

УДК 621.318

Larysa Levchenko¹, Doctor of Technical Sciences, Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7227-9472> **e-mail:** larlevch@ukr.net

Oleksandr Radionov², Doctor of Technical Sciences, Senior Research Associate
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1112-5146> **e-mail:** ferrohdrodynamica@gmail.com

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

²Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

MODERNIZATION OF ELECTRICAL EQUIPMENT AS A WAY OF REDUCING THE RISKS OF EMERGENCY SITUATIONS AT NUCLEAR POWER PLANTS

Abstract. An analysis of major accidents in the electric power and coal industry was carried out. It is shown that for many types of technological equipment, the cause of failure was the unsatisfactory performance of the seals. It is shown that in two known nuclear accidents, the cause is the failure of coolant supply systems. Moreover, it had catastrophic consequences at the Fukushima nuclear power plant. The direct cause of the cessation of cooling of the reactors was the ingress of water into the electric motors of the circulation pumps. Most electric drives of nuclear power plants are synchronous electric motors. Turbogenerators are also synchronous four-pole electric machines of great value, which determines the expediency of increasing their reliability and service life. The solution to this problem is possible with the help of magnetic fluid sealing complexes (MFCs). To compare the level of man-made safety when using MFCs and traditional sealing systems, an improved method of risk assessment is proposed, developed at the expense of a systematic analysis of sealing complexes of equipment of hazardous industries for synchronous electric motors of the SDN type under different modes of operation, power and revolutions of the rotating shaft. The man-made risk assessment shows that the level of man-made danger is reduced by 1.5 to 4 times when sealants are introduced.

Keywords: technogenic risk; magnetic fluid sealing complex; safety.

Л.О. Левченко¹, О.В. Радіонов²

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

²Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ЯК ШЛЯХ ЗНИЖЕННЯ РИЗИКІВ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ НА АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ

Анотація. Проведено аналіз великих аварій в електроенергетиці та вугільній промисловості. Показано, що для багатьох видів технологічного обладнання причиною відмови була незадовільна робота ущільнень. Показано, що у двох відомих ядерних аваріях причиною є відмова систем постачання теплоносіїв. Причому на АЕС Фукусіма це мало катастрофічні наслідки. Безпосередньою причиною припинення охолодження реакторів було потрапляння води

у електродвигуни циркуляційних насосів. Більшість електроприводів атомних станцій є синхронними електродвигунами. Турбогенератори також є синхронними чотириполюсними електричними машинами великої вартості, що обумовлює доцільність підвищення їх надійності та термінів експлуатації. Вирішення цієї проблеми можливе застосуванням магніторідинних герметизуючих комплексів (МРГК). Для порівняння рівня техногенної безпеки при застосуванні МРГК і традиційних ущільнюючих систем пропонується удосконалений метод оцінки ризику, розвинутий за рахунок системного аналізу герметизуючих комплексів обладнання небезпечних виробництв для синхронних електродвигунів типу СДН при різних режимах експлуатації, потужності і оборотах обертового вала. Оцінка техногенного ризику показує, що рівень техногенної безпеки при впровадженні герметизаторів знижується в 1,5 ... 4 рази.

Ключові слова: техногенний ризик; магніторідинний герметизуючий комплекс; безпека.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.29-42>

Вступ

Результатом науково-технічного прогресу в розвинених країнах стало утворення екологічно небезпечних об'єктів, до яких належать електростанції, металургійні, хімічні, нафтохімічні та гірничодобувні підприємства, нафто- та газопроводи.

Істотно більшої шкоди навколишньому середовищу при короткочасних і довготривалих наслідках завдають не стаціонарні шкідливі викиди цих об'єктів, а аварійні ситуації, які у деяких випадках мають глобальний характер.

Підвищення техногенної безпеки підприємств енергетики є одним з пріоритетних напрямів досліджень та прикладних розробок у галузі екологічної безпеки як в Україні, так і в усьому світі.

Серед таких об'єктів атомні електростанції є потенційно найбільш небезпечними через масштабність впливів на населення і навколишнє середовище у разі виникнення аварій з викидами радіоактивних речовин. Про це свідчать наслідки аварій на Чорнобильській станції та на станції Фукусіма. Серед відомих аварій на діючих АЕС – Три-Майл-Айленд, Чорнобильській та Фукусіма – перша та третя були викликані аварійними ситуаціями у системах охолодження реакторів. Якщо на станції Три-Майл-Айленд персонал вчасно не зреагував на те, що засувки лінії аварійного постачання води зачинені, то на станції Фукусіма ситуація інша. Потрапляння води у електропривод насосів, які прокачують теплоносій крізь активну зону реакторів, призвело до їх перегріву й руйнування контурів з радіаційно забрудненою водою та підплавлення тепловіділяючих елементів. Таким чином, безпосередньою причиною аварій стала ненадійна робота допоміжного електротехнічного обладнання. На сьогоднішній день для підвищення надійності роботи електродвигунів, генераторів та збільшення їх ресурсності застосовують магніторідинні герметизатори, які запобігають потраплянню всередину вологи, пилу тощо. Їх застосовують для підвищення надійності роботи електроприводу систем вентиляції на підприємствах хімічної промисловості, машинобудівної галузі, гідроелектростанцій тощо.

