання; L_j - кількість об'єктів в j -й групі. При цьому виконується умова:

$$\sum_{i=1}^{N^F} r_i = 1; \quad \sum_{j=1}^{N^g} K_j^g(F_i) = 1$$

Фактори впливу, що відтворюють переваги для прийняття управлінських рішень для прийнятої в енергокомпанії стратегії експлуатації обладнання.

В якості факторів впливу можна розглядати деякі технічні характеристики обладнання, режимні параметри ЕЕС і оцінки їх значущості. Зазвичай факторизначаються експертним шляхом і відображають критерії переваги для прийняття управлінських рішень в рамках прийнятої стратегії експлуатації [2,7,8,10].

З використанням результатів експертних оцінок експлуатаційного персоналу, який має досвід експлуатації електрообладнання, підстанцій і повітряних ліній та ведення режимів НЕК «Укренерго», ДТЕК «Київські електромережі» інших і інших енергокомпаній були встановлені найбільш значущі важливі фактори впливу на кількісні характеристики витрат на технічне обслуговування і ремонт:

- об'єм виробничих фондів обладнання в грошовому еквіваленті V , який характеризує об'єкт з точки зору трудомісткості і складності експлуатації;

- рівень завантаження об'єкта W електроенергією. Даний фактор характеризує затребуваність об'єкта в процесі передачі і розподілу електроенергії по електричним мережам за розрахунковий рік, а також опосередковано визначає рівень спрацювання ресурсу працездатності електрообладнання;

- рівень аварійності електрообладнання традиційно визначається інтенсивністю відмов (питома пошкоджуваність, лямпа (1/рік), частота потоку відмов, омега (1/рік)), імовірністю відмови об'єкта на інтервалі часу спостереження Δp_{ij} , коефіцієнтом вимушеного простою β_{en} і інш. [12,13].

- індекс ризику функціонування ЕЕС при аварійних відмовах конкретної одиниці електрообладнання і повітряних ліній або групи одиниць електрообладнання підстанції.

Для прийняття рішень щодо оптимального розподілу коштів на ТО і Р електрообладнання необхідна кількісна оцінка ступеню значущості електрообладнання у формуванні витрат з урахуванням найбільш важливих експлуатаційних факторів.

Розрахунок коефіцієнтів дольової участі за кожним з виділених факторів.

Розрахунок коефіцієнтів, які кількісно визначають ступінь значущості електрообладнання електрообладнання в формуванні витрат на його ремонт і експлуатацію, виконується в за такими співвідношеннями [1,6,8,10]:

1. Коефіцієнт розподілу за об'ємом(вартістю) виробничих фондів для одиниць і груп обладнання

$$\beta_{\phi i, j} = \frac{V_{ij}^g}{\sum_{j=1}^{N^g} V_j^g}, \quad \beta_{\phi j}^g = \frac{V_j^g}{\sum_{j=1}^{N^g} V_j^g}$$

де $V_{ij}^g, V_j^g, \sum_{j=1}^{N^g} V_j^g$ - об'єм виробничих фондів по i -й одиниці обладнання, j -й групі обладнання і

по всім енергооб'єктам енергокомпанії в цілому; N^g - кількість груп обладнання.

2. Коефіцієнт розподілу за рівнем завантаження (пропуску енергії за розрахунковий рік) для одиниць і груп обладнання

$$\beta_{3i,j} = \frac{W_{i,j}^g}{N^g}, \quad \beta_{3,j}^g = \frac{W_j^g}{N^g} = \frac{\sum_{i=1}^{L_j} W_{i,j}^g}{N^g} = \sum_{i=1}^{L_j} \beta_{3i,j}^g$$

де $W_{i,j}^g, W_j^g, \sum_{j=1}^{N_g} W_j^g$ - завантаження електроенергією i -ї одиниці, j -ї групи електрообладнання та

вцілому по всіх об'єктах енергокомпанії відповідно.

3. Коефіцієнт розподілу за аварійністю для окремих одиниць і груп електрообладнання, зокрема, коефіцієнт вимушеного простою β_{en} , який дає можливість опосередковано врахувати якість ремонтно-експлуатаційного обслуговування [12,13].

Для визначення відповідного коефіцієнта розподілу використаємо коефіцієнт вимушеного простою $\beta_{en} = \lambda \cdot T_B$, де T_B - середній термін відновлення одиниці обладнання. За статистикою відмов обладнання і значенням терміну відновлення визначаються коефіцієнти вимушеного простою β_{enk} k -го об'єкта і з них вибирають максимальний $\beta_{enk \max}$. Розраховують відношення $C_{ij} = \beta_{enij} / \beta_{en \max}$, причому для найбільш непрацездатного елемента мережі дане відношення дорівнює одиниці. Коефіцієнти дольової участі i -ї одиниці і j -ї групи обладнання, які враховують аварійність визначають

$$\beta_{eni,j} = \frac{C_{ij}^g}{N^g}, \quad \beta_{enj}^g = \frac{C_j^g}{N^g} = \frac{\sum_{i=1}^{L_j} C_{i,j}^g}{N^g} = \sum_{i=1}^{L_j} \beta_{eni,j}^g$$

4. Індекс ризику функціонування ЕЕС при відмовах окремих одиниць електрообладнання $R_{i,j}^I$, на всій сукупності відмов обладнання в j -й групі R_j^I , на всій сукупності відмов обладнання в енергосистемі R^I – визначаються статистичним моделюванням режимів ЕЕС при відмовах електрообладнання [].

З використанням отриманих коефіцієнтів за балансовою моделлю можна отримати певний результат розподілу ремонтно-експлуатаційних витрат енергокомпанії.

З урахуванням того, що вибір оптимального варіанту розподілу витрат на технічне обслуговування і ремонт пов'язаний з наявністю різного роду невизначеностей параметрів технічного стану електрообладнання і показників аварійності електрообладнання, оцінок варіантів прийняття рішень, то для врахування об'єктивно існуючих невизначеностей (неповнота, нечіткість інформації) найбільш ефективним є використання теорії нечітких множин [14,15].

Лінгвістична математична модель агрегованої оцінки ступеню значущості одиниць і груп електрообладнання в частині розподілу ремонтно-експлуатаційних витрат. Для знаходження узагальнених агрегованих оцінок ступеню значущості одиниць і груп електрообладнання $A = \{A_i\}$, з урахуванням основних експлуатаційних факторів та об'єктивно існуючих невизначеностей доцільним є використання системи нечіткого логічного висновку [1-4]. Керуючись основними принципами побудови і у відповідності із загальною структурою нечіткої моделі [1,2,8,15] об'єкта, введемо наступні компоненти нечіткої моделі для агрегованих оцінок ступеню значущості об'єкта.

В якості вхідних лінгвістичних змінних C_i ($i = 1, \dots, 4$), нечіткої моделі оцінки рівня значущості одиниць і груп електрообладнання $A = \{A_i\}$ прийемо наступні:

β_ϕ – вартість виробничих фондів одиниць і груп електрообладнання $C_1 = \{T_L^1, T_M^1, T_B^1\}$, β_3 – завантаження електроенергією одиниць і груп електрообладнання $C_2 = \{T_L^2, T_M^2, T_B^2\}$, β_{en} – за аварійністю (коефіцієнт вимушеного простою) для окремих одиниць і груп електрообладнання, $C_3 = \{T_L^3, T_M^3, T_B^3\}$, R_i – індекс ризику функціонування ЕЕС при відмовах електрообладнання, $C_4 = \{T_L^4, T_M^4, T_B^4\}$,

де T_L^i, T_M^i, T_B^i – "низьке", "середнє", "високе" значення i -го параметра. Всі входи системи нечіткого логічного висновку мають 3 функції належності, базові форми і параметри яких представлені на рис. 1 відповідно.

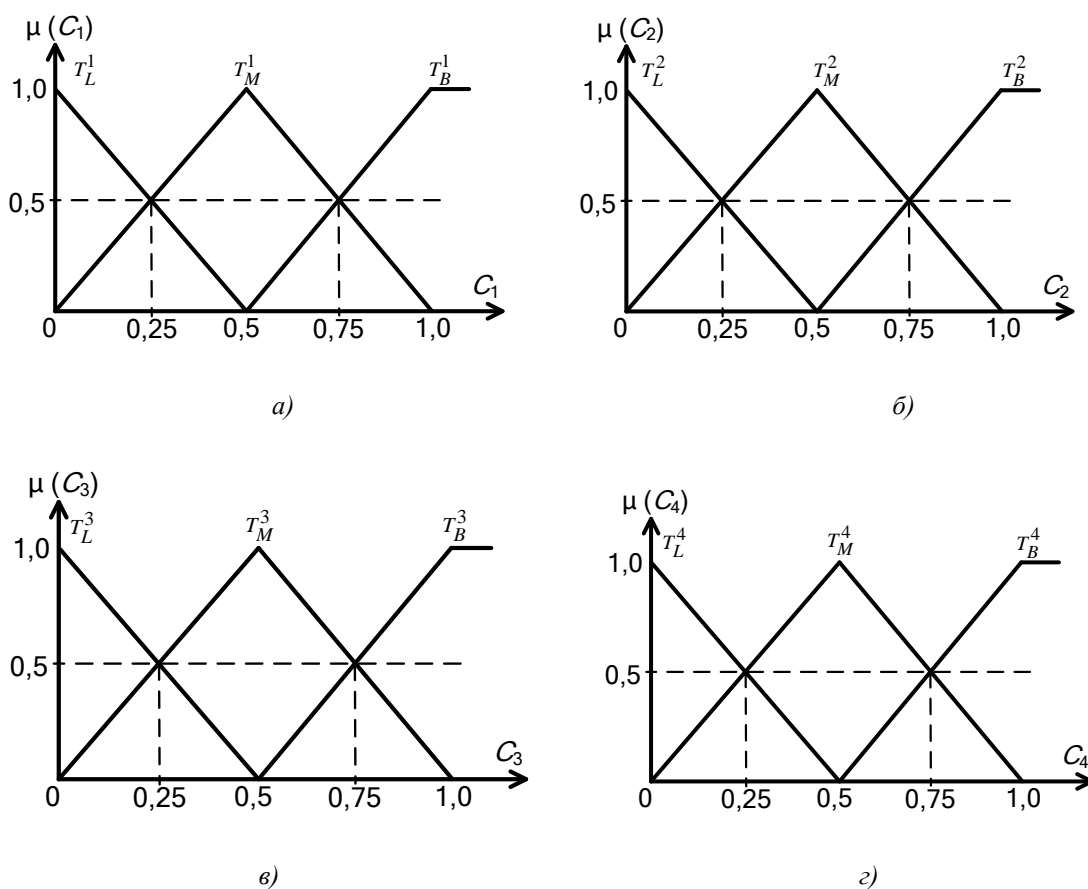


Рисунок 1 – Функції належності терм-множин:
 а – вхідна змінна C_1 ; б – вхідна змінна C_2 ; в – вхідна змінна C_3 ; г – вхідна змінна C_4

Вихідною лінгвістичною змінною системи нечіткого логічного висновку типу Мамдані [1,14,15] є рівень значущості одиниці або групи електрообладнання A_i . Терми вихідної змінної та їх функції належності прийняті згідно зі стандартним п'ятирівневим 01-класифікатором [24]: T_{VL} – дуже низький спрацьований ресурс (0; 0,2); T_L – низький спрацьований ресурс (0,2; 0,4); T_M – середній спрацьований ресурс (0,4; 0,6); T_B – високий спрацьований ресурс (0,6; 0,8); T_{VB} – дуже високий спрацьований ресурс (0,8; 1).

Вихідна лінгвістична змінна системи нечіткого логічного висновку має функцію належності, базова форма і параметри якої представлені на рис. 2. Сформовані 81 правил нечітких висновків для вихідної множини A_i наведено в табл. 1.

Представлені вище правила в системі нечіткого логічного висновку є базовими і єдиною для визначення агрегованих оцінок кожної одиниці і групи електрообладнання.

Одним з найбільш важливих параметрів в задачі знаходження узагальнених агрегованих оцінок ступеню значущості одиниць і груп електрообладнання є індекс ризику функціонування ЕЕС при відмовах окремих одиниць електрообладнання R_{ij} .

Кількісно ризик визначають як добуток величини події A на міру можливості її появи q [1-4]:

$$R(t) = A \cdot q$$

В роботі для вирішення поставлених задач розглядається оцінка ризику виникнення аварійної ситуації в підсистемі ЕЕС при відмовах електрообладнання, зокрема визначення технічного ризику порушення динамічної стійкості, відключення обладнання внаслідок незадовільного стану і перевантажень, неприпустимого зниження напруги у вузлах навантаження [1-3]. Математична модель і алгоритм оцінки ризику виникнення аварійних ситуацій при відмовах електрообладнання докладно описані в [1,2].

Таблиця 1. Фрагмент системи правил НЛВ для вихідної множини A_i кожної одиниці і групи електрообладнання

№ п/п	Вхідні лінгвістичні змінні				Вихідна змінна
	Вартість виробничих фондів	Рівень аварійності електрообладнання	Завантаження об'єкта електроенергією	Індекс ризику ЕЕС при відмовах обладнання	
1	T_L^{C1}	T_L^{C2}	T_L^{C3}	T_L^{C4}	$T_L^{A_i}$
2	T_L^{C1}	T_L^{C2}	T_L^{C3}	T_M^{C4}	$T_M^{A_i}$
3	T_L^{C1}	T_L^{C2}	T_L^{C3}	T_B^{C4}	$T_B^{A_i}$
...
79	T_B^{C1}	T_B^{C2}	T_B^{C3}	T_L^{C4}	$T_B^{A_i}$
80	T_B^{C1}	T_B^{C2}	T_B^{C3}	T_M^{C4}	$T_B^{A_i}$
81	T_B^{C1}	T_B^{C2}	T_B^{C3}	T_B^{C4}	$T_B^{A_i}$

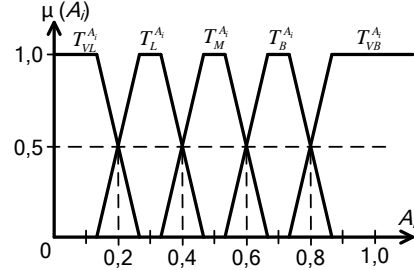


Рисунок 2 – Функції належності терм-множин вихідної лінгвістичної змінної A_i

Враховуючи імовірнісний характер відмов електрообладнання імовірність виникнення аварійної ситуації в підсистемі ЕЕС визначається на основі використання імовірнісно-статистичного моделювання режиму енергосистеми (метод Монте-Карло). Інтегральний індекс ризику функціонування підсистеми ЕЕС при відмовах окремих одиниць електрообладнання R_{ij} при цьому визначається [1-4,16,17]:

$$R = R_{en} + R_{dc} + R_{zn},$$

де R_{en} , R_{dc} , R_{zn} - складові інтегрального індексу ризику, які визначають ризик відмови обладнання ЕЕС внаслідок незадовільного технічного стану і перевантажень, порушення динамічної стійкості системи, неприпустимого зниження напруги у вузлах навантаження при відмовах, плановому і аварійному виведенні з експлуатації для ремонтного обслуговування окремих одиниць обладнання.

На рис. 3 представлений розроблений алгоритм комплексного моделювання режиму ЕЕС для розподілу витрат на ТО і Р окремих одиниць або групи електрообладнання.

З використанням комплексу PowerFactory [1,2] для заданої моделі функціонування ЕЕС статистичним моделюванням імітується випадковий процес змінення топології електричної мережі, вузлового навантаження працездатності елементів та визначається імовірнісна складова ризику.

Результати розрахунку оптимального розподілу витрат на технічне обслуговування та ремонт електрообладнання енергокомпанії.

Для визначення основних складових, що кількісно визначають узагальнену агреговану оцінку ступеню значущості одиниць електрообладнання в частині розподілу ремонтно-експлуатаційних витрат розглядалась еквівалентна схема (рис. 4) електричних з'єднань електричної мережі ЕЕС 35–750кВ енергокомпанії, що містить: ТЕЦ № 1 потужністю 300 МВт, ТЕС № 2 потужністю 1200 МВт. У склад даної енергокомпанії входить чотири групи енергооб'єктів: ПС – 110 кВ; ПС – 330 кВ; ПЛ – 110 кВ; ПЛ – 330 кВ. В свою чергу кожна з груп у своєму складі має наступну кількість енергооб'єктів: ПС – 110 кВ – десять підстанцій напругою 110 кВ; ПС – 330 кВ – сімнадцять підстанцій 330 кВ; ПЛ – 110 кВ – сім повітряних ліній 110 кВ; ПЛ – 330 кВ – двадцять дві повітряні лінії 330 кВ; Загальна кількість об'єктів енергокомпанії 56 одиниць.

На першому етапі розрахунку оптимального розподілу витрат на технічне обслуговування та ремонт електрообладнання енергокомпанії імовірно-статистичним моделювання режиму енергосистеми (метод Монте-Карло) була виконана оцінка ризику виникнення аварійної ситуації в підсистемі ЕЕС при відмовах електрообладнання на інтервалі часу спостереження $\Delta t = 12$ міс (таблиця 2.).

Кількісні характеристики факторів впливу та оцінки коефіцієнтів часткової участі електрообладнання в формуванні витрат на його ремонт і експлуатацію по кожному з визначених факторів наведені в таблиці 3 .

На другому етапі розрахунку оптимального розподілу витрат на технічне обслуговування та ремонт електрообладнання з використанням правил нечіткої бази знань визначається рівень значущості множини $A = \{A_i\}$ одиниць і груп електрообладнання $A_{gp} = \{A_{gpi}\}$. Оперативний персонал енергокомпанії за результатами агрегованої оцінки значущості одиниць електрообладнання $A = \{A_i\}$ з урахуванням обмежень на виділені кошти для ремонтно-експлуатаційних обслуговування електрообладнання енергокомпанії в обсязітис.грн. на рік визначив перелік обладнання, яке потребує першочергового виділення коштів на ТО і Р (таблиця 5). Розрахований пропорційно нормованим значенням A_i розподіл коштів на ТО і Р визначених одиниць обладнання наведено в таблиці 5.

Таблиця 2. Результати визначення ризику виникнення аварійної ситуації в підсистемі ЕЕС при відмовах електрообладнання на інтервалі часу спостереження $\Delta t = 12$ міс

№ гілки	Найменування гілки	Елемент, що входить до складу гілки	Кількість відмов	Ризик виникнення аварійних ситуацій					
				R_{gm}	$R_{пл}$	R_{dc}	R_{zn}	R_{el}	R
1	АТ-11	АТ-11	1	0	0	0	0,002	0,002	0,018
		Q-46	7	0	0,002	0	0,008	0,01	
		Q-66	4	0	0,001	0	0,005	0,006	
2	АТ-16	АТ-16	1	0	0,002	0	0,001	0,003	0,026
		Q-65	3	0	0,007	0	0,001	0,008	
		Q-74	9	0	0,012	0	0,003	0,015	
...
42	L14-22	L14-22	9	0,016	0	0	0,032	0,048	0,106
		Q93	7	0,012	0	0	0,025	0,037	
		Q94	4	0,007	0	0	0,014	0,021	
43	L26-27	L26-27	2	0	0,002	0	0	0,002	0,013
		Q87	6	0	0,003	0	0	0,003	
		Q88	10	0	0,008	0	0	0,008	

Висновки. Проаналізовано стан проблеми оптимального розподілу ремонтно-експлуатаційних витрат на відновлення ресурсу і заміну зношеного обладнання енергокомпанії. Визначені найбільш важливі фактори впливу на кількісні характеристики витрат на технічне обслуговування і ремонт обладнання та запропонована математична модель для розрахунку коефіцієнтів дольової участі за кожним з виділених факторів. Розроблена лінгвістична математична модель визначення узагальнених агрегованих оцінок одиниць і груп електрообладнання для задач розподілу ремонтно-експлуатаційних витрат з урахуванням основних експлуатаційних факторів. Для схеми підсистеми ЕЕС НЕК «Укренерго» з використанням розробленого математичного і програмного забезпечення виконано розрахунковий розподіл ремонтно-експлуатаційних витрат енергокомпанії за поточними технічними характеристиками обладнання.

