

**Безпрозваних Ганна Вікторівна**, доктор технічних наук, професор; тел. (+38) 050-343-55-59; E-mail: Hanna.Bezprozvannukh@khpi.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9584-3611>

**Москвітін Євгеній Сергійович**, кандидат технічних наук, старший викладач; тел. (+38) 095-346-84-19; E-mail: yevhen.moskvitin@khpi.edu.ua

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна

## СТРАТЕГІЯ УПРАВЛІННЯ СТАРІННЯМ КАБЕЛІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

**Анотація.** Управління старінням кабелів є невід'ємною та обов'язковою вимогою для безперервної безпеки та надійної роботи атомних електричних станцій у зв'язку з пролонгацією їх терміну експлуатації. Дослідження наукової спільноти зосереджено на адаптації електричних неруйнівних методів моніторингу зразків кабелів у лабораторних умовах для визначення стану їх електричної ізоляції. Виконаний аналіз програм управління старінням кабелів АЕС доводить за необхідне нових репрезентативних результатів дослідження кабелів для визначення характеристик із застосуванням спеціальних методів контролю та відповідного обладнання. Акцентовано на стратегії управління старінням кабелів із залученням науковців з фаховим досвідом щодо проведення комплексних діагностичних обстежень з кваліфікованим аналізом отриманих результатів на основі найсучасніших технологій. Представлено ефективні методи, методики та сучасна техніка з результати оцінки технічного стану кабелів АЕС.

**Ключові слова:** атомна електрична станція, кабель, термін експлуатації, управління старінням, методи контролю, технічний стан.

**Ganna Bezprozvannych**, Dr. techn. sciences, Professor; Tel. (+38) 050-343-55-59; E-mail: Hanna.Bezprozvannukh@khpi.edu.ua

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova Str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002

**Yevhen Moskvitin**, Cand. techn. Sciences, Tel. (+38) 095-346-84-19; E-mail: yevhen.moskvitin@khpi.edu.ua

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova Str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002

## AGING MANAGEMENT OF CABLES OF NUCLEAR POWER PLANTS

**Abstract.** Cable aging management is an integral and mandatory requirement for continuous safety and reliable operation of nuclear power plants due to the extension of their service life. The research of the scientific community is focused on the adaptation of electrical non-destructive methods of monitoring cable samples in laboratory conditions to determine the state of their electrical insulation. The performed analysis of NPP cable aging management programs proves the need for new representative results of cable research to determine characteristics using special control methods and appropriate equipment. Emphasis is placed on the strategy of cable aging management with the involvement of scientists with professional experience in conducting complex diagnostic examinations with qualified analysis of the obtained results based on the most modern technologies. Effective methods, techniques, and modern techniques for the assessment of the technical condition of NPP cables are presented.

**Keywords:** nuclear power plant, cable, service life, aging management, control methods, technical condition.

**Безпрозванных Анна Викторовна**, доктор технических наук, профессор; тел. (+38) 050-343-55-59; E-mail: Hanna.Bezprozvannukh@khpi.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9584-3611>

**Москвитин Евгений Сергеевич**, кандидат технических наук, старший преподаватель; тел. (+38) 095-346-84-19; E-mail: yevhen.moskvitin@khpi.edu.ua

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, Харьков, 61000, Украина

## СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ СТАРЕНИЕМ КАБЕЛЕЙ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

**Аннотация.** Управление старением кабелей является неотъемлемым и обязательным требованием непрерывной безопасности и надежной работы атомных электрических станций в связи с пролонгацией их срока эксплуатации. Исследование научного сообщества сосредоточено на адаптации неразрушающих электрических методов мониторинга образцов кабелей в лабораторных условиях для определения

состояния их электрической изоляции. Выполненный анализ программ управления старением кабелей АЭС доказывает необходимые новые репрезентативные результаты исследования кабелей для определения характеристик с применением специальных методов контроля и соответствующего оборудования. Акцентировано на стратегии управления старением кабелей с привлечением ученых со профессиональным опытом проведения комплексных диагностических обследований с квалифицированным анализом полученных результатов на основе самых современных технологий. Представлены эффективные методы, методики и современная техника с результатами оценки технического состояния кабелей АЭС.