Специфікою атомних електростанцій є те, що через їх підвищену небезпеку аварійне зниження потужності реакторів або повна зупинка здійснюються

автоматично внаслідок припинення навіть відбору генерованої електроенергії через вихід з ладу підвищувальних трансформаторів, аварії на відкритих розподільчих пристроях, обрив дротів ліній електропередачі внаслідок природних явищ. При цьому в активній зоні реактору через їх велику масу та інерційність фізичних процесів виділяється залишкове тепло. Це потребує інтенсивного охолодження упродовж значного часу. Тому доцільно розглянути можливості зниження ризиків аварійних ситуацій на атомних станціях, зокрема, за рахунок підвищення експлуатаційної надійності електроприводу.

Для України екологічна ситуація погіршується тим, що в умовах війни ймовірність пошкодження об'єктів критичної інфраструктури різко зростає, а фізичне та моральне старіння обладнання протягом останніх років значно випереджає темпи його заміни та оновлення [1]. В результаті знос основних засобів з вищевказаних галузей небезпечних виробництв характеризується не більше 50–90% і відновлювати парк діючого устаткування з економічних причин важко [2].

Аналіз великих аварій в електроенергетиці та вугільній промисловості в США, Росії, Франції, Індії, Італії та Україні показує, що в більшості випадків їх безпосередніми причинами були механічні несправності, а загальною рисою техногенних катастроф, спричинених механічним пошкодженням, був початок аварії з відмови допоміжного, незначного елемента з наступним каскадним розвитком у національну катастрофу [3].

Статистичні дані свідчать, що для багатьох видів обладнання, яке широко застосовується на вищевказаних підприємствах (електродвигуни, редуктори, мішалки, вентилятори і т.д.), напрацювання на відмову найчастіше визначається надійністю підшипникових вузлів [4]. Крім того, до 90% випадків аварійних руйнувань підшипникових вузлів спричинено незадовільною роботою ущільнень [5].

Аналіз виходу з ладу підшипникових вузлів показав, що однією з причин є неможливість забезпечення практично повної герметичності. Потенційні можливості традиційних ущільнень значною мірою вичерпали себе, і забезпечити необхідний рівень герметичності вони не в змозі.

Для захисту підшипникових вузлів за важких умов експлуатації (сильна запиленість, підвищена вологість, наявність абразивних частинок тощо) досить добре себе зарекомендували магніторідинні герметизуючі комплекси (МЖГК). Найбільш широко МРГК встановлювалися в електродвигунах вентиляторів градирень та апаратів повітряного охолодження (АПО), електричних машинах та вентиляторах, поворотних редукторах вугледобувних та прохідницьких комбайнів тощо [6, 7, 8, 9].

Аналіз проведених випробувань, дослідної та промислової експлуатації показує зниження ризику аварій ущільнювальних систем, що включають МРГК, у порівнянні з традиційними ущільненнями за рахунок підвищення безвідмовності та безаварійності роботи технологічного обладнання. Проте кількісну оцінку ризику техногенних аварій можна надати лише з урахуванням системного багаторівневого аналізу.

При оцінці техногенної безпеки слід враховувати загальні принципи інтегрованої системи ризиків, що містить такі компоненти – якість, безпека, екологія, охорона праці. Вони регламентуються міжнародними стандартами серій ISO 9000, ISO 14000 та ISO 18000.

Крім того, слід враховувати, що рівень техногенної безпеки є системною категорією. Сутність системної методології полягає у трактуванні безпеки як функціональної властивості складних динамічних багаторівневих систем. Це пов'язано з тим, що властивість системи є більшою, ніж проста сума властивостей її компонентів. В загальному випадку методи системного аналізу та синтезу розглядають технологічне устаткування як одну з складових частин загальної системи «людина – машина – довкілля». Вивчення та дослідження такої системи – це задача аналізу великих обсягів різномірної інформації та їх взаємозв'язків. Однак така система містить усі типи причин, в результаті яких відбуваються техногенні події – помилки (людина), відмови (техніка), несприятливі впливи на них ззовні (робоче та зовнішнє середовище).

Для аналізу впливу на безпеку МРГК застосуємо принцип системності, який передбачає підхід до нової техніки як до комплексного об'єкта, що є сукупністю взаємозалежних окремих елементів (функцій), реалізація яких забезпечує досягнення необхідного ефекту. Принцип системності передбачає вивчення об'єкта, з одного боку, як єдиного цілого, з іншого – як частини більшої системи, в якій об'єкт, що аналізується, перебуває з іншими системами у певних зв'язках. Отже, принцип системності охоплює всі сторони об'єкта [10].

Це дозволяє перетворити загальну систему на трирівневу ієрархічну систему «магніторідинний герметизуючий комплекс – технологічне обладнання – техногенна безпека», а питання впливу МРГК на забезпечення прийнятної безпеки інтегрувати як функціональну властивість такого складного об'єкта. Важливим є також те, що таку систему можна представити у вигляді моделі, зручної для аналітичного дослідження та синтезування компонентів – підсистем.