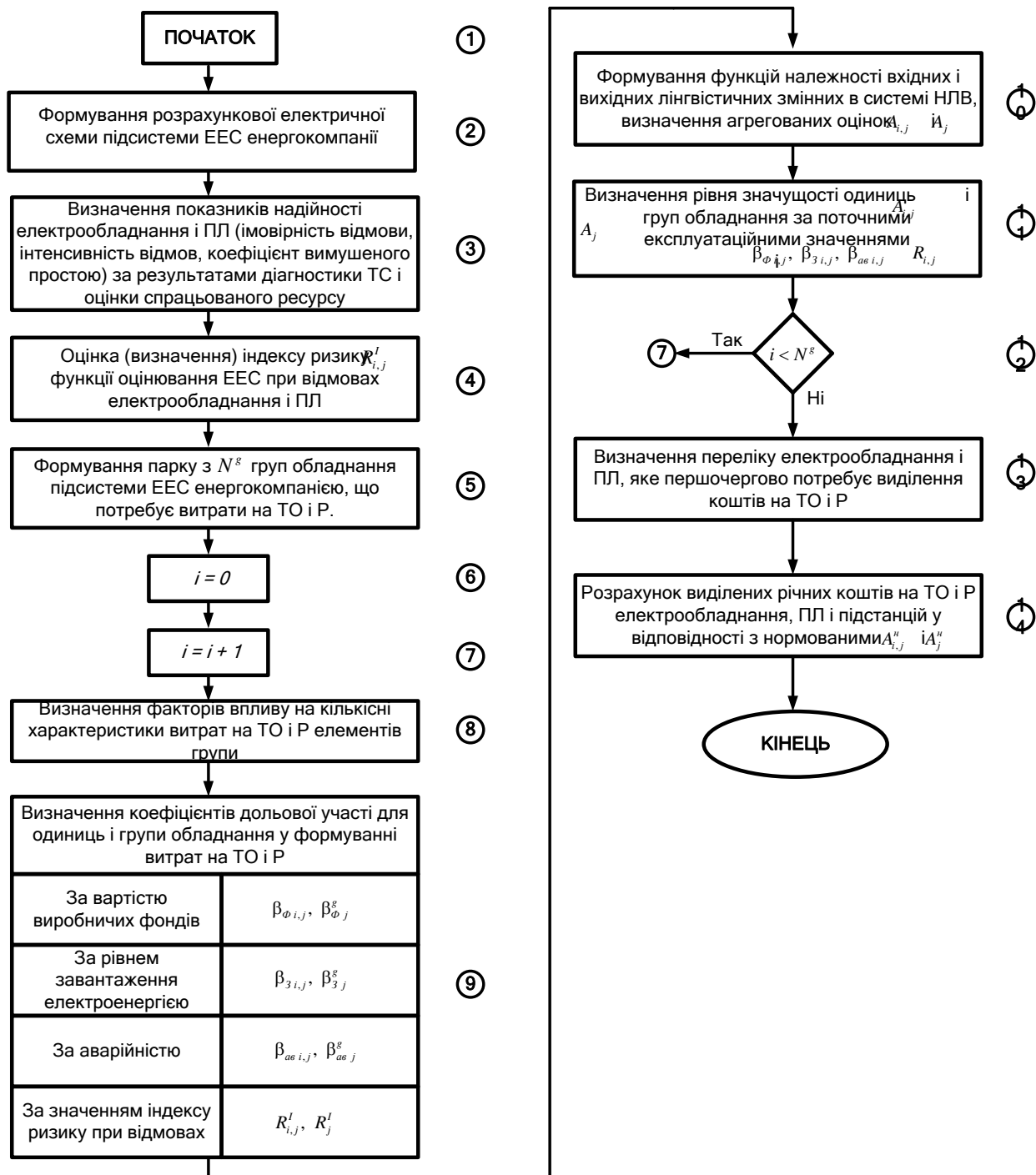


Рисунок 3 – Алгоритм комплексного моделювання режиму ЕЕС для розподілу витрат на ТОіР групи електрообладнання.

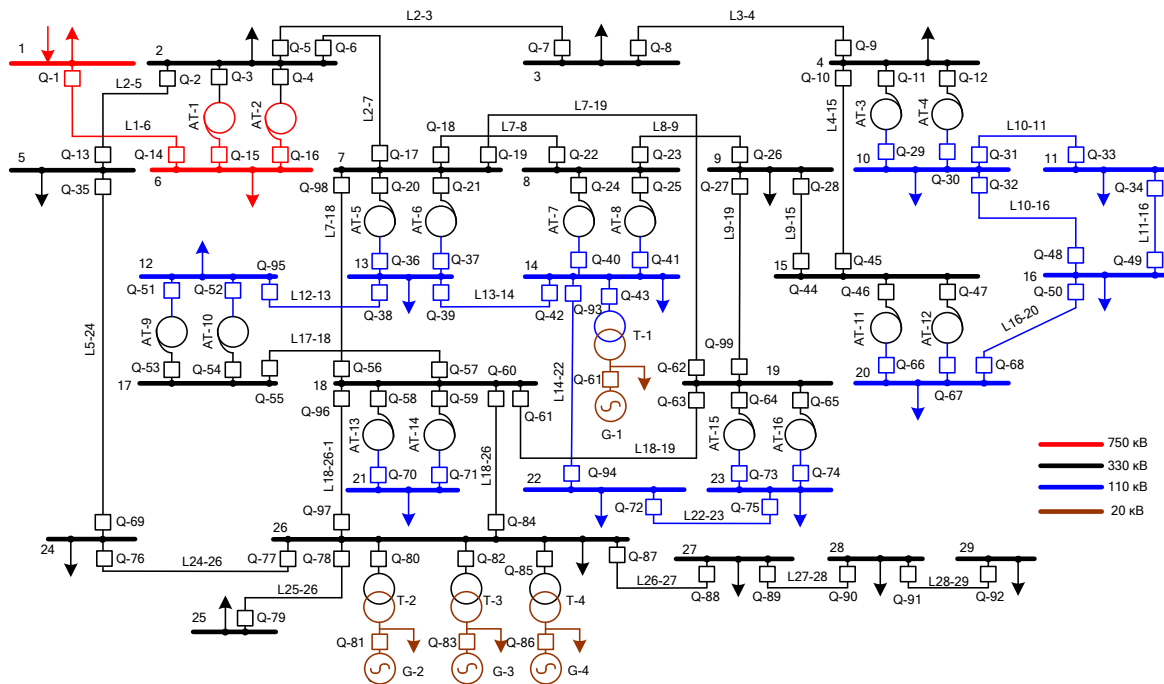


Рисунок 4 – Розрахункова схема електричних з'єднань ЕЕС.

Таблиця 3. Кількісні характеристики факторів впливу та коефіцієнтів часткової участі електрообладнання в формуванні витрат на його ремонт і експлуатацію для ПЛ і підстанцій.

№ п/п	Об'єкт	Клас напруги, кВ	Рік введення	Розмір фонду, грн.	Індекс ризику	Коефіцієнт простою	Пропуск електроенергії, МВт/рік	β_f	β_p	$\beta_{прос}$	$\beta_{прон}$
Автотрансформатори											
1	АТ-3	330/110	1985	2113845,238	0,049	0,250	20075	0,003	0,049	0,012	0,005
2	АТ-4	330/110	1999	2388710,563	0,010	0,250	20002	0,004	0,010	0,012	0,005
3	АТ-5	330/110	2001	2427977,038	0,012	0,250	21498,5	0,004	0,012	0,012	0,005
...
12	АТ-14	330/110	2007	2545776,463	0,044	0,250	51100	0,004	0,044	0,012	0,012
13	АТ-15	330/110	2014	2683209,125	0,024	0,250	12775	0,004	0,024	0,012	0,003
14	АТ-16	330/110	2003	2467243,513	0,026	0,250	12738,5	0,004	0,026	0,012	0,003
Повітряні лінії											
1	L10-11	110	1985	3252674,6	0,028	0,189	3759,5	0,005	0,028	0,009	0,001
2	L10-16	110	1971	2182583,2	0,048	0,126	11680	0,003	0,048	0,006	0,003
3	L11-16	110	1968	1658860	0,064	0,080	474,5	0,003	0,064	0,004	0,000
...
27	L26-27	330	1988	9819481	0,013	0,153	56502	0,016	0,013	0,007	0,013
28	L27-28	330	1989	9541386,25	0,017	0,133	39639	0,015	0,017	0,006	0,009
29	L28-29	330	2003	8639143,5	0,014	0,030	20951	0,014	0,014	0,001	0,005
Підстанції											
1	ПС10	110	1972	3204904,5	0,017	0,422	38690	0,005	0,017	0,020	0,009
2	ПС11	110	2010	3210098,85	0,030	0,307	4015	0,005	0,030	0,014	0,001
3	ПС12	110	1984	3096072	0,014	0,365	87600	0,005	0,014	0,017	0,020
...
25	ПС27	330	1975	13345857	0,008	0,445	56575	0,021	0,008	0,021	0,013
26	ПС28	330	1989	15258915	0,008	0,445	41975	0,024	0,008	0,021	0,010
27	ПС29	330	1991	11765523	0,007	0,352	23725	0,019	0,004	0,016	0,005

Таблиця 5. Перелік обладнання, яке потребує першочергового виділення коштів на ТО і Р.

№ п/п	Об'єкт	$\beta_{\text{фонди}}$	$\beta_{\text{ризик}}$	$\beta_{\text{простою}}$	$\beta_{\text{пропуск}}$	A_i	A_n	Загальний об'єм	Виділені кошти
1	L3-4	0,013	0,139	0,003	0,015	0,362	0,192	7125000	1368000
2	L4-15	0,016	0,050	0,008	0,006	0,256	0,136		969000
3	4-10 (АТ-3)	0,003	0,049	0,012	0,005	0,255	0,135		961875
4	4-10 (АТ-4)	0,004	0,010	0,012	0,005	0,189	0,1		712500
5	Q9	0,007	0,018	0,009	0,015	0,201	0,107		762375
6	Q10	0,007	0,021	0,008	0,006	0,207	0,11		783750
7	Q11	0,009	0,019	0,01	0,005	0,203	0,108		769500
8	Q12	0,008	0,022	0,011	0,005	0,209	0,111		790875

Ye. Bardyk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-5776-1500

I. Zakliuka¹, Ph.D. student, ORCID 0009-0009-9743-4318

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

IMPROVING THE EFFICIENCY OF ENERGY COMPANIES BY OPTIMISING THE DISTRIBUTION OF COSTS FOR MAINTENANCE AND REPAIR OF ELECTRICAL EQUIPMENT

At present, there is a high emergencies probability in the electric power system as an electrical equipment failures result caused primarily by the objectively existing ageing and its service life significant exhaustion. Emergencies arising from electrical equipment failures lead to the dynamic stability violation of power systems and power system load nodes by voltage, cascading accidents and, as a result, technological processes disruption of consumer enterprises, which is accompanied by significant losses. One of the ways to prevent sudden failures or minimise the risk of their occurrence is to ensure rational and efficient operation management and reduce the operating equipment cost without risking a decrease in the power system reliability.

To solve the optimal distribution problems of power company operating costs, taking into account the objectively existing limiting factors, a generalised balance sheet model of cost allocation by electrical equipment groups and units is proposed, which is a total costs function of an operating factors number.

Mathematical models for calculating the electrical equipment share participation coefficients in the costs formation for its repair and maintenance for each of the identified factors have been obtained. A linguistic mathematical model for determining generalised estimates of the electrical equipment units and groups significance degree in the repair and maintenance costs distribution formation, taking into account the main operational factors, has been proposed.

An algorithm and software for modelling the modes of the electric power system with an electrical connections scheme of electric networks with a 35-330 kV voltage have been developed to assess the operation risk index and power company repair and maintenance costs distribution. The estimated power company repair and maintenance costs distribution according to the current technical equipment characteristics and power system subsystem modes was performed.

Keywords: maintenance, repair, production assets, power system, electrical equipment, fuzzy logic, resource, risk, failure, technical condition, diagnostics.

References

1. Bardyk E., Bondarenko O. Assessment of regime reliability of electric power system based on the definition of risk index in case of failure of the load with responsible consumers. *Technical science and technologies*. 2019. Vol. 2(16). P. 105–117.
2. E. I. Bardyk, M. V. Kosterev, and N. P. Bolotnyi, "Improving reliability of operation of power companies on the basis of risk assessment of emergency situations at the failures of electrical equipment," *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 39, pp. 13-19, 2014.
3. A study of Electrical Security Risk Assessment System based on Electricity Regulation / Dahai You A., Qing Qian Chen B., Xianggen Yin C., Bo Wang D. // *Energy Policy*. 2011. Vol. 39. P. 2062–2074. doi: 10.1016/j.enpol.2011.01.050
4. Review on Risk Assessment of Power System / Shiwen Y., Hui H., Chengzhi W., Hao G., Hao F. // *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 109. P. 1200–1205. doi: 10.1016/j.procs.2017.05.399 .
5. Schorn C., Balzer G. *Asset Management for Infrastructure Systems: Energy and Water*. Springer, 2015. 348 p.
6. J anjic A. D., Popovic D. S. Selective Maintenance Schedule of Distribution Networks Based on Risk Management Approach. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2007. Vol. 22, no. 2. P. 597–604. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2007.894863>.
7. Handschin E., Jurgens I., Neumann C. Long term optimization for risk-oriented asset management // 16th Power Systems Computation Conference. Glasgow, 2008.
8. Kosterev, M.V., Bardyk, E.I., Litvinov, V.V. Preventive Risk-Management of Power System for Its Reliability Increasing // *WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS*. – 2014, vol. 10., p.251-258
9. Wallnerström C. J. On Risk Management of Electrical Distribution Systems and the Impact of Regulations : licentiate thesis. 2008. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-4717>
10. Y. Wang, G. Liang and N. Wang, "Optimal Preventive Maintenance Strategy Based on Risk Assessment," *2011 International Conference on Computer and Management (CAMAN)*, Wuhan, China, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/CAMAN.2011.5778894.
11. Selection of an optimal maintenance and replacement strategy of HV equipment by a risk assessment process. / G. Balzer et al. Paris : CIGRE, 2006. Pap. B3-103.
12. Billinton, Roy, and Ronald N. Allan. *Reliability assessment of large electric power systems*. Springer Science & Business Media, 2012.
13. Li W. *Risk assessment of power systems: Models, methods and applications*. - N.Y. : John Willy and Soua, 2005.
14. Lysenko, V. P., et al. "Systemy shuchnoho intelektu: nechitka lohika neironni merezhi nechitki neironni merezhi henetychnyi alhorytm [Artificial intelligence systems: fuzzy logic neural networks." fuzzy neural networks, genetic algorithm] (2014): 336.
15. Zajchenko, Yu.P. "Osnovi proektuvannya intelektual'nih sistem" [Basics of Designing Intelligent Systems]". Textbook, Kiev: Slovo Publ., 2004.
16. Goerdin S. A. V., Smit J. J., Mehairjan R. P. Y. Monte Carlo simulation applied to support risk-based decision making in electricity distribution networks // 2015 IEEE Eindhoven PowerTech. 2015. doi: 10.1109/ptc.2015.7232494
17. da Silva A. M. L., Fernandez R. A. G., Singh C. Generating Capacity Reliability Evaluation Based on Monte Carlo Simulation and Cross-Entropy Methods. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2010. Vol. 25, no. 1. P. 129–137. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2009.2036710>.

Надійшла: 12.06.2024

Received: 12.06.2024

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИЛАДІВ-РОЗПОДІЛЮВАЧІВ ОБЛІКУ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ: ПЕРВИННИЙ АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ

В даній статті викладено первинний аналіз даних з системи розподільного обліку багатоквартирного будинку, покази окремих груп розподільовачів, виконано порівняння між групами споживачів для виявлення факторів, що впливають на точність розподілу сформульовано основні тези подальших досліджень. В рамках аналізу використовувались дані з приладів-розподільовачів системи розподільного обліку теплової енергії на опалення багатоквартирного будинку в м. Біла Церква. Було проаналізовано розподілене споживання квартир та опосередкований вплив повномасштабного вторгнення рф на поведінку споживачів опалення щодо індивідуального регулювання споживання теплової енергії на опалення. Також було проаналізовано можливий вплив розташування приміщень відносно поверховості на рівень споживання опалення. Для аналізу зібрані покази з розподільовачів застосовувались у первинному вигляді, та інтерпретованому розподіленому вигляді як розподілене енергоспоживання на опалення приміщень, а також питома розподілене споживання для порівняння між квартирами без впливу різниці площ. Групування приміщень виконувалось поквартирно, по поверхах, по квартирних стояках, загальнобудинкове енергоспоживання на опалення. Під час аналізу процесу інтерпретації показів, було виявлено відсутність врахування споживання квартир з індивідуальними системами опалення, внаслідок чого неможливо в достатній мірі робити висновки про поведінку споживачів відносно регулювання опалення. Подальші дослідження необхідні для уточнення значень поправкових коефіцієнтів при інтерпретації показів, в загальному виявленні доцільності застосування деяких поправкових коефіцієнтів, розробки змін до методики розподільного обліку теплової енергії на опалення, досліджень поведінки споживачів на даному рівні індивідуального контролю енергоспоживання.

Ключові слова: розподільовачі теплової енергії, розподільний облік опалення, індивідуальне регулювання споживання, індивідуальний облік, перетоки теплової енергії.

Вступ

Важливою складовою підвищення енергоефективності багатоквартирних будинків є можливість обліку енергоспоживання кожного споживача з достатньою точністю для прийняття рішень щодо регулювання споживання.

Дослідження і розвиток способів розподільного обліку теплової енергії на опалення є актуальним для підвищення енергетичної ефективності багатоквартирних будівель України, більшість з яких складають будівлі з вертикальною системою опалення. Можливість відокремлено контролювати власне споживання теплової енергії на опалення дає можливість економії та відслідковування даної економії.

Для будинків з вертикальними системами опалення відсутній технічно і економічно обґрунтований метод прямого обліку теплової енергії на опалення через особливості прокладання трубопроводів. Донедавна для таких будівель єдиним способом розподілу загального споживання було розділення показів загальнобудинкового лічильника відповідно до площ опалювальних приміщень [1]. Наразі в Україні розвивається технологія непрямого розподілення обліку споживаного тепла – за допомогою системи приладів-розподільовачів теплової енергії [2].

Покази з приладів-розподільовачів потребують непростой процедури інтерпретації та врахування укрупнених поправкових коефіцієнтів [3], що потенційно можуть призвести до суттєвого впливу на коректність розподілу плати за опалення. Метод, що лежить в основі системи розподільного обліку, потребує подальшого розвитку та аналізу, для чого, перш за все необхідно дослідити результати практичного застосування методу [4].

Мета. Провести аналіз зібраних даних з показників розподільовачів теплової енергії для визначення можливості виявлення факторів, що впливають на споживання енергії на опалення і на її розподіл, а також сформулювати припущення для подальших досліджень.

Завдання. Для реалізації заданої мети було сформульовано основні завдання:

- описати загальні характеристики об'єкта;
- проаналізувати загальне споживання теплової енергії будівлі на опалення;
- оцінити та порівняти різні форми показів з приладів-розподільовачів;
- виконати групування приміщень за ключовими характеристиками, проаналізувати розподілене споживання відповідно до сформованих груп;

-виявити залежності споживання теплової енергії на опалення від можливих конструкційних, експлуатаційних та поведінкових факторів впливу.

Загальна характеристика об'єкта дослідження

Для аналізу використовуються показники з системи розподільного обліку теплової енергії на опалення, що встановлена в багатоквартирному будинку в м. Біла Церква.