**Ключевые слова:** атомная электростанция, кабель, срок эксплуатации, управление старением, методы контроля, техническое состояние.

**Постановка проблеми.** Завдання технічного обслуговування кабелів атомних електричних станцій (АЕС) з кожним роком стає все більш складним та відповідальним. Багато типів кабелів вичерпали встановлений ресурс, інші наближаються до завершення планових термінів експлуатації [1-4].

З огляду на те, що на одному блоці АЕС зазвичай знаходиться близько 1500 км силових, контрольних, контрольно-вимірювальних та інших кабелів у більш ніж 25 000 ланцюгах (рис. 1), заміна всіх кабелів є серйозним економічним навантаженням та технічно, практично, неможлива за причини складності кабельної інфраструктури (рис. 1).



а



б [3]

Рис. 1. Траса кабелів на АЕС України (а) та АЕС «Джентілі-2» Канада (б).

В той же час, також технічно неможливо провести обстеження всіх кабелів, адже спектр типів кабелів різних виробників достатньо значний: кабелі відрізняються за призначенням, конструкцією, застосованими матеріалами та умовами експлуатації навіть на одному й тому ж блоці станції.

Системні профілактичні обстеження перевіряють роботу кабелів АЕС за нормальних навантажень. Такі випробування, зазвичай, не виявляють ознак старіння кабелів та її ізоляції. Кабелі вибрані з великими запасами за напругою, струмом, робочою температурою та мають високий опір ізоляції, електричну міцність, незначний дрейф всіх параметрів до моменту виходу з ладу (пробою у випадку силових кабелів).

Занепокоєння викликає продуктивність кабелів під винятковими навантаженнями, пов'язаними з проєктними (DBE) або навіть аварійними (LOCA) ситуаціями.

Найбільш оптимальним підходом є вибірка найбільш критичних кабелів, що експлуатуються у несприятливих умовах та середовищах. Для пошуку потенційно несприятливих середовищ («гарячих» точок - «плям»), як-от: висока температура, вологість або навіть занурення у воду, дія хімічних речовин або механічного навантаження, застосовується візуальний огляд кабельних ділянок. Наступним етапом є проведення діагностичних перевірок вибраних кабелів у конкретних несприятливих умовах експлуатації (рис. 1). Цей процес є безперервним, який завершується після перевірки кабелів в жорстких умовах експлуатації та встановлення відповідності їх технічного стану критеріям прийнятності, що підтверджує можливість функціонування до наступного періоду перевірки.

В наступний час світова практика експлуатації АЕС зосереджена на продовженні терміну служби до 40 і 60 років, навіть ставиться задача до 80 років, та вимагає програми управління старінням кабелів для визначення характеристик кабелю як за нормальної експлуатації, що ґрунтується на результатах профілактичних та діагностичних обстежень безпосередньо на АЕС, так і за умов аварії, що потребує спеціальних методів та відповідного обладнання для обстеження зразків кабелів у спеціалізованих лабораторних умовах. Управління старінням кабелів є невід'ємною та обов'язковою вимогою для безперервної безпеки та надійної експлуатації станцій. Наслідки старіння, особливо деградація матеріалів, поступово відчуються в усьому світі з початку експлуатації АЕС. Деградація матеріалів продовжуватиметься у міру старіння АЕС і продовження ліцензій на експлуатацію пов'язано з працездатністю кабелів у тому числі. Непередбачена та неконтрольована структурна деградація може призвести до значної втрати резервів безпеки, підриваючи довіру суспільства та напружуючи ресурси регуляторних органів та операторів. Для контролюючих органів важливо перевірити адекватність старіння методами управління, що застосовуються ліцензіатами, заснованими на надійних науково-технічних доказах, отриманих на репрезентативних даних діагностичних обстежень.