На даний час немає загальноприйнятого кількісного показника безпеки технічного об'єкта чи системи. Проте загально визнано, що пожежі, вибухи, травми тощо є випадковими подіями, для опису та кількісної оцінки яких можуть бути застосовані відомі показники та методи теорії ймовірностей. Тому кількісні показники безпеки обладнання пов'язані з показниками безвідмовності та безаварійності, математичні моделі яких добре розроблені [11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз наукових джерел [12, 13, 14] показав, що основна увага наукових праць фокусується на питаннях оцінки ризику під час реалізації процесів життєвого циклу продукції. Слід зауважити, що питанням оцінки ризиків, які виникають під час розробки, впровадження та/або модернізації технологічного обладнання та його елементів, практично майже не приділяється увага. Відповідно в літературі дуже мало висвітлюються питання кліматичних та екологічних особливостей розташування підприємств, а також існуючий технологічний рівень у галузі промисловості.

В роботі [11] вказується, що мета подальших досліджень повинна полягати в оцінці ступеня впливу конкретних властивостей людино-машинної системи на умови прояву та величину техногенного ризику. Насамперед це стосується властивостей технічних систем. Це пов'язано з тим, що дрібні відмови можуть провокувати значні наслідки. Накопичення прихованих пошкоджень, старіння матеріалів, динамічні втомлювальні процеси в конструкціях можуть

приводити до різких якісних змін. Фактор робочого довкілля може виявитися суттєвим навіть для однотипних технічних систем через «вік» та особливості експлуатації. Та чи інша дія, яка виявлена як «вразлива ланка в технічній системі», може призвести до ланцюгової реакції відмов.

Основою аналізу техногенного ризику має бути не порівняння з критеріями прийнятності, а виявлення «вузьких» місць в системі функціонування об'єкта для подальшого обґрунтування заходів безпеки.

На сьогоднішній день у світовій практиці при оцінці ризиків широко використовуються метод аналізу видів та наслідків потенційних невідповідностей (FMEA-Potential Failure Mode and Effects Analysis). Близько 80% розробок технічних виробів і технологій проводиться наразі із застосуванням методу FMEA чи його модифікації [14]. Важливим для цілей даного дослідження є те, що метод охоплює усі етапи життєвого циклу продукції та будь-які технологічні процеси. Причому метод дозволяє аналізувати складні технічні системи, як загалом, так і їх складові [15].

За допомогою цього методу можна вирішувати прямі та зворотні задачі оцінки безпеки. Прямі задачі дозволяють визначити величину ризику конкретного устаткування. Зворотні задачі мають на меті забезпечити технічне рішення таким чином, щоб виконати умову безпеки із заздалегідь заданою кількісною мірою ризику.

Використовуючи кількісні показники ризику, можна «вимірювати» потенційну небезпеку і навіть порівнювати небезпеки різної природи. До таких методів належить різновид FMEA – метод Файн-Кінні (Fine & Kinney) [16]. Відповідно до методу Файн-Кінні техногенний ризик R розраховується за формулою:

$$R = E \times A \times S, \quad (1)$$

де E (Existence) – ймовірність виникнення небезпечної ситуації;

A (Avoidance) – ймовірність того, що небезпечна ситуація призведе до завдання шкоди;

S (Severity) – тяжкість наслідків.

Цей метод враховує також ступінь схильності людини до впливу шкідливих чинників при техногенній загрозі. Тому пропонується його вдосконалити з метою оцінки техногенного ризику.

Величина техногенного ризику R в результаті може мати значення від 1 до 1000. Для R заздалегідь має бути встановлений критерій $R_{\text{гранич}}$. (граничне значення) техногенного ризику. Відповідно до рекомендацій [14] граничне значення $R_{\text{гранич}}$ задається в межах $100 < R_{\text{гранич}} < 125$ (як добуток середніх оцінок $R_{\text{гранич}} = 5 \times 5 \times 5 = 125$). Підприємства, які давно використовують цю методологію, в особливо відповідальних випадках працюють у діапазоні $20 < R_{\text{гранич}} < 40$ [14].

Метою дослідження є вдосконалення методу оцінки техногенних ризиків за рахунок системного багаторівневого аналізу герметизуючих комплексів обладнання небезпечних виробництв для вивчення впливу магніторідинних герметизуючих комплексів на техногенну безпеку і обґрунтування їх застосування у атомній енергетиці.

Виклад основного матеріалу

Надійність та достовірність результатів аналізу багато в чому визначаються повнотою вихідних даних. В якості вихідних даних для аналізу були використані результати стендових, дослідно-промислових випробувань та експлуатації МРГК на різному технологічному обладнанні. Використовувалися журнали технічного стану технологічного обладнання, де запроваджено МРГК. З урахуванням терміну експлуатації МРГК, який на низці об'єктів становить 15–20 років, виходила достовірна статистична вибірка з оцінки надійності та безаварійності роботи обладнання. Також було використано аналізи роботи МРГК, проведені технічними службами заводів, де експлуатуються МРГК [18]. Крім того, технічні служби заводів надали статистичні матеріали у вигляді банку даних щодо відмов, поломок, нещасних випадків, аварій, що сталися з вини традиційних ущільнень (лабиринтні, манжетні тощо).