Основна інформація про будівлю (основні характеристики наведено в табл. 1) - дев'ятиповерховий трисекційний будинок з Г-подібним розташуванням секцій. Поверховий план наведено на рис.1. План розташування будівлі показано на рис.2. Зовнішні стіни з керамзитобетонних панелей. Будівля частково примикає до сусіднього житлового будинку. В будинку було встановлено модульний ІТП з погодним регулюванням, замінено та теплоізолювано трубопроводи опалення в технічних приміщеннях, змінено схему стояків опалення на П-видну, в більшості квартир замінено радіатори на сталеві панельні відповідного типорозміру, встановлено автоматичні балансувальні клапани на стояках, терморегулятори на радіаторах, і організовано розподільний облік теплової енергії за допомогою приладів-розподілювачів чеської фірми Arator metra, моделі E-ITN-30 [5].

Таблиця 1 Основні характеристики будівлі

Рік побудови	1979
Кількість поверхів	9
Кількість секцій	3
Кількість квартир	108
з них 1-кімнатних	18
2-кімнатних	45
3-кімнатних	45
Площа будинку загальна, м ²	7304
Об'єм будівлі загальний, м ³	24704



Рисунок 1 -Поверховий план типового поверху будівлі

Водночас, при проєктуванні і виконанні робіт з модернізації системи опалення, квартири з індивідуальним опаленням враховано не було, тому стан та характер самовільних змін системи опалення в даних квартирах не було визначено.

На даному етапі досліджень було отримано таку інформацію: помісячні покази даних з приладів-розподілювачів за 2021-2023 роки, поправкові коефіцієнти, що застосовуються при інтерпретації показників, номінальні потужності і типорозміри встановлених радіаторів, опалювальні площі квартир.

В систему розподільного обліку будівлі включено 95 квартир зі 108, в яких сумарно встановлено 327 приладів-розподілювачів.

В будівлі наявні 13 квартир з індивідуальним опаленням (на рис. 3 відображені кольором). Лише на трьох поверхах (3,4 та 6) з дев'яти всі квартири з централізованим опаленням. Найбільше квартир з індивідуальним опаленням на другому поверсі – 4 з 12.

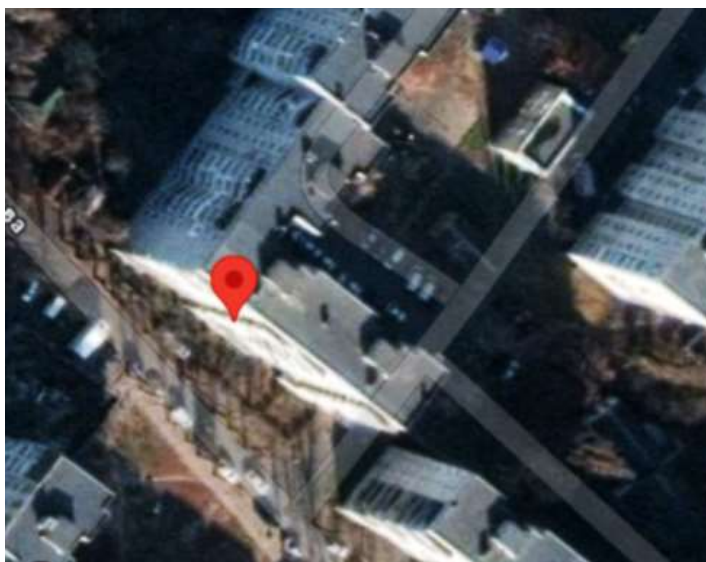


Рисунок 2 - Орієнтація будівлі

поверхи	1 секція				2 секція				3 секція			
9	33	34	35	36	69	70	71	72	105	106	107	108
8	29	30	31	32	65	66	67	68	101	102	103	104
7	25	26	27	28	61	62	63	64	97	98	99	100
6	21	22	23	24	57	58	59	60	93	94	95	96
5	17	18	19	20	53	54	55	56	89	90	91	92
4	13	14	15	16	49	50	51	52	85	86	87	88
3	9	10	11	12	45	46	47	48	81	82	83	84
2	5	6	7	8	41	42	43	44	77	78	79	80
1	1	2	3	4	37	38	39	40	73	74	75	76

Рисунок 3 - Умовна схема розташування квартир будинку з відображенням квартир з індивідуальним опаленням

Форма представлення даних для аналізу

Для дослідження поведінки споживачів та внутрішніх факторів на першому етапі аналізу використовувались показники з розподільвачів без врахування поправкових коефіцієнтів. Приклад форми показів з приладів-розподільвачів в умовних одиницях для декількох квартир за опалювальний сезон 2021-2022 наведено в таблиці 2.

В кожній квартирі встановлено по декілька розподільвачів, відповідно до кількості приладів опалення, кожен розподільвач має свій унікальний ідентифікаційний номер, для відслідковування конкретних показів. Покази накопичуються в табличній формі щомісячно, в умовних одиницях вимірювань, що безпосередньо знімаються з приладів. Для порівняння показників між квартирами використовувались питомі показники на квадратний метр. Використання питомих показників дозволяє нівелювати різницю в площах приміщень. Кінцева форма показників розподіленого споживання з врахування перерозподілу витрат квартир, що зловживають регулюванням [6], не використовувалась через відсутність потреби у використанні даної форми показників, так як у дослідженні перевіряються припущення щодо причин, через які виникли потреби у такому перерозподілі.

Для аналізу показників по групах застосовувалась форма даних в розподілених гігакалоріях без врахування перерахувань, а також в питомих одиницях кВтгод/мкв на опалювальну площу приміщень.

Аналіз загальнобудинкового споживання

Для будівлі наявні дані щодо помісячного споживання на опалення за два повних опалювальних сезони (2021-2022, 2022-2023), відповідно до показів загальнобудинкового лічильника, показані на рис. 4 разом з даними по зміні середньомісячної температури зовнішнього повітря.

Таблиця 2 Приклад форми показів з приладів-розподільвачів для декількох квартир за опалювальний сезон 2021-2022, умовні одиниці

№ квартири	№ розподільвача	Жовтень 2021	Листопад 2021	Грудень 2021	Січень 2022	Лютий 2022	Березень 2022	Квітень 2022
1 (трикімнатна)	1	74	353	253	279	87	476	13
	2	49	186	269	151	52	57	26
	3	43	83	202	243	161	151	33
	4	25	49	47	64	169	28	16
	5	50	274	291	389	78	60	4
2 (однокімнат.)	1	29	190	197	22	234	214	26
	2	30	155	110	17	167	163	1
3 (двокімнатна)	1	60	28	138	136	41	57	25
	2	59	331	332	281	153	105	31
	3	41	154	322	385	258	297	53

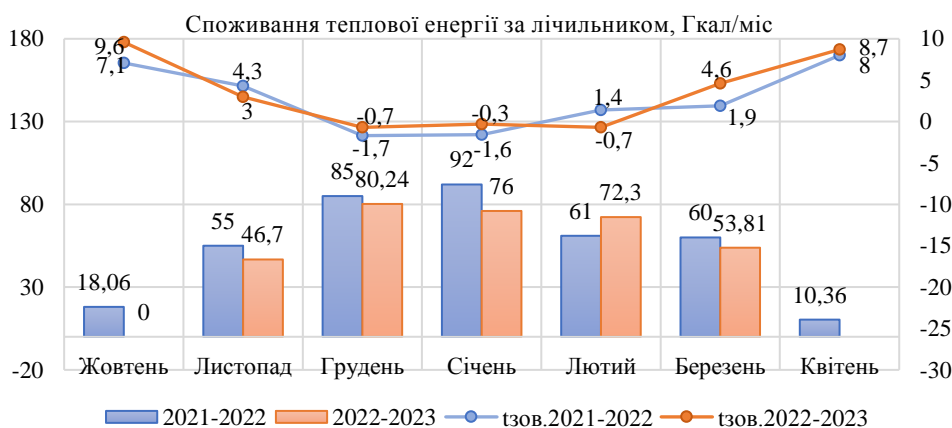


Рисунок 4 - Помісячне споживання теплової енергії на опалення будівлі

Загальнобудинкове споживання теплової енергії на опалення відповідає загальним профілям споживання, і обернено пропорційне від температури зовнішнього повітря.

Проведено аналіз поквартирного розподілу по показам розподільвачів на прикладі березня 2021 та 2022 років, результати наведено на рис. 5.

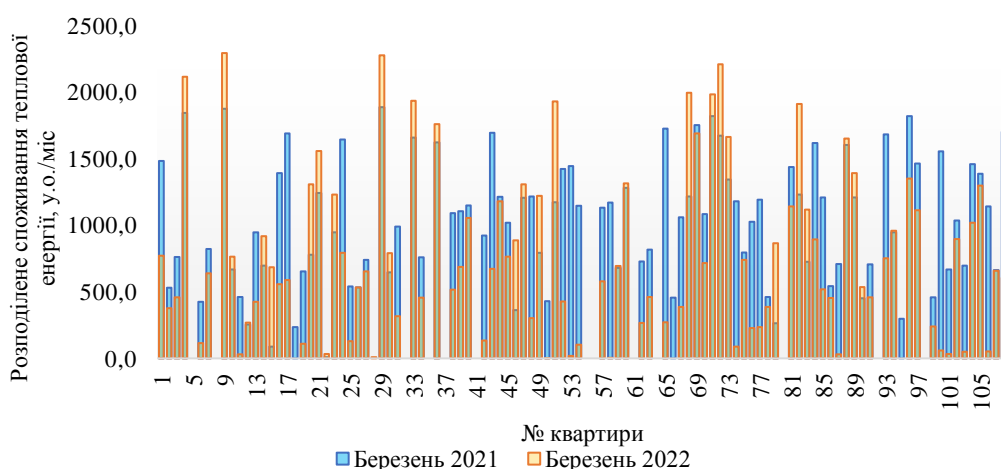


Рисунок 5 -Поквартирний графік показів розподільвачів для березня 2021 та 2022 років, для всіх квартир, що включені в систему розподільного обліку, умовні одиниці за місяць

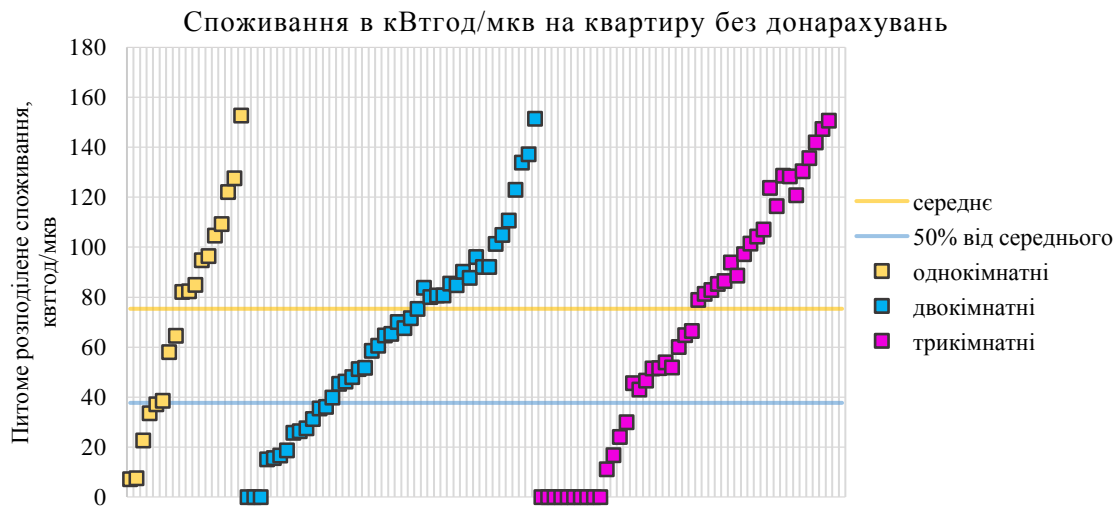
Температура зовнішнього повітря у березні 2021 дорівнювала 1,8 С, а в березні 2022 1,9 С, за зниження загального споживання. З наявних показників 95 квартир, 45 (тобто майже 50%) знизили своє споживання у порівнянні з березнем 2021 року на рівень від 50% до 100% (повного перекривання терморегулятора), при майже відсутній різниці між температурами зовнішнього повітря. Відповідно до ДБН В.2.5-67:2013, не дозволяється зниження внутрішньої температури у приміщенні нижче 14-16 градусів Цельсію [7]. Виходячи з наявних показів, можна зробити непрямий висновок, що в системі опалення будинку технічно не забезпечено виконання даної вимоги.

Можна припустити, що квартири, в яких споживання теплової енергії вище в березні 2022 року в порівнянні з березнем 2021 року, були вимушені збільшувати своє споживання саме через великі паразитні перетоки до квартир зі зниженим споживанням, мешканці яких імовірно виїхали внаслідок повномасштабного вторгнення рф у кінці лютого 2022 року.

Аналіз споживання типових груп споживачів

Було сформовано перелік основних припущень, які в рамках отриманих даних можливо перевірити. Для аналізу було класифіковано основні групи споживачів – по поверхах, по стояках, по секціях, тощо.

На рисунку 6 відображено розподілене поквартирне споживання теплової енергії на опалення з опалювальний сезон 2022-2023 р. Споживання більшості квартир є вищим за визначені 50% від середнього арифметичного споживання, визначення якого передбачено методикою [6]. Квартири, споживання яких нижче за визначений рівень, потенційно зловживають системою розподільного обліку і контролю, і підпадають під перерахунок розподіленого споживання, з відповідними донарахуваннями умовно спожитої теплової енергії до визначеного рівня [6].



Порівняння по поверхах

Для аналізу розподілу споживання по поверхах, було згруповано розподілене споживання на опалення квартир за поверхами, для виявлення впливу поверховості.

Порівняння повних сумарних показань споживання теплової енергії по поверхах не має практичного сенсу, так як на шести з дев'яти поверхів наявні квартири з індивідуальним опаленням, споживання яких ніяк не відображено в системі розподільного обліку, і, відповідно, в отриманих показах розподільовачів. Для нівелювання спотворень було використано питомі показання на площу тих квартир, як включені в систему розподільного обліку.

Можна зробити висновок про явно виражену різницю споживання дев'ятого поверху у порівнянні з іншими. Перше припущення щодо причин такого збільшеного споживання – наявність додаткових радіаторів чи потужніші радіатори в квартирах даного поверху. Для перевірки припущення виконано порівняння сумарної потужності встановлених радіаторів по поверхах, результати висвітлено на рис.8.

Сумарна номінальна потужність радіаторів не має впливу на споживання дев'ятого поверху, так як наявні поверхи (3,4,6) навіть з вищою сумарною потужністю радіаторів. Наступне припущення, що впливає з виконаного аналізу – на дев'ятому поверсі наявне суттєве недотримання теплового комфорту, внаслідок чого споживачі вимушені відкривати терморегулятори та забезпечувати тепловий комфорт за рахунок перевитрати. Конфігурація встановлених в будинку розподільовачів не передбачає відслідковування температури повітря в приміщенні, тому неможливо перевірити дотримання чи недотримання нормативних температур [5].

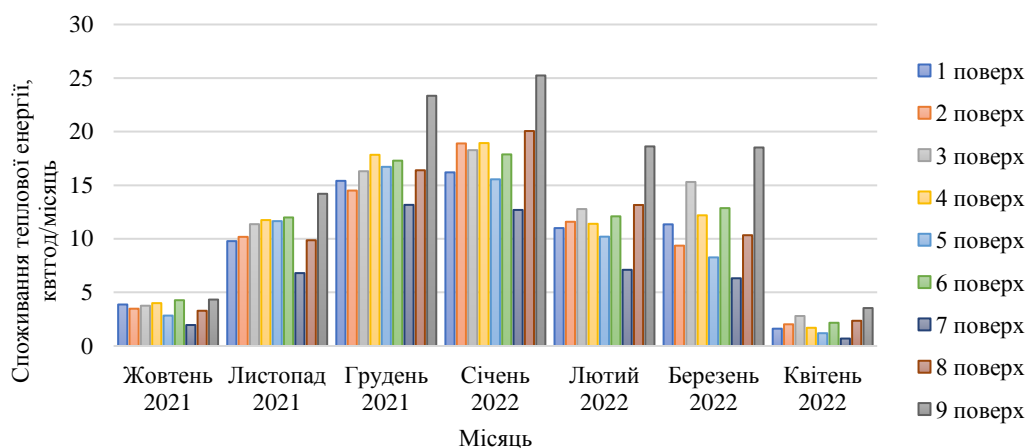


Рисунок 7 - Розподілене споживання теплової енергії на опалення груповане по поверхах, кВтгод/місяць

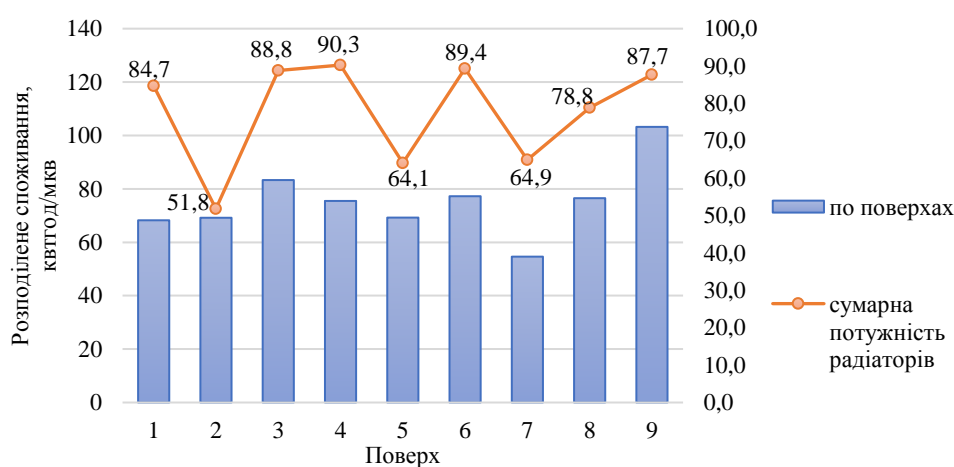


Рисунок 8 - Величини розподіленого споживання теплової енергії в кВтгод/мкв та встановленої потужності радіаторів по поверхах, кВт

Різниця у споживанні квартир на 2-8 поверхах має бути несуттєва у ситуації відсутності індивідуального регулювання споживанням, в даній ситуації наявні різниці більше 15 %, що, ймовірно, можна інтерпретувати як вплив контролю за споживанням.

Порівняння показів по стояках

Будівлю було умовно розділено по вертикальних стояках однакових за площею і формою квартир, для аналізу характеру різниці показників розподільного обліку в горизонтальній площині. Схема нумерації стояків квартир будинку показана на рис.9. Для аналізу використовувались сумарні питомі на площу покази розподільвачів, для виявлення впливу розташування квартир в горизонтальній площині на розподіл споживання.

Під час порівняння споживання по стояках квартир, рис.10, виявлено збільшене споживання квартир з суттєвою площею зовнішніх огорожувальних конструкцій (кутові квартири, чи квартири, що виходять на два фасади).

На рисунку 11 помаранчевим кольором виділені квартири з вищим споживанням теплової енергії, основна риса даних квартир – більша площа зовнішніх огорожувальних конструкцій через особливості розташування приміщень і архітектурної форми будівлі, здебільшого це кутові приміщення.

Відповідно до Методики [6] для кутових приміщень та приміщень на останньому і першому поверсі, і над проїздами наявні поправкові коефіцієнти, що знижують частку споживання даних квартир відповідно до розташування. В подальших дослідженнях буде більш деталізовано проаналізовано і розкрито вплив розташування приміщень у будівлі та обгрунтованість введення поправкових коефіцієнтів.

Висновок

У даній роботі було виконано первинний аналіз показів з системи розподільного обліку споживання енергії на опалення багатоквартирного будинку. Однією з переваг розглянутої системи обліку у порівнянні з іншими існуючими є розподілений контроль споживання енергії на опалення окремих приміщень та приладів опалення.

Виконано групування приміщень за основними типами для дослідження припущень щодо впливу розташування приміщень. Також досліджено потенційний вплив повномасштабного вторгнення рф на споживання теплової енергії, виявлено, що майже половина квартир, що задіяні в системі розподільного обліку знизила своє споживання за березень 2022 року на 50-100%, у порівнянні з показниками за березень 2021 року, без явних безпосередніх потреб у регулюванні (середні температури зовнішнього повітря за опалювальні сезони відрізнялись на 0,1 градус Цельсія).