**Аналіз літературних джерел.** Деградація оболонки кабелю, електричної ізоляції та інших компонентів кабелів, встановлених на АЕС, відбувається в залежності від строку експлуатації, температури, радіації та інших факторів навколишнього середовища [5-8].

Експериментально доведено [9], що електричні та механічні властивості опромінених зразків силових кабелів зі зшитою поліетиленовою ізоляцією значно змінюються через роки зберігання в неконтрольованих умовах навколишнього середовища через пострадіаційні ефекти, що може призвести до значної похибки у оцінці технічного стану кабелів АЕС. Діагностичні дослідження необхідно повторювати з часом, навіть через роки, після впливу радіації.

Контроль стану силових кабелів низької напруги АЕС історично покладався на дослідження матеріалів ізоляції зі зразків кабелів, зокрема на руйнівні механічні випробування щодо визначення подовження. Проведені авторами дослідження, спонсоровані американським науково-дослідним інститутом електроенергетики (EPRI), доводять здатність діелектричної спектроскопії у низькочастотній області в діапазоні  $10^{-3}$  до  $10^6$  Гц для моніторингу старіння кабелів АЕС [10].

Лабораторними дослідженнями, представленими у [11], продемонстровано вплив часу радіаційного старіння за умови однакової поглиненої дози на діелектричні втрати у зразках: більш тривалий період старіння меншою дозою за одиницю часу призводить до зростання діелектричних втрат за рахунок кумулятивного процесу старіння.

В [12-14] представлено методи контролю та результати досліджень зістарених зразків кабелів АЕС. Методи включають проведення контролю на макро-рівні, тобто зразків кабелів, за електричними характеристиками: тангенсом кута діелектричних втрат, рефлектометрією [15] у часовій та частотній областях, частковими розрядами, а також на мікрорівні (локальних) за механічними та фізико-хімічними характеристиками: індентором, динамічним механічним аналізом твердості, інфрачервоною спектроскопією відповідно.

Авторами наголошується [16], що ключовим елементом в управлінні старінням кабелів є розробка нових методів і засобів контролю для оцінки технічного стану, що базуються на знанні механізмів старіння ізоляційних матеріалів, які перебувають під впливом кількох факторів (температура, вологість, радіаційне опромінення).

На підставі дослідження загальної деградації зразків силових низьковольтних кабелів АЕС з етилен-пропіленовою гумою в залежності від дози опромінення встановлено значний кореляційний зв'язок між відносним подовженням при розриві та значенням тангенсу кута діелектричних втрат на частоті 100 кГц та запропоновано адаптувати електричний метод як руйнівний метод для низьковольтних кабелів [17].

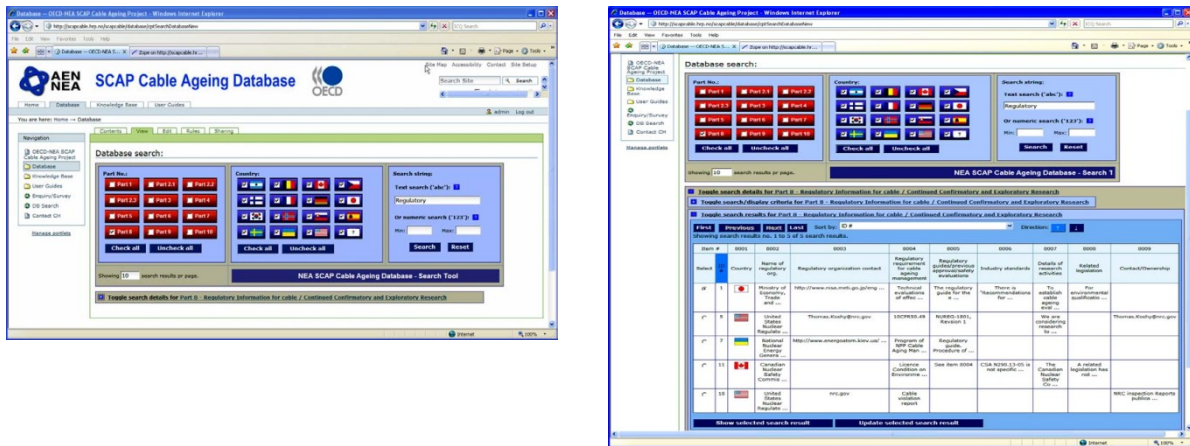
**Метою даної роботи** є визначення стратегії управління старінням кабелів на підставі діагностичних обстежень у лабораторних умовах зразків кабелів АЕС із застосуванням ефективних методів, методик та сучасної техніки.