Вихідними даними для аналізу були також повна документація про об'єкт, його технічні характеристики, режими роботи, діапазон зміни параметрів, проєктувальні, перевірочні розрахунки фізичних процесів, що протікають в об'єкті, дані про різні системи об'єкта та характер взаємозв'язку між системами. Використовувалися дані, отримані на інших видах устаткування, але які мають певні подібні характеристики. Доповнювалися ці відомості наявними рекламациями та претензіями споживачів, що експлуатують це обладнання, до заводів-виробників.

З урахуванням специфіки застосування МРГК (переважно або на дорогому, або відповідальному устаткуванні) було прийнято рішення про недостатність накопиченої статистичної бази для застосування методів теорії ймовірності і тому було проведено якісний аналіз. Це дозволяє зробити групу методів, які також входять до FMEA, де вихідні дані із залученням експертних оцінок зводяться до кваліметричних табличних шкал значущості, що характеризують виникнення небезпечної ситуації та тяжкість її наслідків. Це дозволяє отримувати кількісні характеристики ризику.

Попередні розрахунки за формулою (1) та аналіз отриманих результатів показали, що низку чинників, які впливають на рівень техногенної безпеки, не враховано у кваліметричних таблицях 1 та 2, наведених у [16, 17, 14].

Таблиця 1. Шкала оцінки ймовірності виникнення небезпечної ситуації, E

Критерій ймовірної послідовності події або випадкової обставини	Оцінка P ₁ , бал
Один раз протягом терміну експлуатації (20 років)	1
Один раз між обстеженнями (5 років)	2
П'ять разів між обстеженнями – щорічно	3
Десять разів між обстеженнями – двічі на рік	4
Щомісяця	5
Два рази на місяць	6
Щотижня	7
Два рази на тиждень	8
Щодня	9
Постійна присутність безпеки	10

Таблиця 2. Шкала оцінки ймовірності заподіяння шкоди, А

Критерій ймовірності заподіяння шкоди	Оцінка P ₂ , бал
Мізерна (цілком неможливо)	1
Незначна (практично неможливо)	2
Вельми невелика (майже неможливо)	3
Невелика (ймовірність трохи менше 50%)	4
Помірна (ймовірність близько 50%)	5
Велика (ймовірність приблизно 50–60%)	6
Вельми велика (ймовірно)	7
Висока (дуже ймовірно)	8
Дуже висока (майже гарантовано)	9
Визначена (неминуча)	10

Забезпечити достовірність результатів рівня техногенної безпеки запропоновано за рахунок додаткового обліку ступеня схильності людини до впливу шкідливих факторів від механічних пошкоджень та стану обладнання. Для цього формула (1) була перетворена на вигляд:

$$R = E \times A \times S \times K, \quad (2)$$

де шкала оцінки тяжкості наслідків S була розроблена на основі обробки вихідних даних, що використовуються при аналізі роботи МРГК з урахуванням ступеня схильності людини до впливу шкідливих факторів при механічних пошкодженнях, і представлена в табл. 3.

$K = K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5 \times K_6$ – поправочні коефіцієнти, що враховують:

K_1 – коефіцієнт, що враховує термін експлуатації устаткування, ($K_1 = 1,0 \dots 1,1$);

K_2 – коефіцієнт, що враховує вплив фізичного і морального старіння устаткування, його ремонт ($K_2 = 1,0 \dots 1,1$);

K_3 – коефіцієнт, що враховує запровадження нових технічних рішень на етапі модернізації ($K_3 = 0,9 \dots 1,0$);

K_4 – коефіцієнт, що враховує виготовлення технологічного устаткування та його комплектуючих на сертифікованих ділянках ($K_4 = 0,9 \dots 1,0$);

K_5 – коефіцієнт, що враховує взаємне розташування небезпечних об'єктів ($K_5 = 1,0 \dots 1,2$);

K_6 – коефіцієнт, що враховує умови обслуговування та наявність резервування устаткування ($K_6 = 0,9 \dots 1,0$).

Поправочні коефіцієнти $K_1 - K_2$ одержано експертним шляхом на підставі результатів експлуатації.

В даному випадку, зважаючи на те, що детально аналізується тільки один вид небезпеки, пов'язаний з ущільнювальними системами, доцільно розглядати граничне значення техногенного ризику в діапазоні $15 < R_{\text{гранич}} < 30$.