Виявлено потенційну залежність споживання від конструкційних факторів розташування приміщень.

Система розподільного обліку ніяким чином не враховує вплив споживачів з індивідуальним опаленням, тому є потреба у в першу чергу вдосконаленні методичних вказівок з організації системи розподільного обліку в частині забезпечення включення та відслідковування споживання теплової енергії споживачів з індивідуальним опаленням в спільну систему контролю споживання.

Найявний потенціал в подальшому дослідженні проблематики, зокрема, дослідження апаратного та методичного аспектів функціонування приладів-розподільовачів.

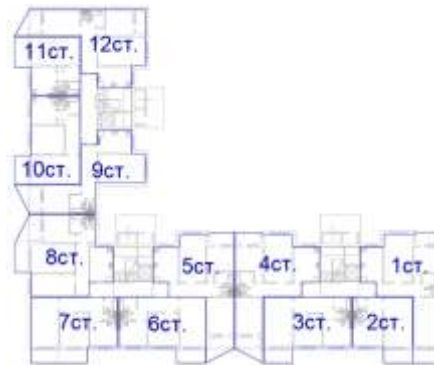


Рисунок 9 - Умовна схема нумерації стояків квартир будинку

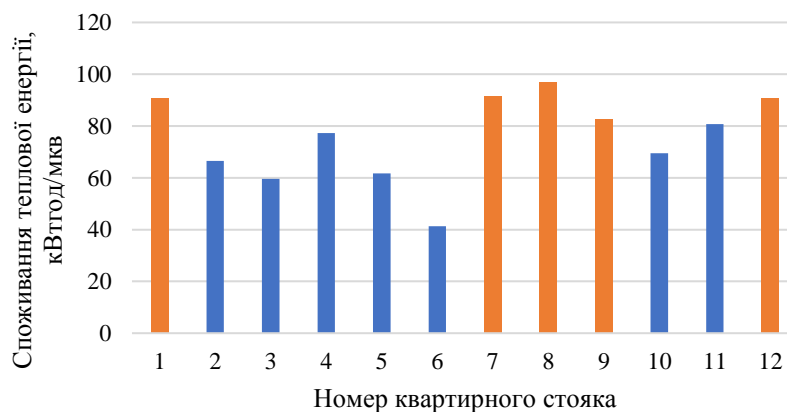


Рисунок 10 - Розподілене споживання по стояках квартир

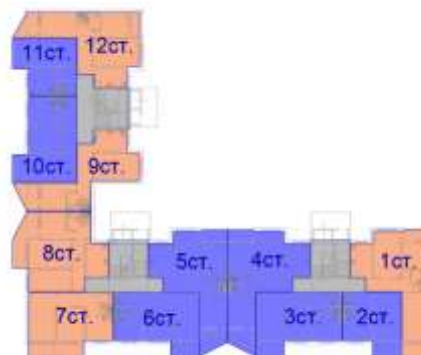


Рисунок 11 - Умовне зображення квартир з суттєвою площею зовнішніх огорожувальних конструкцій на плані будівлі, сірий колір – неопалювальні площі МЗК

Y. Mykyta¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-6698-7555

V. Deshko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-8218-3933

¹National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

APPLICATION OF HEAT ENERGY ACCOUNTING DEVICES: PRIMARY ANALYSIS OF DATA

This article presents the primary analysis of data from the distribution accounting system of an apartment building, displays of individual groups of distributors, made a comparison between groups of consumers to identify factors affecting the accuracy of distribution, and formulated the main theses of further research. As part of the analysis, data from the distribution devices of the thermal energy distribution accounting system for heating an apartment building in Bila Tserkva were used. The distributed consumption of apartments and the indirect effect of the full-scale invasion of the Russian Federation on the behavior of heating consumers regarding the individual regulation of heat energy consumption for heating were analyzed. The possible influence of the location of the premises in relation to the number of floors on the level of heating consumption was also analyzed. For the analysis, the collected readings from the distributors were used in the primary form, and interpreted in the distributed form as the distributed energy consumption for space heating, as well as the specific distributed consumption for comparison between apartments without the influence of the difference in area. The grouping of premises was carried out by apartment, by floor, by apartment risers, and the general household energy consumption for heating. During the analysis of the process of interpretation of the displays, it was found that the consumption of apartments with individual heating systems was not taken into account, as a result of which it is impossible to sufficiently draw conclusions about the behavior of consumers regarding heating regulation. Further research is needed to clarify the values of the correction coefficients when interpreting the readings, in general, to identify the feasibility of using some correction coefficients, to develop changes to the method of distribution accounting of heat energy for heating, to study the behavior of consumers at a given level of individual control of energy consumption.

Keywords: *heat energy distributors, heating distribution accounting, individual regulation of consumption, individual accounting, heat energy flows.*

References

1. Law of Ukraine "On Commercial Accounting of Thermal Energy and Water Supply" dated 06.22.2017 No. 2119-VIII (Text for printing). [Electronic resource. Access mode: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2119-19/print1504692425555062>].
2. Honcharov N.S. Accounting of thermal energy consumption in an apartment building using accounting devices: master diss./ N.S. Goncharov; Ministry of Education and Science of Ukraine, Igor Sikorsky NTUU "KPI". – Kyiv, 2020. www.ela.kpi.ua.
3. S. B. Protsenko, M. D. Kizeev, O. S. Novytska. Development of a methodology for the distribution of thermal energy costs for heating between consumers of an apartment building. Ventilation, lighting and gas supply. Issue 28. 2019.
4. Deshko V.I., Mykyta Y.O. Distribution accounting of thermal energy for heating apartment buildings: technical, methodical, behavioral aspects. *Energy: economy, technologies, ecology*. 2023. No. 4. P. 38-46.
5. <https://metra-su.cz/cs/produkt/elektronicky-indikator-topnych-nakladu-e-itn-30-s-integrovanym-radiovym-vysilacem>.
6. On the approval of the Methodology for distributing among consumers the volumes of utility services consumed in the building: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine No. 315 of November 22, 2018. Registered with the Ministry of Justice of Ukraine on December 28, 2018 under No. 1502/32954. 29 p.
7. DBN V.2.5-67:2013 Heating, ventilation and air conditioning. View. officer Kyiv: State Regulations of Ukraine, 2013. 240 p.

Надійшла: 03.09.2024

Received: 03.09.2024

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕМПФУВАННЯ КОЛИВАНЬ ЛОПАТОК ТУРБІН ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТРІЩИН

Лопатки турбін в процесі експлуатації зазнають інтенсивних механічних (статичних та динамічних) і термічних навантажень у корозійно-агресивному середовищі. Наслідком такого навантаження є поступове накопичення розсіяного втомного пошкодження, яке зрештою локалізується у вигляді тріщини втоми. При досягненні тріщиною критичного розміру виникає небезпека руйнування лопатки з катастрофічними наслідками для всієї турбіни. Вчасне виявлення пошкодження лопатки можливе на етапі ремонту турбіни з використанням вібраційної діагностики.

Метою роботи є створення аналітичного підходу, що дозволяє моделювати зміну характеристики демпфування коливань лопатки турбіни з тріщиною втоми, а також дослідження впливу параметрів тріщини та геометричних параметрів лопатки на характеристики демпфування коливань лопатки для оцінки ефективності вібраційної діагностики пошкоджень.

Представлено результати дослідження впливу поверхневої поперечної тріщини на характеристики демпфування коливань лопатки турбіни. В результаті експериментально-аналітичного дослідження встановлено вплив параметрів тріщини (розміру та розташування тріщини) та геометричних параметрів лопатки на характеристику демпфування коливань лопатки.

Вібродіагностика лопаток турбін, заснована на зміні характеристики демпфування її коливань, є достатньо ефективною діагностичною ознакою для виявлення відносно невеликих тріщин, розмір яких не становить загрози цілісності лопаток.

Ключові слова: *вібраційна діагностика, лопатки турбін, характеристика демпфування, пошкодження, навантаження, тріщина.*

Вступ

Розробці методів вібродіагностики пошкодження різних конструкцій та їх елементів присвячено багато досліджень. Зокрема були виконані експериментальні дослідження впливу тріщин на характеристики демпфування енергії коливань стрижневих сталевих [1–5] і композитних елементів [6, 7], елементів конструкцій [8, 9] і великогабаритних споруд [10].

Експериментальні дослідження виявили, що зародження та ріст тріщини призводить до суттєвого збільшення демпфуючої здатності стрижневих зразків. Так, науковцями А. Rytter, R. Brincker, P.H. Kirkegaard у статті [3] було зафіксовано 70-кратне збільшення демпфуючої здатності консольного сталевого зразка при досягненні тріщиною 50 % поперечного перерізу.

В результаті наукових досліджень, виконаних професором А. Бовсуновським в роботі [11] було виявлено наступну закономірність: чим нижчий початковий рівень демпфування коливань непошкодженого зразка, тим вищою є інтенсивність збільшення його дисипативних властивостей, зумовлених наявністю тріщини. Крім того було показано, що у випадку, коли тріщина знаходиться в околі вузла напружень певної форми коливань (переріз зразка, в якому напруження є незначними або нульовими), характеристика демпфування коливань не буде змінюватись.

Експериментальне дослідження впливу інших видів пошкоджень або дефектів (типу отворів та вирізів) на дисипативні властивості зразка у своїй роботі продемонстрував С.Р. Ratcliffe [5]. Він зробив висновок про те, що чим ближче до закріплення зразка розташований отвір, то тим вища характеристика демпфування коливань зразка. В той же час наскрізний проріз, що займає 30 % перерізу зразка, зумовлює незначне (в межах похибки експерименту) зростання характеристики демпфування коливань. Очевидно, що причини зміни характеристик демпфування коливань зразків з отворами і вирізами з одного боку, та зразків із тріщинами втоми з іншого принципово різні. Можна припустити, що у випадках з отвором або прорізом зміна характеристики демпфування пов'язана головним чином із зміною потенційної енергії деформації зразка, а у випадку з тріщиною втоми – з суттєвим збільшенням дисипації енергії.

Суперечливими є результати досліджень впливу пошкодження на демпфуючу здатність повномасштабних конструкцій та їх елементів [12]. Істотне збільшення демпфування (до 80 %) виявлено при виникненні руйнування неподалік опори залізобетонного мосту [13, 14]. У той же час, результати вібраційних випробувань мосту показали [15], що зміна коефіцієнту демпфування була незначною з точки зору моніторингу критичної пошкоженості конструкції.

Випробування кесонів крила літака при виникненні в них тріщин втоми показали в одному випадку суттєве (до 3-х разів) збільшення коефіцієнту поглинання енергії [8], а в іншому – лише на 23 %. Очевидно, істотну роль тут грає як місце виникнення тріщини, її тип і орієнтація щодо осі конструкції.

Існують різні підходи до пояснення причин розсіювання енергії у тріщині. Так у дослідженнях [11, 16, 17] була висунута гіпотеза про визначальну роль зони пластичності у вершині тріщини. Науковцями R.J. Savage та P.C. Hewlett у роботі [18] було висловлено припущення, що головну роль відіграє тертя між поверхнями тріщини, що контактують. Так коефіцієнт демпфування статично стиснутої бетонної балки був майже в 2 рази нижче коефіцієнту демпфування ненавантаженої балки. У першому випадку, на думку авторів, мікротріщини були закриті і при коливаннях балки тертя у них не виникало. M. Krawczuk та W. Ostachowicz в своїй праці [12] припустили наявність двох джерел розсіювання енергії у тріщині: пластична зона у вершині тріщини та тертя її берегів. Нарешті S.D. Panteliou, T.G. Chondros та ін. розглядають у роботі [4] термопружний механізм розсіювання енергії у тілі з тріщиною.

Деякі вібраційні характеристики пружного тіла, наприклад, власні частоти і форми коливань, можна досліджувати аналітично або чисельно, використовуючи ті чи інші моделі. У той же час аналітичне дослідження дисипативних властивостей тіл із тріщиною утруднене через складність моделювання розсіювання енергії в тілі взагалі та в тріщині зокрема. Тому взаємозв'язок демпфуючої здатності зразків або елементів конструкцій з параметрами тріщини стосовно діагностики пошкодження вивчався лише на основі експериментальних досліджень, що обмежує кількість факторів, від яких залежить ступінь зміни характеристики демпфування коливань при виникненні пошкодження, а також діапазон їх варіювання. До таких факторів можна віднести: початковий рівень демпфування коливань досліджуваного об'єкта та характер амплітудної залежності характеристики демпфування, параметри (розміри та місцезнаходження) та тип тріщини, форма коливань, вид деформування тріщини. Очевидно, що експериментально виконати оцінку ефективності демпфування, як вібраційної характеристики пошкодження, за такої кількості факторів надзвичайно складно.

Професором А. Бовсуновським на основі результатів експериментальних досліджень демпфування згинальних коливань призматичних зразків з тріщиною втоми в роботі [17] була отримана узагальнена залежність розсіюваної енергії, що припадає на одиницю довжини фронту крайової тріщини нормального відриву від величини розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_I (КІН):

$$\overline{\Delta U}_c = 8,634675 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta K_1 + 3,87315 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta K_1^2 - 1,29826 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta K_1^3, \quad (1)$$

де розмірність величин є наступною: $\overline{\Delta U}_c - \text{Дж/м}$, $\Delta K_1 - \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$

Рівняння (1) дає можливість аналітично досліджувати вплив згаданих вище факторів на характеристики демпфування коливань стрижневих елементів з тріщиною, що закривається. Виняток становить лише вид деформування тріщини, оскільки рівняння (1) справедливе для тріщин нормального відриву.

Мета данної статті полягає в здійсненні оптимального оцінювання впливу параметрів тріщини і геометричних характеристик лопатки на ефективність зміни її демпфуючої здатності для вібраційної діагностики тріщин, а також в проведенні комплексного аналізу впливу поверхневої тріщини на характеристику демпфування лопатки турбіни.

Для досягнення поставленої мети слід вирішити наступні **завдання**:

- створити аналітичну модель для дослідження впливу поверхневої тріщини на характеристику демпфування лопатки турбіни, а також дослідження впливу параметрів тріщини і геометричних характеристик лопатки на ефективність зміни її демпфуючої здатності для вібраційної діагностики тріщин.
- провести експериментальну верифікацію аналітичної моделі.

Матеріал і результати досліджень

Аналітична модель для розрахунку характеристики демпфування лопатки з тріщиною

Демпфуюча здатність лопаток оцінювалася логарифмічним декрементом коливань (ЛДК). Для його визначення найчастіше використовують метод вільних загасаючих коливань або резонансної кривої [19]. Перевагою використання дисипативних властивостей лопатки для цілей вібродіагностики пошкодження є те, вона відноситься до так званих інтегральних методів діагностики, тобто характеризує стан об'єкта в цілому, і тому потребує відносно небагато часу для проведення.

Взаємозв'язок ЛДК з розсіяною енергією за цикл коливань лопатки без тріщини (δ) та з тріщиною (δ_c) можна представити наступним чином [17]:

$$\delta(\sigma) = \frac{\Delta U}{2U(\sigma)}, \quad (2)$$

$$\delta_c(\sigma) = \delta(\sigma) + \frac{\Delta U_c}{2U(\sigma)}, \quad (3)$$

де ΔU та ΔU_c – енергія, розсіяна у зразку без тріщини та безпосередньо у тріщині за цикл коливань, відповідно; U – потенційна енергія деформації лопатки; σ – амплітуда напружень.

Похибка представлення ЛДК у вигляді (2) і (3) не перевищує 10 % за умови, що $\delta < 0,4$, та відношення амплітуд вільних загасаючих коливань при визначенні ЛДК є меншим за 1,5 [11] (зауважимо, що у подальших дослідженнях рівень ЛДК не перевищував 0,003). У випадку, коли розглядається тріщина, що періодично закривається і відкривається (саме для такої тріщини справедливе рівняння (3)), потенційна енергія деформації лопатки U при виникненні тріщини не змінюється (похибка цього припущення є незначною при аналізованих відносних розмірах тріщини [20]). Тоді з рівняння (3) можна отримати відносну зміну ЛДК лопатки при виникненні тріщини:

$$\frac{\delta_c(\sigma)}{\delta(\sigma)} = 1 + \frac{\Delta U_c(\sigma)}{2\delta(\sigma)U(\sigma)}, \quad (4)$$

Потенційна енергія деформації лопатки визначається рівнянням, яке було отримано у припущенні, що поперечний переріз лопатки не змінюється по довжині:

$$U(\sigma) = \frac{LW_u^2}{8I_u E} \sigma^2, \quad (5)$$

де E – модуль пружності матеріалу лопатки; L – довжина лопатки; W_u і I_u – момент опору і момент інерції поперечного перерізу лопатки відносно головної осі u , відповідно (рисунок 1).

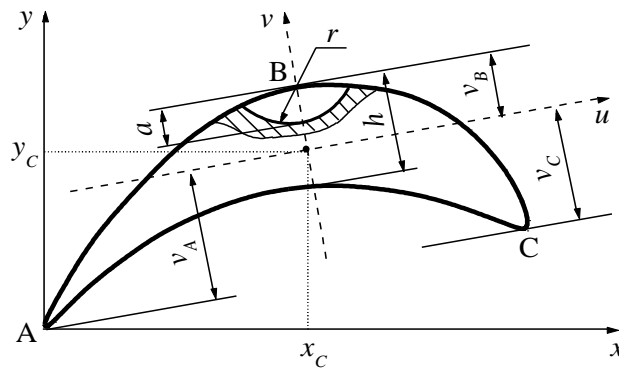


Рисунок 1 - Поперечний переріз лопатки з тріщиною

Для поверхневої тріщини нормального відриву (рисунок 1) у випадку, коли виконується співвідношення $r = 0,75h$ (h – найбільша висота поперечного перерізу лопатки) КІН є однаковим вздовж фронту тріщини і визначається рівнянням [21]:

$$K_I = \sigma_c \sqrt{\pi a} \cdot (1,13211 - 1,87278\gamma + 0,75369\gamma^2), \quad (6)$$

де a – глибина тріщини; $\gamma = a/h$ – відносна глибина тріщини ($\gamma \leq 0,65$); σ_c – механічні напруження в перерізі з тріщиною.

Тоді розсіяна в тріщині енергія визначається рівнянням:

$$\Delta U_c = C \cdot \Delta \bar{U}_c, \quad (7)$$

де $\Delta \bar{U}_c$ визначається рівнянням (1); C – довжина фронту тріщини, яка в даному випадку визначається за формулою:

$$C = 2 \cdot r \cdot \arccos\left(1 - \frac{a}{r}\right),$$

в якій r – радіус кола, що описує фронт тріщини.

Розмах КІН ΔK_I у рівнянні (1) у випадку тріщини, що закривається, визначається значенням КІН при амплітудному значенні напружень у перерізі з тріщиною у відповідності до рівняння (6).

Напруження у перерізі з тріщиною σ_c можна виразити через максимальні напруження σ для певної форми коливань [11]:

$$\sigma_c(L_c) = \frac{1}{2} \sigma \cdot \left\{ \left[\operatorname{ch}\left(kL \frac{L_c}{L}\right) + \cos\left(kL \frac{L_c}{L}\right) \right] - \frac{(\operatorname{chkL} + \cos kL) \cdot \left[\operatorname{sh}\left(kL \frac{L_c}{L}\right) + \sin\left(kL \frac{L_c}{L}\right) \right]}{\operatorname{shkL} + \sin kL} \right\}, \quad (8)$$

де L_c – відстань перерізу з тріщиною від защемлення; kL – рішення частотного рівняння для стрижнеподібного тіла з тріщиною [22].

Представивши амплітудну залежність ЛДК непошкодженої лопатки, наприклад, у вигляді:

$$\delta(\sigma) = a_0 + a_1\sigma + a_2\sigma^2 + \dots + a_n\sigma^n, \quad (9)$$

можна визначити ЛДК лопатки з тріщиною за формулою (3) або відносну зміну характеристики демпфування за формулою (4).

Представлена модель може бути застосована для діагностики різних видів та параметрів, використовуючи різні форми коливань лопаток з різним початковим рівнем демпфування коливань.

Експериментальна верифікація моделі

Перевірка достовірності наведеної вище аналітичної моделі була виконана на прикладі лопатки компресора газотурбінного двигуна Д-36, виготовленої з титанового сплаву ВТ-3-1 (рисунок 2). Геометричні характеристики її поперечного перерізу були визначені на основі аналітичного підходу. Зокрема, було визначено, що головний момент інерції лопатки відносно осі u дорівнює $I_u = 819,3 \text{ мм}^4$. Момент опору був розрахований, виходячи з величини $v_B = 3,83 \text{ мм}$ ($W_u = I_u / v_B$).

Розрахунки ЛДК лопатки з тріщиною базувались на використанні рівнянь (1) - (9), в яких було прийнято $L = 110 \text{ мм}$; $L_c = 10 \text{ мм}$; $h = 6 \text{ мм}$; $a = 1,8 \text{ мм}$. Амплітудна залежність ЛДК для непошкодженої лопатки з сплаву ВТ-3-1 [9] була апроксимована степеневим поліномом другого ступеня (тут ЛДК подається у відсотках, а напруження – у МПа).

$$\delta(\sigma) = 0,06489 + 0,00271 \cdot \sigma - 2,18696 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^2, \quad (10)$$

Експериментальні дослідження цієї лопатки [9] продемонстрували, що поверхнева тріщина з розмірами $2c = 9,7 \text{ мм}$ і $a = 1,8 \text{ мм}$ (рис. 3), яка становить 4 % площі перерізу, зумовлює суттєве відносне збільшення ЛДК лопатки. Розрахунок амплітудної залежності ЛДК лопатки з тріщиною такої ж глибини (рисунок 3, крива 3) демонструє здатність запропонованої аналітичної моделі достатньо точно прогнозувати вплив поверхневої тріщини нормального відриву на характеристику демпфування коливань лопаток турбін, незважаючи на доволі складну геометрію поперечного перерізу лопатки турбіни.

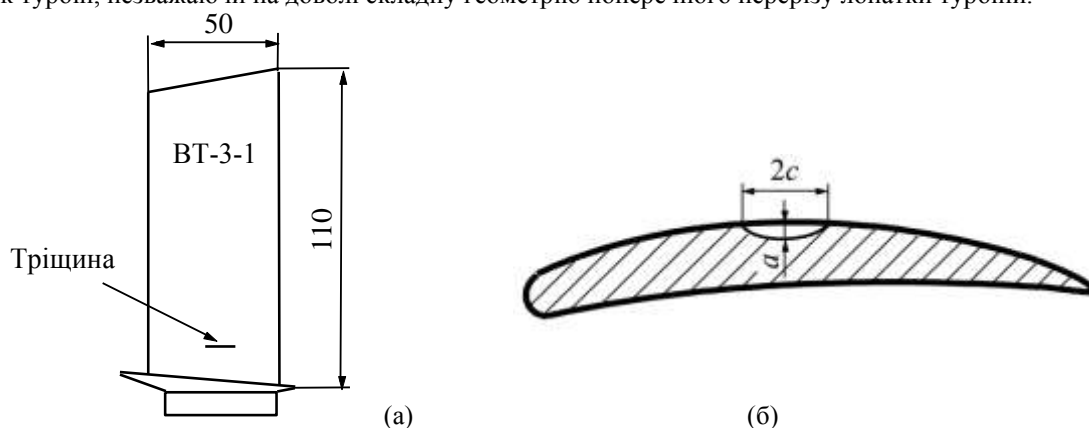


Рисунок 2 - Лопатка турбіни з сплаву ВТ-3-1 (а) і поперечний переріз з тріщиною (б)

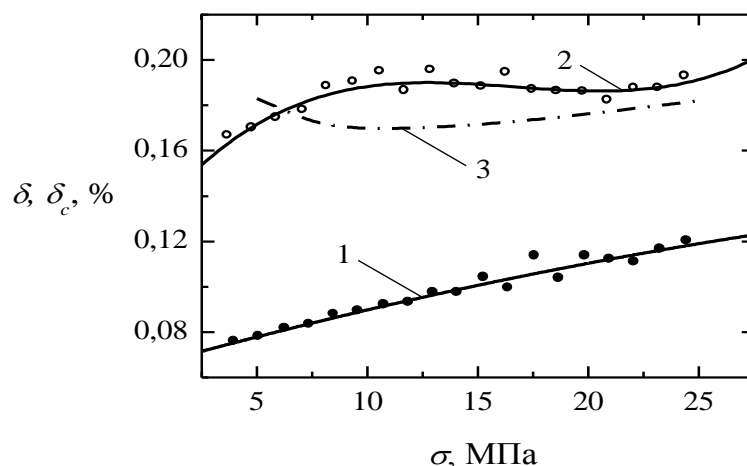


Рисунок 3 - Амплітудні залежності ЛДК лопатки з сплаву ВТ-3-1:
(1) – $a = 0 \text{ мм}$; (2) – $a = 1,8 \text{ мм}$; (3) – $a = 1,8 \text{ мм}$ (розрахунок)

Треба зауважити, що визначення характеристики демпфування для цілей вібродіагностики пошкодження проводиться за відносно низьких амплітуд напружень. Це полегшує проведення експерименту і попереджує подальший ріст тріщини у процесі її діагностики у лопатках турбін.

Результати розрахунку

Аналітичні дослідження впливу параметрів тріщини і геометричних характеристик лопатки на характеристику демпфування першої форми її коливань були виконані стосовно лопатки турбіни К-1000-60/3000 (Рисунок 1), виготовленої зі сталі 20Х13. В розрахунках було прийнято $L = 112$ мм; $h = 18,64$ мм; $I_u = 67971,4$ мм⁴; $v_b = 14,5$ мм (дві останні характеристики були визначені на основі аналітичного підходу).

Дані про амплітудні залежності ЛДК призматичних зразків зі сталі 20Х13 в різних станах за деформації чистого згину були взяті з довідника Г.С. Писаренка [19] і апроксимовані нижче наведеними степеневими поліномами вигляду:

$$\delta(\sigma) = 0,06285 + 0,01542 \cdot \sigma - 1,41071 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma^2, \tag{11}$$

$$\delta(\sigma) = 0,02878 + 0,0061 \cdot \sigma - 2,69626 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma^2 + 5,60906 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma^3, \tag{12}$$

Рівняння (11) описує відповідну залежність для сталі у стані постачання (стан 1), а рівняння (12) – після гартування з відпуском (стан 2). У першому випадку початковий рівень демпфування коливань зразків удвічі вищий, порівняно з термообробленою сталлю, що відкриває можливість дослідити його вплив на чутливість характеристики демпфування коливань до наявності тріщини.

Як видно з амплітудних залежностей (рисунок 4 і 5), вплив навіть невеликої тріщини ($a/h = 0,1$), що знаходиться біля защемлення лопатки ($L_c = 0$), на ЛДК є значним. Так для лопатки з сталі у стані 1 зростання ЛДК досягає 1,75 рази, а у стані 2 – до 3-х раз. Це означає, що зміна характеристики демпфування коливань є доволі чутливою діагностичною ознакою пошкодження типу тріщини. У той же час початковий рівень демпфування впливає на чутливість діагностики, а саме чим вищим є цей рівень, тим менш чутливою є зміна характеристики демпфування коливань до пошкодження.

Чутливість характеристики демпфування коливань лопатки до пошкодження є набагато вищою, ніж власних частот коливань. За означених вище параметрів тріщини ($a/h = 0,1$; $L_c = 0$) зміна власної частоти першої форми коливань лопатки досягає лише 1 %. Деякою перевагою цієї вібродіагностичної ознаки пошкодження є те, що її чутливість практично не залежить від початкового рівня демпфування коливань лопатки.

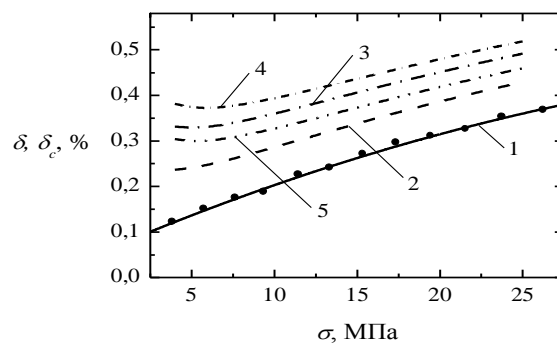


Рисунок 4 - Амплітудні залежності лопатки з сталі 20Х13 (стан 1):
(1) – $a/h = 0$; (2) – $a/h = 0,1$; (3) – $a/h = 0,2$; (4) – $a/h = 0,4$; (5) – $a/h = 0,6$ ($L_c = 0$)

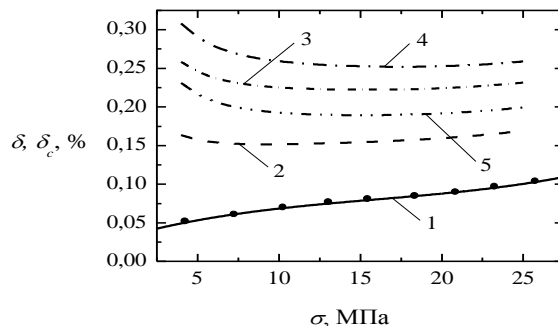


Рисунок 5 - Амплітудні залежності лопатки з сталі 20Х13 (стан 2):
(1) – $a/h = 0$; (2) – $a/h = 0,1$; (3) – $a/h = 0,2$; (4) – $a/h = 0,4$; (5) – $a/h = 0,6$ ($L_c = 0$)

Характерною особливістю амплітудних залежностей ЛДК лопатки з тріщиною є деяке збільшення характеристики демпфування в області малих амплітуд напружень (рисунок 3-5), чого не спостерігається

за результатами експериментальних досліджень (рисунок 3). Ця якісна різниця між даними експерименту і результатами розрахунку може бути пояснена ефектом закриття тріщини, який пов'язаний з утворенням залишкового пластично-деформованого матеріалу на берегах втомної тріщини. Таким чином, розкриття тріщини, а отже, і розсіяння енергії в ній, за малих амплітуд напружень може не відбутися. Аналітична модель не враховує ефект закриття тріщини, тому розсіяння енергії в тріщини має місце за найменших амплітуд напружень.

Вплив тріщини, що розглядається, на характеристику демпфування коливань лопатки залежить від амплітуди напружень, за яких здійснюється вібродіагностика (рисунок 6 і 7). Як видно із залежностей, чим менша амплітуда напружень, за якої визначається ЛДК лопатки з тріщиною, тим вищою є чутливість вібродіагностичної ознаки пошкодження, що задовольняє вимогам практичної діагностики. Разом з тим навіть за відносно високих амплітуд напружень ($\sigma \leq 25$ МПа) зміна ЛДК лопатки при виникненні та рості тріщини є достатньо значною для надійного діагностування пошкодження і суттєво перевищує зміну власних частот коливань лопатки.

В той же час, відносна зміна ЛДК лопатки не зростає монотонно із ростом тріщини. При досягненні значення відносної глибини тріщини величини ($a/h \approx 0,35$) відносна зміна ЛДК починає спадати. Хоча рівень цього спадання не є критичним, його треба враховувати при практичному застосуванні характеристик демпфування для діагностики пошкодження.

Причиною деякого зниження чутливості вібродіагностики пошкодження є те, що КІН відповідно до рівняння (6) залежить від напружень у перерізі з тріщиною (σ), глибини тріщини (a), а також від значення функції, що виражає залежність КІН від відносної глибини тріщини (γ). Остання є монотонною спадною функцією. Саме це зумовлює утворення екстремумів залежностей, представлених на рисунках 6 і 7, оскільки при досягненні тріщиною певного рівня, інтенсивність росту напружень і тріщини не може компенсувати інтенсивність спадання згаданої функції.

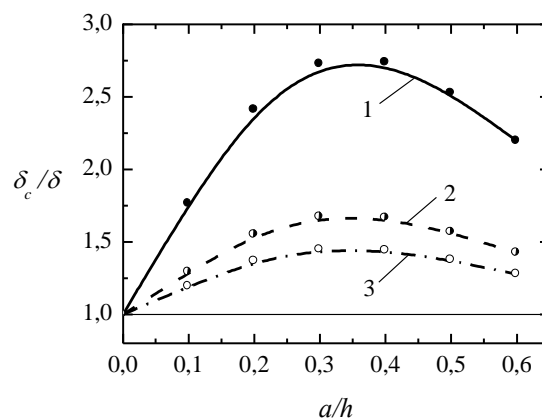


Рисунок 6 - Залежності відносної зміни ЛДК лопатки з сталі 20X13 (стан 1) від розміру тріщини: (1) – $\sigma = 5$ МПа; (2) – $\sigma = 15$ МПа; (3) – $\sigma = 25$ МПа ($L_c = 0$)

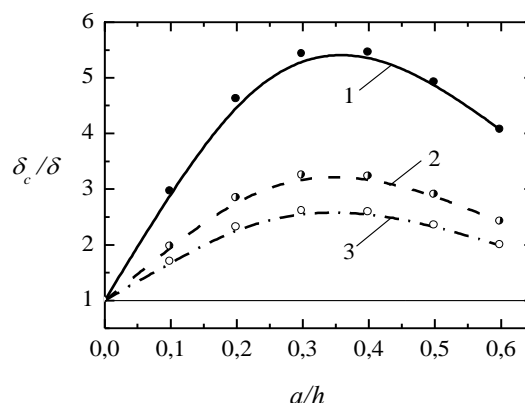


Рисунок 7 - Залежності відносної зміни ЛДК лопатки з сталі 20X13 (стан 2) від розміру тріщини: (1) – $\sigma = 5$ МПа; (2) – $\sigma = 15$ МПа; (3) – $\sigma = 25$ МПа ($L_c = 0$)

Рисунок 8 ілюструє вплив місцезнаходження тріщини на власну частоту першої форми коливань лопатки. Як видно, чим далі тріщина від защемлення, тим меншим є її вплив на власну частоту коливань.

У розглянутому діапазоні значень місцеположення тріщини зменшення відносної зміни власної частоти складає від 2,14 при ($a/h = 0,1$) до 2,94 раз при ($a/h = 0,3$). Разом з тим чутливість зміни власної частоти коливань лопатки до наявності найменшої розглянутої тріщини ($a/h = 0,1$), що знаходиться посередині лопатки ($L_c = 0,5$) залишається достатньо високою для надійного діагностування тріщини: у цьому випадку відносна зміна частоти досягає 40 %.

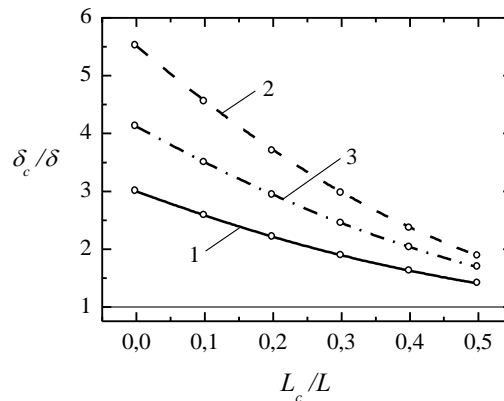


Рисунок 8 - Залежності відносної зміни ЛДК лопатки з сталі 20X13 (стан 2) від місцеположення тріщини: (1) – $a/h = 0,1$; (2) – $a/h = 0,3$; (3) – $a/h = 0,6$ ($\sigma = 5$ МПа)

Вплив тріщини на власні частоти коливань лопатки в значній мірі визначається тим, наскільки тріщина змінює жорсткість (піддатливість) лопатки. Очевидно, що при першій формі коливань лопатки тріщина, що знаходиться біля защемлення, в найбільшій мірі змінює жорсткість лопатки. Для першої форми коливань чим далі тріщина від защемлення, тим меншим є її вплив на жорсткість лопатки, а, отже, і на власну частоту. У разі застосування для вібродіагностики вищих форм коливань, необхідно мати на увазі, що чутливість такої діагностики падає до нуля, якщо тріщина знаходиться в околі вузла напружень цієї форми коливань (вузол напружень – це переріз лопатки, у якому напруження при коливаннях за вищими формами дорівнюють нулю). Саме через цю обставину одним з шляхів підвищення надійності вібродіагностики тріщини в лопатці полягає у використанні даних про зміну характеристики демпфування коливань для декількох форм коливань.

На рисунку 9 показано вплив тріщини на власну частоту першої форми коливань лопатки різної довжини. Тут прийнято, що $L_0 = 112$ мм. Аналіз залежності, наведеної на рисунку 9, дозволяє зробити порівняльну оцінку впливу жорсткості лопатки, яка змінюється за рахунок її довжини, на чутливість характеристики демпфування коливань до наявності тріщини. Так при п'ятикратному збільшенні довжини лопатки чутливість зміни характеристики демпфування першої форми коливань лопатки до наявності тріщини відносною глибиною $a/h = 0,3$ зменшується у 2,85, 2,22 і 1,95 раз при амплітудах напружень $\sigma = 5, 15$ і 25 МПа, відповідно, але залишається на достатньому рівні для надійної діагностики тріщини. Це означає, що вібродіагностика тріщин на основі зміни характеристики демпфування коливань лопатки є прийнятною для практичного застосування і для відносно довгих лопаток.

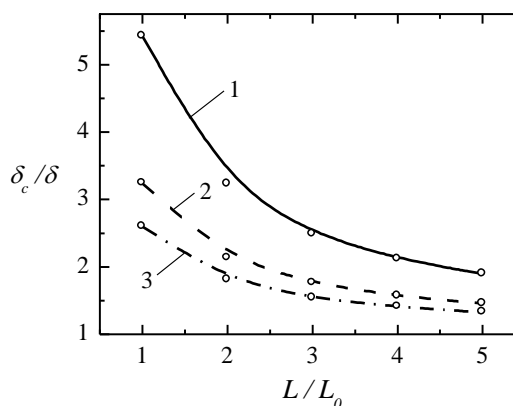


Рисунок 9 - Залежності зміни відносної зміни ЛДК лопатки з сталі 20X13 (стан 2) від відносної довжини лопатки при різній амплітуді напружень: (1) – $\sigma = 5$ МПа; (2) – $\sigma = 15$ МПа; (3) – $\sigma = 25$ МПа ($a/h = 0,3$; $L_c = 0$)

Висновки

Вібродіагностика лопаток турбін, заснована на зміні характеристик демпфування коливань, є достатньо чутливою для виявлення відносно невеликих тріщин, розмір яких не становить загрози для цілісності лопатки. Чутливість такої діагностики є набагато вищою, ніж тої, що базується на зміні власних частот коливань. Разом з тим, ефективність характеристик демпфування коливань для діагностування пошкодження лопаток турбін дещо знижується при збільшенні початкового рівня демпфування коливань лопатки (тобто лопатки у непошкодженому стані) і піддатливості лопатки. Враховуючи, що матеріали, які використовуються для виготовлення сучасних парових турбін і газотурбінних двигунів, мають доволі низьку демпфуючу здатність, використання зміни характеристик демпфування коливань лопаток в якості вібродіагностичної ознаки пошкодження є перспективним.

Подальша робота передбачає дослідження впливу тріщин, що виникають на кромках лопаток (точки А і С на рисунку 1) на характеристику демпфування коливань лопатки.

A. Bovsunovsky¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0001-9562-0250

O. Nosal¹, Ph.D. student, ORCID 0000-0003-3253-9652

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

EFFICIENCY OF USE CHARACTERISTICS OF DAMPING OF TURBINE BLADES FOR CRACK DIAGNOSTICS

During operation, turbine blades are subjected to intense mechanical (static and dynamic) and thermal loads in a corrosive and aggressive environment. The consequence of such loading is the gradual accumulation of diffuse fatigue damage, which eventually becomes localized as a fatigue crack. When the crack reaches a critical size, there is a danger of blade destruction with catastrophic consequences for the entire turbine. Timely detection of blade damage is possible at the stage of turbine repair using vibration diagnostics.