Таблиця 3. Шкала оцінки тяжкості наслідків, S *

Критерій тяжкості наслідків, S		Оцінка S, бал
Для людини	Для технологічного обладнання	
Травми, поранення, опіки або забиття відсутні	Функціональний збій в обладнанні чи процесі – немає потенційної небезпеки	1
Невеликі пошкодження та повне відновлення без необхідності відсутності на робочому місці	Повністю достатньо наявних технічних засобів та заходів захисту	2
Повне відновлення та повернення після відсутності на робочому місці менше 3 днів	Необхідне проведення стандартних процедур у сфері ремонту, екологічної безпеки та охорони праці	3
Повне відновлення та повернення після відсутності на робочому місці від трьох днів до трьох тижнів	Часткове пошкодження обладнання, необхідний ремонт із заміною комплектуючих, пошкодження можна швидко ліквідувати	4
Повне відновлення та повернення після відсутності на робочому місці більше трьох тижнів	Часткове пошкодження обладнання, необхідний ремонт із заміною комплектуючих, пошкодження не можна швидко ліквідувати	5
Повернення на робоче місце після відсутності більше трьох тижнів, проблеми зі здоров'ям	Серйозне пошкодження обладнання вимагає спеціальних заходів захисту та безпеки, для усунення необхідно більш тривалий час	6
Постійне слабе зниження здатності до трудової діяльності	Повне відновлення обладнання неможливе, при експлуатації не витримується ряд технічних характеристик (наприклад, підвищення вібрації тощо)	7
Постійна серйозна інвалідність	Експлуатація обладнання може бути дозволена на обмежений термін спеціальним сертифікаційним центром або галузевим інститутом, що має відповідну ліцензію після усунення всіх отриманих від них зауважень	8
Постійна повна інвалідність	Аварія, неможливість відновлення обладнання, можуть бути серйозні наслідки для навколишнього середовища	9
Смерть	Техногенна катастрофа	10

*Для визначення техногенного ризику R вибирається більш вагомий критерій тяжкості наслідків, S

Запропонований метод дозволяє обґрунтувати вибір заходів щодо забезпечення рівня техногенного ризику шляхом співвідношення величини ризику, визначеного за формулою (2), з граничними значеннями категорій ризику, розроблених авторами на основі умов експлуатації обладнання небезпечних виробництв та викладених у табл. 4.

Таблиця 4. Категорія ризику

Категорії ризику	Техногенний ризик, R	Опис та необхідні заходи
I. Незначний ризик	≤ 15	Спеціальні заходи не потрібні. Документувати ризики не обов'язково
II. Прийнятний ризик	15–30	Спеціальні заходи для зменшення ризику не потрібні, але рекомендується оцінити, які заходи можна було б реалізувати з мінімальними витратами. Ризик все ж таки необхідно контролювати
III. Терпимий ризик	30–125	Необхідні заходи зменшення ризику, але їх не обов'язково реалізовувати негайно, необхідно брати до уваги економічні міркування. Заходи необхідно проводити принаймні протягом 3–5 місяців після оцінки ризику
IV. Значний ризик	125–400	Роботу не можна продовжувати, доки не вжито заходів для зменшення або усунення ризику. Якщо роботу неможливо перервати, то заходи (колективні) необхідно вжити протягом 1–2 місяців залежно від кількості працівників, що піддаються ризику. Необхідно своєчасно придбати засоби індивідуального захисту
V. Неприпустимий ризик	≥ 400	Зменшення ризику є обов'язковим. Якщо через брак коштів немає можливості здійснити превентивні заходи, то робота у небезпечній зоні категорично забороняється.

Результати розрахунків техногенних ризиків згідно з формулою (2) на прикладі синхронних електродвигунів типу СДН виробництва АТ «Завод великих електричних машин» (м. Каховка), при комплектації виносних підшипникових стійок лабіринтними ущільненнями та МРГК представлені на рисунках 1, 2, 3. Зазначені електродвигуни застосовуються в якості приводу для водяних, шламових насосів; цементних, вуглерозмельних, рудорозмельних та інших промислових млинів; шахтних вентиляторів головного провітрювання; на магістральних нафто- та газопроводах і т.п. Вони можуть експлуатуватись як у приміщеннях, так і на відкритому повітрі. Навколишнє середовище під час експлуатації синхронних машин може містити значну кількість вологи, пилу, абразиву (цементний, вугільний пил, штиб і т.ін.)

З рис. 1 видно, що умови експлуатації електродвигунів однакового року випуску (початку 90-х років), однакової потужності та оборотів вала, що обертається, досить сильно впливають на рівень техногенного ризику. Більш комфортні умови експлуатації у приводу водяних насосів, які розташовані в закритих приміщеннях. Це ілюструється низьким рівнем ризику і, мабуть, пояснює той факт, що МРГК за таких умов не встановлювалися. Потреба

у впровадженні МРГК для всіх інших існує на заводах постійно. Найважчі умови експлуатації у шахтних вентиляторів головного провітрювання, оскільки при їх експлуатації обов'язково відбувається налипання пилу на поверхню лопаток, що призводить до дисбалансу ротора та появи підвищеної вібрації підшипникових вузлів. Це збільшує величину техногенного ризику для МРГК.

Можливість МРГК забезпечити практично повну герметичність дозволяє підтримувати техногенну безпеку на постійному та досить високому рівні.