The purpose of the work is to create an analytical approach that allows modeling the change in the vibration damping characteristics of a turbine blade with a fatigue crack, as well as the study of the influence of the crack parameters and the geometric parameters of the blade on the vibration damping characteristics of the blade to assess the effectiveness of vibration diagnostics of damage.

The results of the study of the effect of a surface transverse crack on the damping characteristics of turbine blade oscillations are presented. As a result of the experimental and analytical study, the effect of the crack parameters (size and location of the crack) and the geometric parameters of the blade on the damping characteristics of blade vibrations was established.

Vibration diagnostic of turbine blades, based on a change in the damping characteristics of its vibrations, is a sufficiently effective diagnostic feature for detecting relatively small cracks, the size of which does not pose a threat to the integrity of the blades.

Given that the materials used for the manufacture of modern steam turbines and gas turbine engines have a rather low damping capacity, the use of changes in the damping characteristics of blade oscillations as a vibration diagnostic sign of damage is promising.

Further work involves the study of the effect of cracks that appear on the edges of the blades on the damping characteristics of blade vibrations

Keywords: vibration diagnosis, turbine blades, damping characteristics, damage, load, crack.

References

1. Vasinyuk, I.M., Khamaza, L.A. A criterional evaluation of the fatigue strength of metals // *Strength of Materials*. 1973. Vol.5(4). P.471–474. <https://doi.org/10.1007/BF00762821>.
2. Sidorov, O.T., Rakshin, A.F. & Fenyuk, M.I. Determination of the zones of distribution of cracks in flexible samples // *Strength of Materials*. 1983. Vol.15(6). P.858–860. <https://doi.org/10.1007/BF01524780>.
3. Rytter A., Brincker R., Kirkegaard P.H. An experimental study of the modal parameters of a cantilever // *Fractura & Dynamics*, Paper No.37, Department of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, Denmark, 1992, 76 p.
4. Panteliou S.D., Chondros T.G., Argyrakis V.C., Dimarogonas A.D. Damping factor as an indicator of crack severity // *J. of Sound and Vibration*. 2001. Vol. 241(2). P. 235-245. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2000.3299>.
5. Ratcliffe C.P. Damage detection using a modified Laplacian operator on mode shape data // *J. of Sound and Vibration*. 1997. Vol. 204(3). P. 505-517. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.0961>.

6. Sujatha C., Thanooja S., Hanumantha M., Swarnamani S. A study on change in modal parameters with damage in composite specimens // Proc. of the 15th IMAC, Orlando, Florida, USA. 1997. Vol. 2. P. 1607-1613.
7. Lai J.Y., Young K.F. Dynamics of graphite/epoxy composite under delamination fracture and environmental effects // *J. of Composite Structures*. 1995. Vol. 30(1). P. 25-32.
8. Sidorov, O.T. Investigation of the dynamic characteristics of a part for evaluating its technical condition // *Strength of Materials*. 1983. Vol. 15(6). P. 872–874. <https://doi.org/10.1007/BF01524784>.
9. Bovsunovsky A., Nosal O. Highly sensitive methods for vibration diagnostics of fatigue damage in structural elements of aircraft gas turbine engines // *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 35. P. 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.12.050>.
10. Salane H.J., Baldwin J.W. Identification of modal properties of bridges // *ASCE J. of Structural Engineering*. 1990. Vol 116(7). P. 2008-2021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:7\(2008\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:7(2008)).
11. Bovsunovskii, A.P. On the efficiency of using damping characteristics of structural components for damage diagnostics // *Strength of Materials*. 2002. Vol. 34(6). P. 560–569. <https://doi.org/10.1023/A:1022022601601>.
12. Krawczuk M., Ostachowicz W. Damage indicators for diagnostic of fatigue cracks in structures by vibration measurements - a survey // *Mechanica teoretyczna i stosowana*. 1996. Vol. 34(2). P. 307-326. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05615-8_4.
13. Agardh L. Modal analyses of two concrete bridges in Sweden // *Structural Engineering International*. 1991. Vol. 1(1). P. 35-39.
14. Kennedy J.B., Grace N.F. Prestressed continuous composite bridges under dynamic loading // *ASCE J. of Structural Engineering*. 1990. Vol. 116(6). P. 1660-1678. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:6\(1660\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:6(1660)).
15. Baldwin J.W., Salane H.J., Duffield R.C. Fatigue test of a three span composite highway bridge // Final Report 73-1, Missouri Highway Research Programme, Colambia, Mo., 1978.
16. Rytter A., Brincker R., Pilegaard L. Vibrational based inspection of civil engineering structures // *Bygningssstatistiske Meddelelser*. 1991. Vol. 62(4). P. 79-110.
17. Bovsunovsky A.P. The mechanisms of energy dissipation in the non-propagating fatigue cracks in metallic materials // *Engineering fracture mechanics*. 2004. Vol.71(16-17). P.2271-2281. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2004.02.003>.
18. Savage R.J., Hewlett P.C. A new NDT method for structural integrity assessment // *NDT International*. 1978. Vol. 11. P. 61-66. [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(78\)90064-0](https://doi.org/10.1016/0308-9126(78)90064-0).
19. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. Vibration-absorbing properties of structural materials. Directory. Kyiv: Naukova dumka, 1071. 375 p.
20. Bovsunovskii, A.P. On the Mechanism of Energy Dissipation in a Fatigue Crack // *Strength of Materials*. 2002. Vol. 34(5). P. 482–496. <https://doi.org/10.1023/A:1021002728045>.
21. Stress intensity factors handbook. (1987) In 3 vol. Vol. 2. - (Editor-in-chif Y. Murakami). The Society of Materials Sci., Japan and Pergamon Press.
22. Matveev V.V., Bovsunovsky A.P. Vibration-based diagnostics of fatigue damage of beam-like structures // *J. of Sound and Vibration*. 2002. Vol. 249(1). P. 23-40. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3816>.
23. Pippin R., Kolednik O., Lang M. A mechanism for plasticity-induced crack closure under plane strain conditions // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 1994. Vol. 17(6). P. 721–726. [doi:10.1111/j.1460-2695.1994.tb00269.x](https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1994.tb00269.x).

Надійшла: 08.06.2024

Received: 08.06.2024

ВЕРИФІКАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИФАЗНОГО МОСТОВОГО КОМПЕНСАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ОДНІЄЮ КОМУТУЮЧОЮ ЛАНКОЮ

Розглядається питання достовірності результатів аналітичного розрахунку випереджаючого кута регулювання силових електричних вентилів та кута регулювання трифазного мостового компенсаційного перетворювача електричної енергії з однією комутуючою ланкою. Зазначається, що величина цих кутів визначає спроможності перетворювача щодо генерації реактивної енергії разом з енергоживленням споживача електричної енергії постійного струму. Виходячи із складності аналітичного розрахунку зазначених характеристик, актуальним є питання верифікації отриманих результатів, що також є підтвердженням адекватності застосованої методики дослідження. Як інструмент досягнення мети роботи автори використовують схемотехнічне моделювання у пакеті Місто Сар. Докладно описана методика моделювання, наведені результати моделювання декількох режимів роботи перетворювача, проведено аналіз цих результатів. Порівняльний аналіз числових значень кутів регулювання і комутації, отриманих в результаті аналітичного розрахунку і схемотехнічного моделювання одних і тих же режимів роботи перетворювача, показав, що розбіжність не перевищує 5%. Це свідчить про адекватність застосованої методики моделювання і прийнятну точність результатів аналітичних розрахунків. Бібл. 3, рис. 3, табл. 3.

Ключові слова: конденсаторна батарея, схемотехнічна модель, комутуюча напруга, електричний вентиль, кут комутації, кут регулювання.

Вступ. Основними енергетичними характеристиками будь-якого компенсаційного перетворювача є кут комутації γ і випереджаючий кут регулювання α . Розрахунок величини зазначених кутів у конкретному робочому режимі перетворювача є складною математичною задачею. Причина цього у тому, що величина цих кутів залежить від низки показників робочого режиму: величини випрямленого струму (струму навантаження I_d), ємності фази комутуючих конденсаторів C , індуктивності кола змінного струму L_r , умов регулювання робочого режиму транзисторами комутуючої ланки θ та т. ін. Окрім того величини зазначених кутів залежать одна від одної.

Для аналітичного розрахунку кутів комутації і регулювання необхідно провести дослідження електромагнітних процесів у перетворювачі. На основі цих досліджень отримати закономірності зміни струмів силових електричних вентилів в інтервалі комутації та отримати вираз комутуючої напруги у момент комутації. Використовуючи зазначені співвідношення скласти систему нелінійних рівнянь і розв'язати її відносно невідомих кутів γ і α . Звісно, при таких складних дослідженнях і розрахунках виникає питання верифікації отриманих результатів.

Мета роботи. На прикладі трифазного мостового компенсаційного перетворювача з однією комутуючою ланкою здійснити верифікацію величини кутів комутації і регулювання, застосовуючи результати схемотехнічного моделювання робочих режимів досліджуваного перетворювача.

Результати досліджень. Схема трифазного мостового компенсаційного перетворювача з однією комутуючою ланкою наведена на рис. 1.

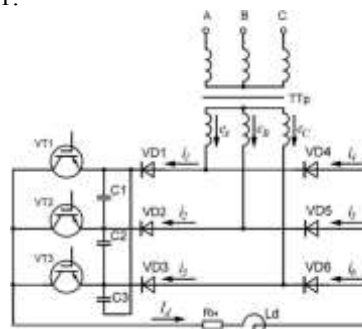


Рисунок 1 - Схема трифазного мостового компенсаційного перетворювача з однією комутуючою ланкою

Перетворювач відноситься до нового покоління пристроїв силової електроніки компенсаційного типу, створення та дослідження яких ведеться у Національному технічному університеті України «КПІ ім. Ігоря Сікорського» [1]. До речі, подібні дослідження ведуться і в інших країнах [2].

Досліджуваний перетворювач містить у своєму складі трифазний трансформатор (ТТр), дві трифазні групи силових електричних вентилів (VD1 – VD3 та VD4 – VD6), комутуючу ланку, яка складається з трифазної конденсаторної батареї і трифазної групи повністю керованих приладів (типів GTO, IGCT або IGBT) та навантаження R_n і L_d .

Система ЕРС трифазного перетворювального трансформатора (ТТр) схеми рис. 1 є стандартною трифазною системою прямого чергування фаз:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin(\vartheta + \pi / 6 + \psi); \\ e_B &= E_m \sin(\vartheta - \pi / 2 + \psi); \\ e_C &= E_m \sin(\vartheta + 5\pi / 6 + \psi), \end{aligned} \quad (1)$$

де E_m - амплітуда вторинної фазної ЕРС перетворювального трансформатора; ϑ – поточна змінна; ψ – початкова фаза напруги при включенні вентиля.

Анодна група силових електричних вентилів VD4 – VD6 працює у звичайному (некомпенсаційному) режимі. Умови їх роботи такі ж, як і у трифазному мостовому випрямлячі за схемою Ларіонова.

Компенсаційний режим роботи мають силові електричні вентиля катодної групи VD1 – VD3. У контур їхньої комутації входить напруга конденсаторів комутуючої ланки, яку називають комутуючою напругою. Завдяки наявності цієї напруги силові електричні вентиля катодної групи вступають в роботу раніше моменту природньої комутації. Тобто мають випереджаючий кут регулювання α , за рахунок чого перетворювач набуває здатності генерувати реактивну енергію. Такий електромагнітний процес докладно розглянутий в [3].

У зазначеній публікації наведена нормована узагальнена система рівнянь для розрахунку кутів регулювання і комутації:

$$1 = N + \frac{\cos(\gamma - \alpha)}{x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1)} - \left(N + \frac{\cos \alpha}{x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1)}\right) \cos \omega_{0^*} \gamma - \frac{\sin \alpha}{\omega_{0^*} x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1)} \sin \omega_{0^*} \gamma ;$$

$$\sin \alpha = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(M + \frac{1}{2} \int_0^\gamma i_{k^*} d\vartheta\right).$$

Для розв'язку цієї системи використано метод Н'ютона. Причому, досліджується режим роботи перетворювача при керуванні транзисторами комутуючої ланки в межах своєї фази. У зазначеному режимі в наведеній вище системі рівнянь, який розглядається як приклад застосування верифікації аналітичного розрахунку, $N = 0$, а $M = \theta / 2$.

Сама ж система рівнянь, яка підлягає розв'язку, після деяких математичних перетворень, набуває вигляду:

$$F(\alpha, \gamma) = \cos(\gamma - \alpha) - \cos \alpha \cdot \cos \omega_{0^*} \gamma - (\sin \alpha \cdot \sin \omega_{0^*} \gamma) / \omega_{0^*} - x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1) ;$$

$$G(\alpha, \gamma) = \theta \cdot x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1) + \sin(\gamma - \alpha) - \sin \alpha + \sin \alpha (\cos \omega_{0^*} \gamma + 1) / \omega_{0^*}^2 - (\cos \alpha \cdot \sin \omega_{0^*} \gamma) / \omega_{0^*} .$$

У табл.1 наведені результати аналітичного розрахунку зазначеного режиму роботи трифазного мостового компенсаційного перетворювача, які отримані шляхом застосування методу Н'ютона до розв'язку системи двох наведених вище рівнянь.

Таблиця 1 – Дані аналітичного розрахунку

	ω_{0^*}	x_{γ^*}	Θ радіани	α градуси	γ градуси
1	3.1	0.058	0.2	5.20	20.60
2	3.1	0.058	0.4	8.39	20.60
3	3.1	0.059	0.6	11.88	20.84
4	3.1	0.060	0.8	15.52	21.12
5	3.1	0.061	1.0	19.34	21.45
6	3.1	0.062	1.2	23.38	21.86
7	3.1	0.062	1.4	27.18	22.12
8	3.1	0.062	1.6	31.13	22.45

Математичне моделювання режимів роботи трифазного мостового компенсаційного перетворювача, що досліджується, здійснене з використанням системи схемотехнічного моделювання Місто Сар.

Схемотехнічна модель трифазного мостового компенсаційного перетворювача, із зазначенням параметрів елементів, що відповідають досліджуваному режиму, наведена на рис. 2. Вона має такі основні складові:

1. Перетворювальний трансформатор є трифазним двообмотковим пристроєм, що живить перетворювач електричної енергії, створюючи на вторинних обмотках симетричну трифазну систему ЕРС прямого чергування фаз. ЕРС обмоток реалізовані за допомогою джерел синусоїдної напруги фаз А, В, С.

Амплітудне значення фазної ЕРС вторинної обмотки перетворювального трансформатора складає 100 В, а початкова фаза цієї напруги у фазі А дорівнює 0.523 рад (чи $\pi/6$). Тож трифазна система ЕРС вторинної обмотки перетворювального трансформатора варіантів схемотехнічної моделі досліджуваного перетворювача запишеться так:

$$e_A = 100 \sin(\vartheta + 0.523);$$

$$e_B = 100 \sin(\vartheta - 1.57);$$

$$e_C = 100 \sin(\vartheta + 2.618),$$

що відповідає співвідношенню (1), яке застосовувалось при теоретичному дослідженні процесів.

Індуктивності обмоток трансформатора, приведені до його вторинної обмотки, реалізовані за допомогою компоненти «INDUCTOR». При моделюванні режиму миттєвої комутації вони мають нульове значення, а при моделюванні інших режимів їх величина змінюється, забезпечуючи необхідне значення власної частоти контуру комутації, яке відповідає досліджуваному режиму роботи перетворювача.

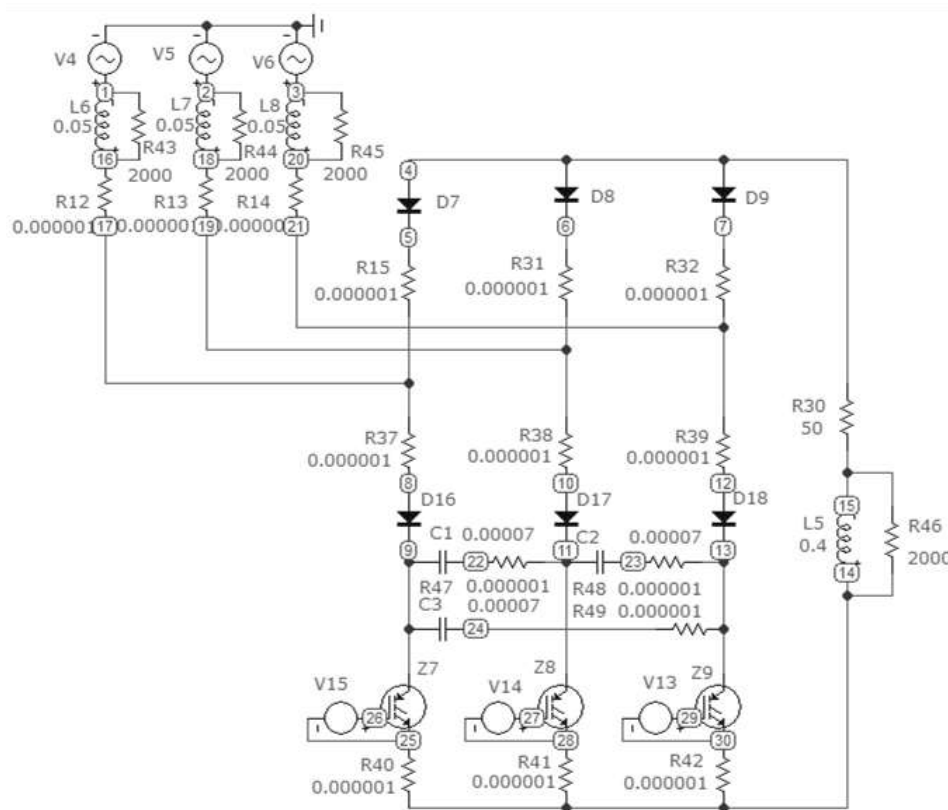


Рисунок 2 – Схемотехнічна модель трифазного мостового компенсаційного перетворювача з однією комутуючою ланкою

Усі резистори реалізовані за допомогою компоненти «RESISTOR».

2. Діоди реалізовані за допомогою компоненти «DIODE». Характеристика діодів типу MPN3700 запозичена з бібліотеки компонентів.

3. Транзистори комутуючої ланки IGBT реалізовані за допомогою компоненти «IRG4PC50W_IR». Використана характеристика транзисторів IGBT з бібліотеки компонентів типу IXGT40N60C2.

4. Джерела для формування імпульсів керування IGBT комутуючої ланки реалізовані компонентом «PULSE SOURCE». Вони генерують імпульси практично прямокутної форми з амплітудою 8 В.

5. Конденсатори комутуючої ланки реалізовані компонентом «CAPACITOR».

6. Навантаження схемотехнічної моделі перетворювача є активно-індуктивним: активний опір реалізований за допомогою компоненти «RESISTOR», індуктивний опір реалізований за допомогою компоненти «INDUCTOR». У режимі роботи, результати дослідження якого наведені у поточній публікації, активний опір навантаження дорівнює 50 Ом.

При моделюванні режиму роботи трифазного мостового компенсаційного перетворювача приймалося, що ємність фази конденсаторів комутуючої ланки дорівнює $C = 0.00007$ Ф, а приведена індуктивність фази вторинної обмотки перетворювального трансформатора дорівнює $L_{\gamma} = 0.005$ Гн. Якщо моделюється режим роботи з урахуванням протяжності комутаційного процесу, реактивний опір фази кола змінного струму складає $x_{\gamma} = \omega L_{\gamma} = 314 \cdot 0.005 = 1.57$ Ом. За зазначених числових даних змодельованого робочого режиму, власна частота контуру складає:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{3L_{\gamma}C}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0.005 \cdot 0.00007}} = 975.9 \text{ рад}.$$

Нормоване значення цієї частоти $\omega_{0*} = 975.9 / 314 = 3.1$.