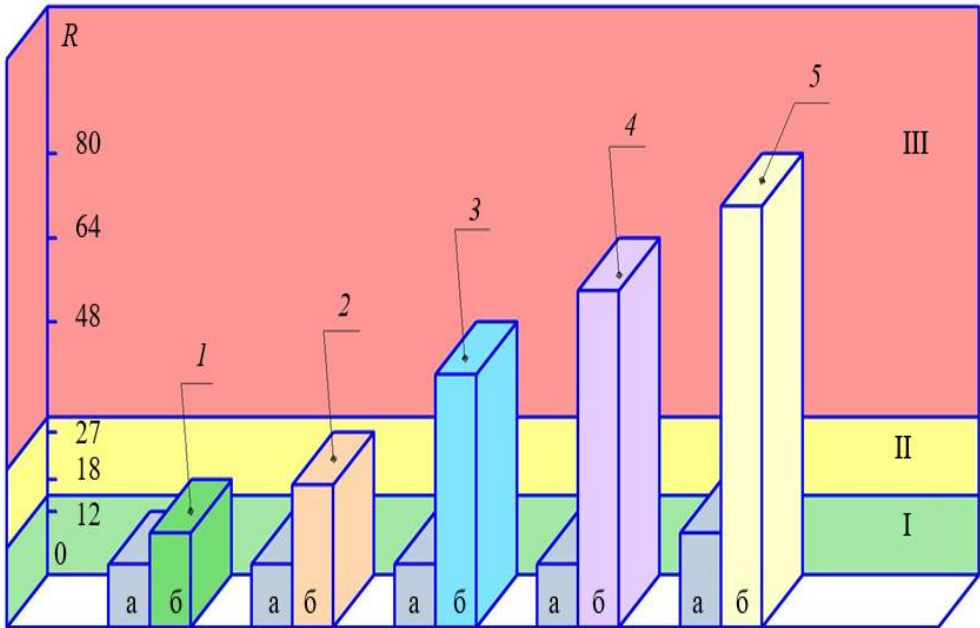


Рис. 1. Залежність техногенного ризику електродвигунів типу СДН залежно від його призначення:

а) з комплектацією МРГК;

б) із комплектацією лабіринтними ущільненнями;

1 – для приводу водяних насосів у закритих приміщеннях;

2 – для приводу водяних насосів на свіжому повітрі;

3 – для приводу цементних млинів;

4 – для приводу вуглерозмольних млинів;

5 – для приводу шахтних вентиляторів

Було проаналізовано техногенний ризик при застосуванні електродвигунів серій СДН-14 та СДН-15 при 1000 об/хв та з різним діапазоном потужності: 800 кВт; 1,25 МВт; 1,6 МВт; 2,5 МВт; 3,2 МВт, які використовувалися в якості приводів водяних насосів. Оцінка ризику показала, що із зростанням потужності електричної машини рівень техногенної безпеки не змінюється, що впливає з рис. 2.

Це дозволило на наступному етапі проаналізувати вплив частоти обертання вала на техногенний ризик за приблизно однакової потужності електродвигунів. Розглядалися електродвигуни серії СДН-14 та СДН-15 випуску початку 90-х років з такими показниками: 375 об/хв., 1000 кВт; 500 об/хв., 1250 кВт; 600 об/хв, 800 кВт; 750 об/хв, 1250 кВт; 1000 об/хв, 1000 кВт.

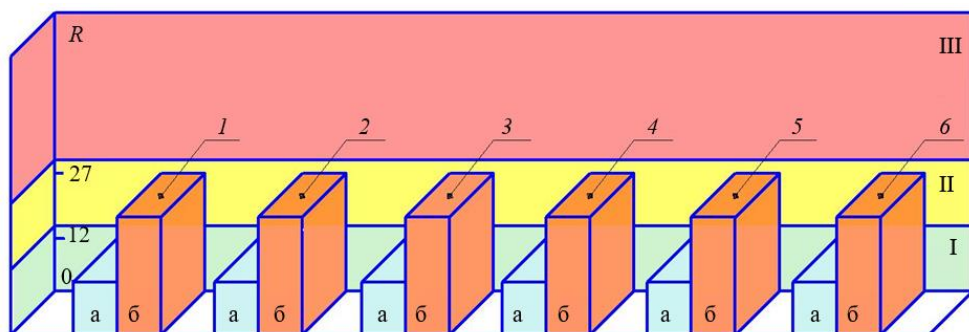


Рис. 2. Техногенний ризик електродвигунів серії СДН-14 та СДН-15 з різним діапазоном потужності:

- а) з комплектацією МРГК;
- б) із комплектацією лабіринтними ущільненнями;
- 1 – за потужності 800 кВт; 2 – за потужності 1,25 МВт;
- 3 – за потужності 1,25 МВт; 4 – за потужності 1,6 МВт;
- 5 – за потужності 2,5 МВт; 6 – за потужності 3,2 МВт

Аналіз результатів рис. 3 показує незначний вплив збільшення обертів вала, що обертається, на техногенний ризик. Збільшений ризик при невеликих оборотах пов'язаний з тим, що конструктивно на них застосовуються манжетні ущільнення, які виявилися менш надійними, ніж лабіринтні. Цей висновок може бути застосований лише до цього конкретного випадку, тому що вивчалися електродвигуни, що експлуатуються близько 20–25 років, в них за рахунок зносу ефективність манжетного ущільнення знизилася. Техногенний ризик при використанні МРГК практично не залежить від кількості обертів вала, що обертається.

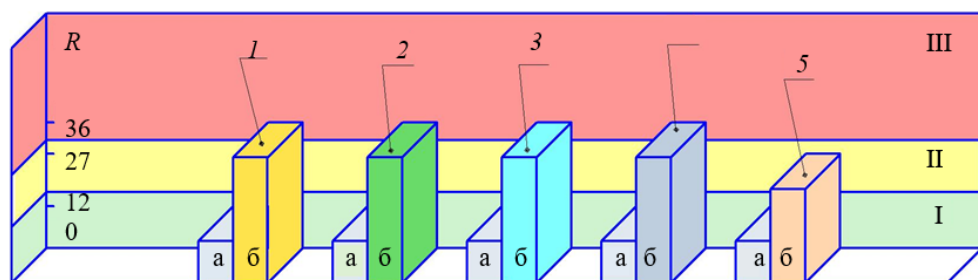


Рис. 3. Залежність техногенного ризику електродвигунів типу СДН залежно від частоти обертання вала:

- а) з комплектацією МРГК у всьому діапазоні частот;
- б) з комплектацією традиційними ущільненнями:
- 1 – 375 об/хв; 2 – 500 об/хв; 3 – 600 об/хв; 4 – 750 об/хв; 5 – 1000 об/хв

Аналіз проведених розрахунків показує, що всі електродвигуни, які досліджуються, знаходяться в зоні терпимого ризику. Це пояснюється тим, що всі електродвигуни знаходяться в експлуатації і тому повинні задовольняти вимогам, що висувуються до них, у тому числі й з екологічної безпеки. При проектуванні нового устаткування чи модернізації чинного потрібно прагнути

максимально можливого зниження техногенного ризику, оскільки аналіз великих техногенних катастроф останнього часу показує, що саме системи ущільнення найчастіше були першою ланкою в ланцюжку відмов, що касадно переростають в аварію. Саме тому роботи в III категорії (див. табл. 4) щодо зниження ризику є актуальними, що підтверджують впровадження МРГК замість традиційних ущільнень.

Враховуючи викладене, можна дійти висновку щодо доцільності застосування МРГК на усіх ланках атомних електростанцій, де використовується електропривод. Це стосується також турбогенераторів, які є синхронними машинами.

Висновки

1. Аналіз великих техногенних катастроф на об'єктах критичної інфраструктури підтверджує, що у більшості випадків їх причинами були механічні несправності багатьох видів технологічного обладнання (особливо їх підшипникових вузлів), коли відмова відбувається через незадовільну роботу систем ущільнювачів.

2. Забезпечення високого рівня герметичності досягається застосуванням МРГК. Це обумовлено доцільністю їх використання в усіх електродвигунах АЕС з огляду на можливість виникнення аварійних ситуацій на другорядних ланках технологічного процесу з настанням ланцюга нештатних ситуацій.

3. Порівняння рівнів техногенної безпеки при застосуванні різних систем ущільнювачів можливе з використанням удосконаленого методу оцінки ризиків з урахуванням системного багаторівневого аналізу на основі методу Файн-Кінні для трирівневої ієрархічної системи «МРГК – технологічне обладнання – техногенна безпека».

4. Аналіз оцінки ризиків для синхронних електродвигунів серії СДН виробництва АТ «ЗКЕМ» (Нова Каховка) за різних умов експлуатації, потужності та оборотах валу, що обертається, показав зниження техногенного ризику при впровадженні МРГК в діапазоні 1,5...4 рази.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Манец І.Г., Грядущий Б.А., Левіт В.В. (2010). Технічне обслуговування та ремонт шахтних стовбурів. Донецьк. Юго-Восток, 2010. Т. 1. 409 с.
2. Коваль А.Н., Мелковский В.И., Чехлатый Н.А. (2013). Основные направления повышения техногенной безопасности и энергетической эффективности стационарных установок на предприятиях угольной отрасли. Вестник МАНЭБ. №2. С. 23–28.
3. Белов С.А., Литвак В.В., Солод С.С. (2008). Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС. Томск: Изд-во НТЛ. 218 с.
4. Черменский О.Н., Федотов Н.Н. (2003). Подшипники качения: справочник-каталог. Москва : Машиностроение. 576 с.
5. Павлищев В.Т. (2001). Підшипники кочення: основні параметри, конструкції опор, змащування, ущільнення та розрахунки ресурсу. Львів : Нац. ун-т «Львівська політехніка». 136 с.
6. Radionov A. (2018). Magnetic fluid sealing complexes for bearing assemblies of mine main ventilation fans. *Magneto hydrodynamics*. Vol. 54, No. 1–2. P. 109–114.
7. Radionov A., Podoltsev A., Peczkis G. (2018). The specific features of high velocity magnetic fluid sealing complexes. *Open Engineering*. Vol. 8, Issue. 1. P. 539–544.