Також урахуємо [3], що базисний струм розраховується як $I_{\sigma} = \sqrt{3}E_m / 2x_{\gamma}$, де x_{γ} - індуктивний опір фази перетворювального трансформатора, приведене до його вторинної обмотки, то його числове значення у моделях трифазного мостового компенсаційного перетворювача складає $I_{\sigma} = \sqrt{3} \cdot 100 / 2 \cdot 1.57 = 55.1A$.

Методика дослідження енергетичних характеристик перетворювача полягає у аналізі роздруківки кривих струмів силових електричних вентилів і напруг, отриманих за показниками робочого режиму, що досліджується.

Розглянемо її докладно на прикладі дослідження режиму роботи трифазного мостового компенсаційного перетворювача, коли затримка подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки $\Theta = 1.0$. Роздруківка, необхідних для характеристики цього режиму даних, представлена на рис.3.

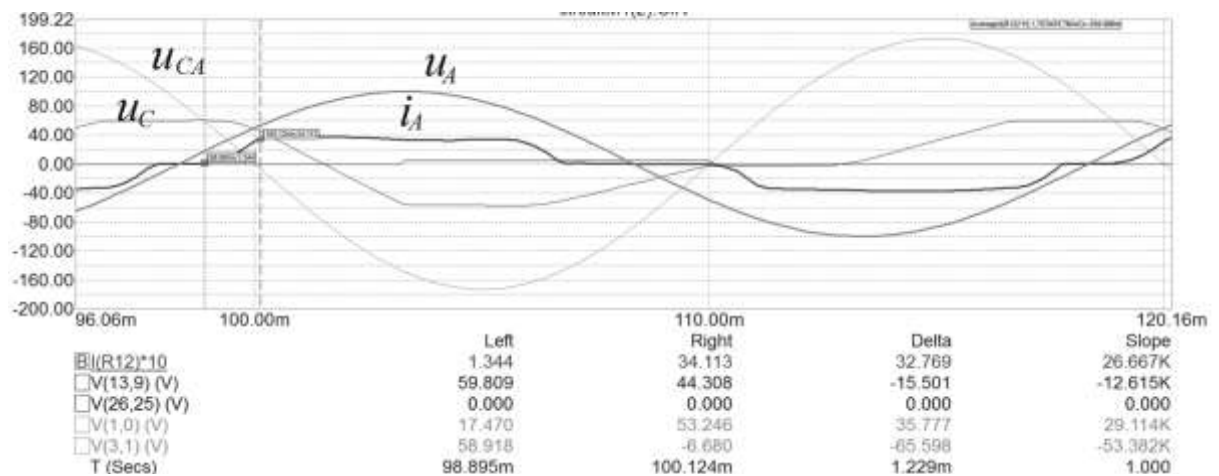


Рисунок 3 – Результати моделювання щодо кутів регулювання і комутації силових електричних вентилів катодної групи ($\Theta = 1.0$)

На рисунку ліва суцільна вертикальна лінія позначає момент початку комутаційного процесу, у який лінійна напруга вторинної обмотки перетворювального трансформатора зрівняється з напругою конденсатора.

Числове значення цього моменту – нижній рядок T(Secs) колонки даних під Left. Інші числові дані:

R(12)*10 – величина випрямленого струму (A), помножена на 10;

V(13,9)(V) – величина комутуючої напруги конденсаторів u_C (В);

V(26,25)(V) – імпульс керування транзисторами комутуючої ланки;

V(1,0)(V) – фазна напруга u_A вторинної обмотки трансформатора (В);

V(3,1)(V) – лінійна напруга u_{CA} вторинної обмотки трансформатора.

У кінці комутаційного процесу струм комутації досягає свого максимального значення. Цей момент часу позначений правою пунктирною вертикальною лінією. Числова характеристика моменту знаходиться під Right.

Проаналізуємо дані рис. 3. Початком комутаційного процесу є момент переходу кривої лінійної напруги u_{CA} вторинної обмотки перетворювального трансформатора через нульове значення. По осі абсцис це момент часу Left – 98.895m (98.895 мс). Звернімо увагу, що через цю точку проведена суцільна вертикальна лінія. Через кінцеву точку комутаційного процесу проведена пунктирна вертикальна лінія. По осі абсцис кінцю комутації відповідає момент часу Right – 100.124m (100.124 мс). Різниця часу Delta складає 1.229 мс. Урахувавши, що одній мілісекунді на рисунку відповідають 18° , розрахуємо кут комутації електричних вентилів катодної частини досліджуваного перетворювача: $\gamma = 1.229 \cdot 18 = 22.122^\circ$.

Подібним чином здійснено аналіз результатів схемотехнічного моделювання інших режимів роботи, результати аналітичного розрахунку кутів регулювання та комутації силових електричних вентилів катодної частини перетворювача яких, представлені у табл. 1.

Дані щодо величини кутів комутації та регулювання, отримані в результаті схемотехнічного моделювання восьми режимів роботи трифазного мостового компенсаційного перетворювача, представлені у табл. 2.

Таблиця 2 – Дані за результатами схемотехнічного моделювання

	ω_{0*}	$x_{\gamma*}$	Θ радіани	α градуси	γ градуси
1	3.1	0.058	0.2	3.76	21.46
2	3.1	0.058	0.4	8.20	21.51
3	3.1	0.059	0.6	11.32	21.65
4	3.1	0.060	0.8	15.46	21.84
5	3.1	0.061	1.0	19.89	22.12
6	3.1	0.062	1.2	23.49	22.19
7	3.1	0.062	1.4	27.43	22.68
8	3.1	0.062	1.6	31.14	23.17

Звернімо увагу, що фізичні характеристики робочих режимів, які моделювались у дослідженні, відповідають застосованим у аналітичному розрахунку числових даних робочих режимів.

Зрозуміло, що повного збігу між результатами аналітичного розрахунку, побудованому на результатах дослідження електромагнітних процесів у трифазному мостовому компенсаційному перетворювачі та результатами схемотехнічного моделювання тих же робочих режимів, бути не може. Тож у роботі проведено розрахунок величини розбіжності між результатами зазначених досліджень. Їх результат наведено у табл. 3

Таблиця 3 – Розрахунок величини розбіжності

	ω_{0*}	$x_{\gamma*}$	Θ радіани	$\Delta\alpha$ %	$\Delta\gamma$ %
1	3.1	0.058	0.2	27.69	4.52
2	3.1	0.058	0.4	2.26	4.17
3	3.1	0.059	0.6	4.71	3.88
4	3.1	0.060	0.8	0.38	3.41
5	3.1	0.061	1.0	2.84	3.12
6	3.1	0.062	1.2	0.47	1.51
7	3.1	0.062	1.4	0.92	2.25
8	3.1	0.062	1.6	0.03	3.19

Наведені у табл. 3 дані свідчать про прийнятний рівень розбіжності між результатами аналітичного розрахунку та даними схемотехнічного моделювання.

Висновок. Наведені у публікації дані є підставою для твердження, що у досліджуваному режимі розбіжність між результатами аналітичного розрахунку та схемотехнічного моделювання основних енергетичних характеристик трифазного мостового компенсаційного перетворювача, не перевищує 5%. З цього висновку випадає результат визначення величини кута регулювання шляхом моделювання режиму роботи перетворювача з малою затримкою подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки ($\Theta = 0.2$). Ця обставина пояснюється тим, що при такому робочому режимі комутуюча напруга має мале значення і її форма суттєво відрізняється від теоретичної.

Тож запропонована методика аналізу роботи компенсаційного перетворювача шляхом схемотехнічного моделювання є адекватною і цілком прийнятною.

Список використаної літератури

1. Патент України на корисну модель "Трифазний мостовий компенсаційний перетворювач": Патент UA № 142864, МПК H02M 3/22, 3/24. / Бойко В.С., - у 2020 01729. Заявл. 12.03.2020. Опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12.
2. Gan Wei; Ji Hongchao; Yang Xingwu, A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function// 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 30 March 2015. DOI: 10.1109/APPEEC.2014.7066073, Conference Location.
3. Бойко, В. і Шкардун, О. 2023. Електромагнітні процеси у трифазному мостовому компенсаційному перетворювачі. Технічна електродинаміка. 4 (Чер 2023), 026. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2023.04.026>.

V. Boiko¹, Dr. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-1018-0642

O. Shkardun¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-7980-8114

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

VERIFICATION OF ENERGY CHARACTERISTICS OF A THREE-PHASE BRIDGE COMPENSATION CONVERTER WITH ONE COMMUTATING LINK

The article considers the issue of reliability of the results of analytical calculation of the feedforward control angle of power electric valves and the commutate angle of a three-phase bridge compensating converter of electric energy with one commutating link. It is noted that the value of these angles determines the capabilities of the converter regarding the generation of reactive energy together with the power supply of the consumer of direct current electric energy. Based on the complexity of the analytical calculation of these characteristics, the issue of verification of the obtained results is relevant, which also confirms the adequacy of the applied research methodology. As a tool for achieving the goal of the work, the authors use circuit simulation in the Micro Cap package. The modeling technique is described in detail, the results of modeling several modes of converter operation are presented, and these results are analyzed. A comparative analysis of the numerical values of the control and commutating angles obtained as a result of analytical calculation and circuit modeling of the same modes of converter operation showed that the discrepancy does not exceed 5%. This indicates the adequacy of the applied modeling technique and the acceptable accuracy of the results of analytical calculations. Refer. 3, fig. 3, table 3.

Keywords: capacitor battery, circuit model, commutating voltage, electric valve, commutating angle, regulation angle.

References

1. Boiko V.S. Three-phase bridge compensation converter: Patent UA for utility model № 142864, 2020. (Ukr).
2. Gan Wei; Ji Hongchao; Yang Xingwu, A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function// 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 30 March 2015. DOI: 10.1109/APPEEC.2014.7066073, Conference Location.
3. Boiko, V. and Shkardun, O. 2023. Conditions for recharging the capacitors of the commutating link of the three-phase bridge compensation converter. Tekhnichna Elektrodynamika. 4 (June 2023),026. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2023.04.026>.

Надійшла: 04.11.2024

Received: 04.11.2024

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАБОРОНИ ОДНОЧАСНОГО ВВЕДЕННЯ ПОЗИТИВНОЇ РЕАКТИВНОСТІ ДВОМА ТА БІЛЬШЕ СПОСОБАМИ

Основною причиною виникнення заборони одночасного введення позитивної реактивності двома і більше способами є вимоги в правилах ядерної безпеки реакторних установок. Повинно бути виключено введення позитивної реактивності засобами впливу на реактивність, передбаченими технічним проектом реакторної установки, якщо робочі органи аварійного захисту не приведені в робоче положення. Технічними заходами повинна бути виключена можливість введення позитивної реактивності одночасно двома і більш передбаченими засобами впливу на реактивність, а також введення позитивної реактивності засобами на впливу реактивність при завантаженні і вивантаженні палива. Швидкість збільшення реактивності засобами впливу на реактивність має не перевищувати 0,07 β ef/s. Для робочих органів системи управління та захисту з ефективністю понад 0,7 β ef введення позитивної реактивності має бути кроковим, з вагою кроку не більше 0,3 β ef (забезпечується технічними заходами). У технічному проекті РУ має бути зазначена величина кроку, пауза між кроками та швидкість збільшення реактивності.

Наслідком введення позитивної реактивності двома і більше способами можливе порушення умов нормальної експлуатації реакторних установок атомних станцій, через неконтрольоване збільшення нейтронного потоку в робочих і аварійних режимах реактора. Встановлений попереджувальний захист другого роду, що повинен вирішувати дану проблему має недоліки у своїй роботі, що приводять до явного порушення дійсної заборони на одночасне введення позитивної реактивності двома і більше способами. На основі проведених досліджень визначено та проаналізовано наявну похибку у роботі ПЗ-2. Для уникнення проблеми з одночасним введенням позитивної реактивності двома і більше способами запропоновано модернізація системи ПЗ-2 з подальшою її роботою від показників реактивності.

Ключові слова: попереджувальний захист, модернізація, позитивна реактивність, ядерна безпека.

Вступ

В п.3.3.42 НП 306.2.145-2008 «Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском» вказана вимога про те, що технічними засобами унеможливується введення позитивної реактивності одночасно двома і більше засобами впливу на реактивність, а також введення позитивної реактивності засобами впливу на реактивність при завантаженні і вивантаженні палива[1].

Наразі можливі порушення цієї вимоги під час роботи ядерної установки типу ВВЕР-1000.

Актуальність теми обумовлена необхідністю виконання вимог ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском.

Метод дослідження – розрахунок впливу «чистого конденсату» на реактивність, аналіз літератури, технічної документації і інструкцій з даної теми.

Об'єктом дослідження є ядерна безпека реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском.

Предметом дослідження є дослідження можливого введення позитивної реактивності одночасно двома і більше способами.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що отримані рекомендації та висновки дозволяють унеможливити введення позитивної реактивності одночасно двома та більше способами.

Практичне значення одержаних результатів - результати дисертаційної роботи можуть бути впроваджені в практичну діяльність ДП «НАЕК «Енергоатом» ВП Південноукраїнська АЕС» для виконання вимог ядерної безпеки.

Внаслідок проведених практичних досліджень доведена наявність даної проблеми. Причини, що впливають на роботу ПЗ-2 проаналізовані та зроблені висновки.

У роботі запропоновані рекомендації для покращення роботи попереджувального захисту другого роду, проаналізовано системи, що впливають на можливе одночасне введення позитивної реактивності двома і більше способами.

Аналіз літературних джерел

Засобами, які могли вносити позитивну реактивність, є:

- лінія подачі чистого конденсату з послідовно розташованою арматурою TN30S04, TN30S06 системи штатного підживлення першого контуру;
- система групового та індивідуального управління органів регулювання системи управління захистом(ОР СУЗ).

Цілями впровадження заборони одночасного введення позитивної реактивності двома і більше способами захисту системи управління захистом(СУЗ) енергоблоку є:

- підвищення рівня безпеки експлуатації енергоблоку шляхом впровадження додаткового попереджувального захисту II роду;
- приведення характеристик системи у відповідність чинним вимогам нормативної документації(НД) щодо безпеки атомних електричних станцій(АЕС)[2].

Впровадження нового захисту виконується на зупиненому реакторі під час проведення планово - попереджувального ремонту під час перебування реакторної установки в режимі «зупинка перевантаження».

Для виключення одночасного введення позитивної реактивності за рахунок підйому ОР СУЗ і дистилату в активну зону реактора в програмно-технічному комплексі аварійного та попереджувального захисту(ПТК АЗ-ПЗ) формується попереджувальний захист 2-го роду(ПЗ-2)(заборона на підйом ОР СУЗ) за фактом початку відкриття арматури TN30S04 при відкритій арматурі TN30S06 або за фактом початку відкриття арматури TN30S06 при відкритій арматурі TN30S04, що дозволяє підвищити безпеку роботи реакторної установки. Сигнал спрацьовування ПЗ-2 знімається за фактом закриття будь-якої арматури TN30S04, TN30S06.

Сигнали від кінцевих вимикачів арматури TN30S04, TN30S06 передаються на вхід ПТК АЗ-ПЗ, де формується алгоритм роботи захисту. На відеокadraх робочої станції відображається формування та стан проходження сигналу. З ПТК АЗ-ПЗ сигнали за фактом одночасного незакритого стану арматури TN30S04, TN30S06 передаються на блочному щиті управління(БЩУ) (першопричина) та інформаційно обчислювальну систему(ІОС) (для реєстрації)[3].

Програмно-технічний комплекс системи аварійного та запобіжного захисту реактора за нейтронно-фізичними та технологічними параметрами призначений для ініціювання дії захисних систем безпеки реактора при неприпустимих відхиленнях роботи РУ, а також здійснення контролю та управління у процесі виконання ними захисних функцій.

Припинення реакції або зниження потужності РУ відбувається шляхом видачі відповідних сигналів у системі групового та індивідуального управління реактором(СГРУ-Р) органами регулювання реактора(ОР СУЗ)[4].

ПТК АЗ-ПЗ виконує функції системи безпеки, що керує. Згідно з НП 306.2.141-2008 ПТК АЗ-ПЗ відноситься до класу 2У. Компоненти ПТК АЗ-ПЗ, які не беруть участь у виконанні керуючих функцій (робоча станція(РС), робоче місце оператора(РМО), робоче місце технолога(РМТ)) відносяться до класу безпеки 3 і мають класифікаційне позначення ЗН. ПТК АЗ-ПЗ розрахований на режим цілодобової безперервної роботи з урахуванням проведення технічного обслуговування та ремонту[2].

АЗ та ПЗ формують команди на припинення, швидке зниження або уповільнення ланцюгової реакції у разі виникнення аварійних ситуацій.

Передбачено два комплекти ПТК АЗ-ПЗ. Обидва комплекти розділені по лініях зв'язку, електроживлення, вхідних та вихідних сигналів та розміщені в різних приміщеннях.

Кожен комплект ПТК АЗ-ПЗ спроектований таким чином, що у всьому проектному діапазоні зміни технологічних параметрів реакторної установки забезпечується аварійний захист не менше ніж трьома незалежними каналами за кожним технологічним параметром, за яким необхідно здійснювати захист.

Кожен комплект виконаний триканальним та працює за мажоритарним принципом «два з трьох».

Усі сигнали поділені на сигнали аварійного захисту (АЗ), попереджувального захисту першого роду (ПЗ-1) та попереджувального захисту другого роду (ПЗ-2). За цими сигналами відбуваються такі впливи на ОР СУЗ:

- аварійні сигнали (АЗ) викликають падіння всіх ОР СУЗ під впливом своєї ваги до крайнього нижнього положення. Припинення дії сигналу АЗ не може перервати падіння всіх ОР СУЗ до крайніх нижніх положень;

- попереджувальні сигнали першого роду (ПЗ-1) викликають почерговий рух донизу всіх груп ОР СУЗ (у порядку зменшення їх номерів) з робочою швидкістю. Рух ОР СУЗ донизу припиняється при зникненні сигналу ПЗ-1;

- попереджувальні сигнали другого роду (ПЗ-2) забороняють рух ОР СУЗ вгору до зняття сигналу ПЗ-2.

ПТК АЗ-ПЗ видає дискретні керуючі сигнали аварійного та попереджувального захисту (команди захисних дій) до інших систем енергоблоку:

- «АЗ» – у схему управління вимикачами вводів живлення виконавчих механізмів органів регулювання (ОР) системи управління та захисту (СУЗ): команда відключення живлення ОР СУЗ змінним струмом;

- «АЗ» – у підсистему живлення виконавчих механізмів ОР СУЗ постійним струмом, команда зняття резервного живлення з виконавчих механізмів ОР СУЗ;

- «АЗ» – у СДІУ-Р, команда зняття силового живлення з приводів ОР СУЗ;

- «АЗ» – у систему технологічних захистів та блокувань (ТЗБ);

- «АЗ» – до системи борного регулювання, команда включення насоса (УСБ);

- «ПЗ-1» – у СДІУ-Р, команда на опускання виділеної групи ОР СУЗ до зникнення сигналу;

- «ПЗ-1» – у ПТК АРМ-РОМ-УПЗ, команда заборони автоматичного регулювання АРМ на час дії сигналу;

- «ПЗ-1» – у ПТК СРТ, команда зменшення потужності турбіни;

- «ПЗ-2» – у СДІУ-Р, команда заборони на підйом ОР СУЗ;

- «ПЗ-2» – у ПТК АРМ-РОМ-УПЗ, команда заборони для АРМ збільшення потужності РУ;

- «ПЕРЕВІРКА» – у ПТК АРМ-РОМ-УПЗ, сигнал про виведення першого (другого) комплексу ПТК АЗ-ПЗ у режим «ПЕРЕВІРКА».

У ПТК АЗ-ПЗ вжито заходів для фізичного захисту технічних засобів від несанкціонованого доступу, що передбачають закриття шаф на замки та пломбування.

Формування сигналів АЗ, ПЗ-1, ПЗ-2 забезпечується трьома незалежними каналами (трьома ШФС) ідентичними за своїм конструктивним виконанням та виконуваними функціями.

Інформація щодо кожного технологічного параметра вводиться від трьох незалежних джерел для кожного ШФС через відповідні ШПК, які виконують функцію сполучення. Конструкція ШФС дозволяє замість вхідних сигналів датчиків подавати сигнали від стенду перевірки каналу (СПК), який імітує вхідні сигнали.

Кожен канал реалізований на основі мажоритарної логіки, приймаючи сигнали захисту від двох інших каналів. На виході формуються сигнали «два з трьох», які надходять до КШВ.

КШВ реалізовано таким чином, що на його виході сигнали аварійного та попереджувального захисту сформуються тільки в тому випадку, якщо ці сигнали будуть сформовані хоча б двома ШФС.

Інформація від КШВ по оптоволоконним кабелям передається на РС. На моніторі РС подається візуальний контроль стану вхідних, вихідних та інформаційних сигналів, формування сигналів АЗ, ПЗ-1, ПЗ-2 у КШВ та в кожному з трьох каналів (ШФС), і даний режим роботи ПТК АЗ-ПЗ («РОБОТА», «ПЕРЕВІРКА»).

Діагностична та технологічна інформація формується в БДН кожного ШФС і по оптоволоконних кабелях передається на РС.

ШФС забезпечує:

- Прийом поточних значень технологічних параметрів;

- формування керуючих сигналів АЗ, ПЗ-1 ПЗ-2 при виході контрольованих технологічних параметрів за межі встановлених граничних значень (уставок);

- діагностику технічних та програмних засобів ПТК АЗ-ПЗ, що передбачає безперервний автоматичний контроль працездатності.

Важливою системою у даному питанні є також система підживлення-продування першого контуру.

Система підживлення-продування призначена для:

- компенсації неорганізованих протікань теплоносія першого контуру

(До 2,0 м³/год);

- заповнення та дозаповнення першого контуру розчином борної кислоти;

- підйому тиску в першому контурі під час проведення гідравлічних випробувань першого контуру;

- очищення та повернення в контур організованих протікань;

- зміни концентрації борної кислоти, у міру вигорання палива при змінах навантаження, при пусках та зупинках реактора;

- забезпечення у всіх нормальних режимах роботи енергоблока необхідної якості теплоносія першого контуру, величина підживлення-продування при цьому становить від 20,0 т/год до 60,0 т/год;

- подачі замикаючої води на ущільнення ГЦН (до 2,0 м³/год на кожний ГЦН);

- здійснення режиму дезактивації першого контуру та дегазації теплоносія;

- розхолодження КД при непрацюючих ГЦН;

- початкового заповнення ГЕ САОЗ;

- підтримки заданого рівня теплоносія в КД, що відповідає рівню потужності реактора;

- введення хімреагентів у перший контур з метою коригування водного режиму першого контуру;

- можливості подачі в перший контур у режимі знеструмлення, розчину борної кислоти з концентрацією не нижче поточної в деаераторі підживлювальної води;

- зниження тиску в першому контурі впрорскуванням в КД при відмові впрорскування від ГЦН або

необхідності екстреного зниження тиску в першому контурі.

Система функціонує в режимах нормальної експлуатації, включаючи перехідні режими енергоблоку, а також порушення в системі нормального енергопостачання (знеструмлення енергоблоку). В аварійних ситуаціях, пов'язаних із розуцільненнями першого чи другого контурів, необхідність працездатності системи у кожній конкретній ситуації визначається відповідною процедурою. У режимах нормальної експлуатації система забезпечує перелічені вище вимоги.

Критерієм виконання системою своїх функцій є забезпечення необхідних витрат, температури, концентрації борної кислоти теплоносія першого контуру. У цих режимах устаткування та арматура перебувають у робочому становищі, тобто. працює один з підживлювальних насосів, відкрита арматура на лініях продування та підживлення, введені в роботу регулятори на лініях продування та підживлення.

Враховуючи, що система підживлення-продування повинна безперервно функціонувати в період нормальної експлуатації енергоблоку на потужності, насосні агрегати продубльовано з метою можливості виведення агрегатів на технічне обслуговування та ремонт.

До складу системи підживлення-продування першого контуру (ТК) входять такі підсистеми:

- продування першого контуру;
- деаерації продувної та підживлювальної води першого контуру;
- підживлення першого контуру та подачі ущільнючої води на ГЦН.

Підсистема продувки першого контуру включає:

- регенеративний теплообмінник продування 1ТС30W01;
- доохолоджувач продування 1ТС30W02;
- трубопроводи, запірну та регулюючу арматуру, ЗВТ.

Підсистема деаерації включає:

- деаератор підживлення 1ТК10В01;
- деаератор борного регулювання 1ТН30В01;
- регенеративний теплообмінник підживлювальної води 1ТК10W01;
- регенеративний теплообмінник «чистого» конденсату 1ТН30W01;
- доохолоджувач підживлювальної води 1ТК11W01;
- трубопроводи, запірну та регулюючу арматуру, ЗВТ.

Підсистема підживлення першого контуру та подачі ущільнючої води на ГЦН включає:

- три підживлювальні насосні агрегати з допоміжними системами мастила та охолодження 1ТК21(22,23)D01,02;
- трубопроводи, запірну та регулюючу арматуру, ЗВТ.

Усі підсистеми технологічно пов'язані між собою, а також із системами організованих протікань першого контуру (ТУ), СВО-1 (ТС), СВО-2 (ТЕ), «чистого» конденсату (ТН), спалювання водню (ТС), борного концентрату (ТД), бакового господарства (ТВ), пари низького тиску (РС), що гріє, технічної води відповідальних споживачів (VF), промконтуру (TF), спецгазоочищення (ТС), гідровипробувань та продування датчиків КВП (UD), вимірювання концентрації борної кислоти (СІКЛ) [7].

Деаератор борного регулювання 1ТН30В01 підключений до всмоктуючого трубопроводу підживлювальних насосів паралельно деаератору 1ТК10В01. Деаератори 1ТН30В01 та 1ТК10В01 з пристроєм однакові.

У деаераторі 1ТН30В01 знаходиться «чистий» конденсат, який використовується для подачі в перший контур зниження концентрації борної кислоти. Заповнюється деаератор 1ТН30В01 лише від системи чистого конденсату.

«Чистий» конденсат з деаератора 1ТН30В01, перш ніж вступити на всмоктування підживлювальних агрегатів, проходить через регенеративний теплообмінник 1ТН30W01. Охолодним середовищем служить «чистий» конденсат.

Дренаж та перелив 1ТН30В01 можливий лише в баки «чистого» конденсату.

Під час дослідження також важливою складовою є вплив та взаємодія попереджувального захисту 2 роду з ПТК АРП-РОП-ППЗ.

ПТК АРП-РОП-ППЗ у складі СУЗ енергоблоку призначений для виконання таких основних функцій:

- група функцій АРП - автоматичне регулювання потужності реактора в режимі підтримки заданого значення густини нейтронного потоку (режим "Н") або тиску в головному паровому колекторі (режим "Т"), або в режимі обмеження потужності залежно від тиску в головному паровому колекторі (режим "С");

- група функцій РОП - обмеження і зниження до безпечного рівня теплової потужності реактора в разі її підвищення або в разі відключення основного технологічного обладнання енергоблоку - ГЦН, ТПН, СКТГ, БВТГ. Рівень обмеження автоматично встановлюється залежно від стану основного технологічного обладнання енергоблоку;

- група функцій УПЗ - формування та видавання сигналів, що ініціюють спрацьовування прискореного попереджувального захисту в разі непланових вимкнень основного технологічного

обладнання енергоблока[7].

Мета роботи

Метою даної роботи є проведення оцінки та можливостей щодо введення позитивної реактивності одночасно двома та більше способами, розроблення рекомендацій до роботи попереджувального захисту другого роду, аналіз систем, що впливають на можливе одночасне введення позитивної реактивності двома і більше способами.

Метод дослідження впливу на реактивність

1. Розглянуті неспрацьовування сигналізацій першопричини спрацьовування ПЗ-1, ПЗ-2 за будь-якої з умов у двох комплектах. В такому разі необхідно зменшити потужність реакторної установки до $50\%N_{ном}$ та усунути проблему протягом 24 годин. Якщо проблему не усунуто, то реакторна установка переводиться у режим «гарячого зупину» до усунення проблеми.

2. Проаналізовано використання допоміжних ОР СУЗ.

У перехідних процесах рекомендується початковий керуючий вплив на офсет здійснювати зміною концентрації борної кислоти в ТПК. Це забезпечує найменше збільшення коефіцієнтів нерівномірності енерговиділення протягом перехідного процесу. Переміщенням груп ОР СУЗ варто підтримувати АО в інтервалі $\pm 1\%$ від заданого значення AO_3 при потужності РУ більше 80 %. Якщо потужність РУ знаходиться в діапазоні 30-80 %, то рекомендований інтервал АО дорівнює $\pm 5\%$.

Якщо впливу робочої групи на офсет недостатньо, варто ввести в активну зону допоміжні ОР СУЗ. Занурення допоміжних ОР СУЗ здійснюється ключом індивідуального управління кроками по 5-10 % від висоти активної зони послідовно кожен ОР СУЗ до положення, при якому значення АО опиниться в допустимому діапазоні від AO_3 , і Kv_{ij} знаходиться в допустимих межах. Занурення допоміжних ОР СУЗ допускається не нижче, аніж до положення 60 % при рівні теплової потужності більше 80 %; при потужності менше 80% глибина занурення не обмежується.

Вилучення введених в активну зону допоміжних ОР СУЗ проводиться або при подальшому підйомі потужності за рахунок компенсації температурного і потужнісного ефекту реактивності, або при прогнозованій тривалій, більше 24 годин, роботі реактора на зниженому рівні потужності за рахунок підвищення концентрації борної кислоти в теплоносії. Компенсація реактивності при переміщеннях робочої групи ОР СУЗ та при вилученні допоміжних ОР СУЗ повинна здійснюватися шляхом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії[5].

3. Проаналізована система підживлення-продування, що безпосередньо впливає на проблему «транспортного запізнення» чистого конденсату, що й викликає похибки у роботі ПЗ-2. Розглянуто характеристики відцентрового насосу ЦН60-180, а також регенеративні теплообмінники 1TK10W01 та 1TN30W01[6].

4. Управління аксіальним розподілом поля енерговиділення в активній зоні реактора.

Допустимий аксіальний офсет (AO_d) – граничне значення аксіального офсету з урахуванням відхилення на $\pm 5\%$ і $\pm 15\%$ від заданого значення ($AO_d = AO_3 \pm 5\%$ для потужності РУ 80-100 % і $AO_d = AO_3 \pm 15\%$ для потужності РУ 30-80 %).

Для реакторних установок, на яких не впроваджені У-алгоритми управління полем енерговиділення, при роботі реактору в нормальних умовах експлуатації на рівні потужності більше 80 %, відхилення офсету від його заданого стаціонарного значення не повинно перевищувати 5 %. У випадку неможливості виконати дане обмеження, реактор повинен бути розвантажений до рівня теплової потужності менше 80 % переміщенням вниз робочої групи ОР СУЗ.

У випадку зниження потужності в діапазоні 80-100 % від номінальної в результаті дії автоматичних регуляторів і захистів, допускається відхилення поточного офсету від його заданого стаціонарного значення більше аніж на 5 % на час не більше 12 годин від початку зниження потужності.

При збільшенні потужності в діапазоні 80-100% від номінальної відхилення офсету від його заданого стаціонарного значення не повинно перевищувати 5%.

При роботі реактору на рівні теплової потужності в діапазоні 30-80 % від номінальної відхилення поточного АО від заданого значення не має перевищувати 15 %. У разі неможливості виконати дане обмеження, реактор повинен бути розвантажений до рівня теплової потужності менше 30 %, якщо протягом 1 години засобами впливу на реактивність не вдалося повернути поточний офсет у допустимі межі ($\pm 15\%$ від заданого значення).

При роботі реактору на рівні теплової потужності нижче 30 % від номінальної відхилення поточного АО від заданого значення не контролюється, але повинні виконуватися обмеження по допустимим значенням Kq і Kv .

При тривалій роботі РУ на рівнях потужності 90-100 % значення АО рекомендується підтримувати в інтервалі $\pm 2\%$ від заданого значення AO_3 , а у разі відхилення АО з будь-яких причин рекомендується якнайшвидше (протягом 0,5 години) повернути АО у зазначений інтервал. Інакше ускладнюється завдання утримання АО і виникають передумови збільшення амплітуди ксенонових коливань

У перехідних режимах часткового розвантаження/навантаження енергоблоку ($W \geq 80\%$) з регламентною швидкістю розвантаження/навантаження рекомендується поточне значення АО підтримувати в інтервалі $\pm 1\%$ від заданого значення АО_з, що відповідає моменту закінчення стаціонарного режиму роботи РУ[5].

4. Аналіз зміни концентрації борної кислоти в теплоносії.

Необхідний об'єм підживлення для зміни концентрації борної кислоти в теплоносії визначається залежністю[5]:

$$V_{\text{підж}} = V_{1к} \cdot \frac{\rho_{1к}}{\rho_{\text{підж}}} \cdot \ln \frac{C_{\text{поч}} - C_{\text{підж}}}{C_{\text{кін}} - C_{\text{підж}}}, \quad (1)$$

де $V_{\text{підж}}$ – об'єм підживлення, м³;

$V_{1к}$ – об'єм ТПК (при рівні в КТ, що відповідає $W_{\text{ном}}$), в даній симуляції прийнятий рівним 413 м³;

$\rho_{1к}$ – густина ТПК, в даній симуляції прийнята рівною 720,5 кг/м³ (160 кгс/см², 303,3 °С);

$\rho_{\text{підж}}$ – густина підживлення, за нормальних умов рівна 1000 кг/м³;

$C_{\text{поч}}, C_{\text{кін}}$ – початкова і кінцева концентрація борної кислоти в ТПК, г/кг;

$C_{\text{підж}}$ – концентрація борної кислоти в підживленні, г/кг.

Поточне значення концентрації борної кислоти в ТПК при підживленні РБК або дистиллятом в залежності від часу після початку водообміну визначається залежністю:

$$C(t) = C_{\text{підж}} + (C_{\text{поч}} - C_{\text{підж}}) \cdot \exp\left(-\frac{\rho_{\text{підж}}}{\rho_{1к}} \cdot \frac{G_{\text{підж}} \cdot t}{V_{1к}}\right), \quad (2)$$

де $G_{\text{підж}}$ – об'ємна витрата підживлення, м³/год.

5. Практичні дослідження на тренажері реакторної установки доводять, що сигнал ПЗ-2 знімається через хвилину після закриття арматур на введення чистого конденсату, при тому, що наявна позитивна реактивність зберігається близько 10 хвилин після їх закриття. Проведені три досліді показали подібні результати, що вказують на наявність проблеми у роботі попереджувального захисту другого роду.

Обговорення результатів

Отримані результати можуть бути використані при обґрунтуванні модернізації систем для безпеки ядерних установок типу ВВЕР-1000. Це може бути здійснене при модернізації системи підживлення-продувки, а також попереджувального захисту другого роду. Такі модернізації дозволять зменшити «транспортну затримку», а також внести зміни у роботу ПЗ-2.

Модифікації насосного обладнання системи підживлення-продування дозволять за менший час подавати чистий конденсат, що призведе до зменшення часу заборони ПЗ-2, що дозволить краще та ефективніше керувати ядерною установкою.

Модифікація системи попереджувального захисту другого роду дозволять у повній мірі виконувати вимогу на технічну заборону одночасного введення позитивної реактивності двома та більше способами.

Висновки

1. Пропонується змінити роботу попереджувального захисту другого роду, аби вона залежала від показників реактивності в активній зоні реактора.

2. Виправити проблему «транспортної затримки» шляхом модернізації системи підживлення-продування, або змін у роботі ПЗ-2 з врахуванням часу «транспортної затримки».

Список використаної літератури

1. Про затвердження Правил ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском. Держатомрегулювання України; Наказ, Правила від 15.04.2008 № 73 Посилання: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0512-08#Text>

2. Програма технічного обслуговування програмно-технічного комплексу системи аварійного та попереджувального захисту (ПТК АЗ-ПЗ) енергоблок № 1 ПМ.1.0011.0224

3. Технологічний регламент безпечної експлуатації енергоблоку №1 ПАЕС. РГ.1.3810.007.

4. Програмно-технічний комплекс системи аварійного та попереджувального захисту енергоблоку № 1 Інструкція з експлуатації ІЕ.1.0011.0631

5. Альбом нейтронно-фізичних характеристик 38-го паливного завантаження реактора енергоблоку №1 ПАЕС. НФ.1.0023.0065.

6. Система підживлення-продування першого контуру енергоблоку № 1. Інструкція з експлуатації. ІЕ.1.0001.0098

Програмно-технічний комплекс автоматичного регулювання, розвантаження та обмеження потужності реактора та прискореного попереджувального захисту. Енергоблок №1. ІЕ.1.0011.0635

T.Bibik¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-0134-6022

I.Ostapenko¹, engineer, ORCID 0000-0003-3980-1609

V.Kuzmenko¹, master student, ORCID 0009-0007-4306-3078

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ANALYSIS OF THE RESULTS OF THE IMPLEMENTATION OF THE BAN ON THE SIMULTANEOUS INTRODUCTION OF POSITIVE REACTIVITY IN TWO OR MORE WAYS

The main reason for the prohibition of simultaneous injection of positive reactivity in two or more ways is the requirements of the nuclear safety rules for reactor installations. The introduction of positive reactivity by the means of influence on reactivity, provided for by the technical design of the reactor installation, should be excluded, if the emergency protection working bodies are not brought to the working position. Technical measures should exclude the possibility of introducing positive reactivity simultaneously by two or more provided means of influencing reactivity, as well as introducing positive reactivity by means of influencing reactivity during fuel loading and unloading. The rate of increase in reactivity by means of influencing the reactivity should not exceed 0.07 β_{eff}/s . For the working bodies of the control and protection system with an efficiency of more than 0.7 β_{eff} , the introduction of positive reactivity should be stepwise, with a step weight of no more than 0.3 β_{eff} (provided by technical measures). In the technical design of the RU, the size of the step, the pause between steps and the rate of increase in reactivity should be indicated.

The consequence of introducing positive reactivity in two or more ways is a possible violation of the conditions for normal operation of nuclear power plants due to an uncontrolled increase in the neutron flux in operating and emergency modes of the reactor. The installed second-type warning protection, which is supposed to solve this problem, has shortcomings in its operation that lead to a clear violation of the current prohibition on the simultaneous introduction of positive reactivity in two or more ways. On the basis of the conducted research, the existing error in the operation of the PP-2 was identified and analyzed. To avoid the problem with the simultaneous introduction of positive reactivity in two or more ways, it is proposed to modernize the system of PP-2 with its further operation on reactivity indicators.

Keywords: preventive protection, modernization, positive reactivity, nuclear safety.

References

1. On the approval of the Nuclear Safety Rules for reactor installations of nuclear plants with pressurized water reactors. State Nuclear Regulation of Ukraine; Order, Rules of 04/15/2008 No. 73 Ref: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0512-08#Text>
2. Maintenance program of the software and hardware complex of the emergency and preventive protection system (SHC EP-PP) power unit No. 1 MP.1.0011.0224
3. Technological regulations for the safe operation of unit No. 1 of the SUNPP. RG.1.3810.007.
4. Software and hardware complex of the emergency and preventive protection system of power unit No. 1 Operating Manual OM.1.0011.0631
5. Album of neutron-physical characteristics of the 38th fuel loading of the reactor of power unit No. 1 of SUNPP. NP.1.0023.0065.
6. Supply-blow system of the first circuit of power unit No. 1. Operating Manual. OM.1.0001.0098
7. Software and technical complex of automatic regulation, unloading and limitation of reactor power and accelerated warning protection. Power unit No. 1. OM.1.0011.0635

Надійшла: 12.08.2024

Received: 12.08.2024