8. Радионов, А.В. (2011). Опыт эксплуатации магнитожидкостных герметизаторов в промышленной энергетике. Гірничя електромеханіка та автоматика. Вип. 87. С. 134–138.
9. Радионов А.В., Виноградов А.Н. (2009). Комбинированные магнитожидкостные герметизаторы – эффективная альтернатива бесконтактным уплотнениям подшипниковых узлов с жидкой смазкой. Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. Вип. 35 (76). С. 148–155.
10. Лихолетов, В.В. (2004). Системный анализ и проектирование систем управления. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. 160 с.
11. Белов П.Г. (2014). Управление рисками, системный анализ и моделирование. Москва : Издательство Юрайт. 728 с.
12. Вамболь С.А., Метелев А.В. (2013). Система экологической безопасности с многофазными дисперсными структурами. Технологии техносферной безопасности. №5(49). С. 1–7.
13. Шмандий В.М., Старовойда А.Л. (2002). Оценка техногенной опасности, формируемой промышленными предприятиями. Вісник КДПУ. Кременчук : КДПУ. Вип. 2(13), Розд. 2. С. 77–80.
14. Marhavilas P., Koulouriotis D., Gemeni V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. №24. P. 477–523.
15. Топоров, А. А. (2005). Новый подход к анализу техногенно опасных ситуаций на технологических производствах. Наукові праці ДонНТУ. Серія: Хімія і хімічна технологія. Донецьк, Дон НТУ. 2005. Вип. 95. С. 126–130.
16. Калькис В., Кристиньш И., Роя Ж. (2005). Основные направления оценки рисков рабочей среды. Рига: SIA «Jelgavas tipografija». 74 с.
17. Толмачев, В.В., Федорова И.Н. (2012). Модель для определения значимости риска эксплуатации безшовных баллонов. Компетентность. №9–10 (100–101). С. 42–47.
18. Радионов А.В., Уваров Н.В. (2003). Анализ опыта работы магнитожидкостных герметизаторов на СГПП «Объединение «Азот»». Химическая техника. 2003. №9. С. 26–28.

Стаття надійшла до редакції 04.11.2022 і прийнята до друку після рецензування 21.02.2023

REFERENCES

1. Manets, I. G., Gryadushchiy, B. A., & Levit, V. V. (2010). Technical maintenance and repair of mine shafts (Vol. 1). Donetsk: Yugo-Vostok [in Ukrainian].
2. Koval, A. N., Melkovsky, V. I., & Chekhlaty, N. A. (2013). The main directions of improving the technogenic safety and energy efficiency of stationary installations at the enterprises of the coal industry. *Bulletin of MANEB*, 2, 23–28 [in Russian].
3. Belov, S. A., Litvak, V. V., & Solod, S. S. (2008). Reliability of thermal power equipment of thermal power plants. Tomsk: NTL Publishing House [in Russian].
4. Chermensky, O. N., & Fedotov, N. N. (2003). Rolling bearings: directory-catalogue. Moscow: Mechanical engineering [in Russian].
5. Pavlishchev, V. T. (2001). Rolling bearings: basic parameters, support designs, lubrication, sealing and resource calculations. Lviv: National Lviv Polytechnic University [in Ukrainian].
6. Radionov, A. (2018). Magnetic fluid sealing complexes for bearing assemblies of mine main ventilation fans. *Magneto hydrodynamics*, 54(1–2), 109–114.
7. Radionov, A., Podoltsev, A., & Peczkis, G. (2018). The specific features of high velocity magnetic fluid sealing complexes. *Open Engineering*, 8(1), 539–544.
8. Radionov, A. V. (2011). Experience in the operation of magnetic fluid seals in industrial power engineering. *Handling electromechanics and automation*, 87, 134–138 [in Russian].

9. Radionov, A. V., & Vinogradov, A. N. (2009). Combined magnetic fluid seals are an effective alternative to non-contact seals for liquid lubricated bearing arrangements. *Enrichment of minerals: sci.-tech. zb.*, 35(76), 148–155 [in Russian].
10. Likholetov, V. V. (2004). System analysis and design of control systems. Chelyabinsk: SUSU Publishing House [in Russian].
11. Belov, P. G. (2014). Risk management, system analysis and modeling. Moscow: Yurayt Publishing House [in Russian].
12. Vambol, S. A., & Metelev, A. V. (2013). Environmental safety system with multiphase dispersed structures. *Technologies of technosphere safety*, 5(49), 1–7 [in Russian].
13. Shmandiy, V. M., & Starovoyda, A. L. (2002). Assessment of technogenic danger generated by industrial enterprises. *Bulletin of KDPU*, 2(13), 77–80 [in Russian].
14. Marhavalas, P., Koulouriotis, D., & Gemeni, V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24, 477–523.
15. Toporov, A. A. (2005). A new approach to the analysis of technogenically dangerous situations in technological production. *Scientific practices of DonNTU. Series: Chemistry and chemical technology*, 95, 126–130 [in Russian].
16. Kalkis, V., Kristins, I., & Roja, J. (2005). The main directions of risk assessment of the working environment. Riga: SIA "Jelgavas tipografija" [in Russian].
17. Tolmachev, V. V., & Fedorova, I. N. (2012). Model for determining the significance of the risk of operation of seamless cylinders. *Competence*, 9-10(100-101), 42–47 [in Russian].
18. Radionov, A. V., & Uvarov, N. V. (2003). Analysis of the operating experience of magnetic-liquid sealers at the State Enterprise «Association «Azot»». *Chemical engineering*, 9, 26–28 [in Russian].

The article was received 04.11.2022 and was accepted after revision 21.02.2023

Левченко Лариса Олексіївна

доктор технічних наук, професор, професор кафедри цифрових технологій в енергетиці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Адреса робоча: проспект Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7227-9472> **e-mail:** larlevch@ukr.net

Радіонов Олександр Володимирович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри технічного сервісу Сумського національного аграрного університету

Адреса робоча: вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, Україна, 40021

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1112-5146> **e-mail:** ferrohydrodynamica@gmail.com