**Програми управління старінням кабелів АЕС.** Для підтвердження функціональності кабелів для запланованої тривалої експлуатації понад 40 років необхідно мати критерії параметрів, за якими оцінюється технічний стан кабелів та визначається залишковий ресурс для продовження терміну експлуатації.

У програмі управління старінням кабелю атомних електростанцій в Україні – ПМ-Т.0.08.121-07 «Програма управління старінням кабелю АЕС (Атомної електростанції)» визначені вимоги для розробки, реалізації та змісту методичної, організаційно-технічної діяльності, пов'язаної з управлінням старінням кабелів АЕС [18]. Ця програма розроблена з урахуванням рекомендацій експертів МАГАТЕ. Метою управління старінням є забезпечення безпеки експлуатації, надійності кабелів за нормальних умов експлуатації протягом указанного терміну служби та меншого терміну за проектною аварійною умови. Програма застосовується до кабелів контролю (вимірювальних, сигнальних, блокуючих ) з полімерною та гумовою ізоляцією, силових кабелів низької та середньої напруги з полімерною та паперово-просоченою ізоляцією. Проведення робіт щодо управління старінням кабелів здійснюється персоналом АЕС із залученням, за необхідності, спеціалізованих організацій, які займаються питаннями управління старінням кабелів [18]. Перевипуск програми "Програми управління старіння кабелів АЕС" («NPP cable aging management programs») повинен був завершитися 03 листопада 2022.

Деградація ізоляції кабелів була обрана як одна з основних тем проекту SCAP [4] через її наслідки для ядерної безпеки станцій. SCAP було створено завдяки добровільному внеску Японії. Офіційно проєкт запущено у червні 2006 року та офіційно закрито міжнародним семінаром, що відбувся у Токіо в травні 2010 року. Учасниками проєкту були 17 країн, серед них - Україна представлена безпосередньо у розділі програми «Старіння кабелів» (рис.2). МАГАТЕ та ЄС також брали участь у цій програмі як спостерігачі [4].

База даних кабелів охоплювала такі функціональні області: кабелі безпеки, які підтримують аварійне охолодження реактора; кабелі, важливі для безпеки, тобто інші кабелі, для яких бажано запобігти або пом'якшити події базових проєктів; кабелі, важливі для роботи реактору, тобто кабелі, які можуть вийти з ладу і призвести до зупинки реактору або зниження його потужності. Серед них за призначенням: силові та контрольні кабелі на напругу до 15 кВ змінного струму та 500 В постійного струму відповідно, включаючи кабелі приладів і управління. Типи кабелів: коаксіальні, триаксіальні, волоконно-оптичні та гібридні. Типи ізоляції: зшитий поліетилен, полівінілхлоридний пластикат, етилен-пропіленова гума, етилен-вінілацетат, тощо. Матеріал провідників: мідь, мідь-олово, алюміній, скло, поліметилметаакрилат (останні два - матеріал осердя полімерних оптичних) та інші.



а

б

Рис. 2. Точка входу для інструменту пошуку бази даних, що показує панелі для вибору основних критеріїв пошуку, країн і рядків пошуку (а) та результати пошуку (б) [4].

База даних кабелів (рис.2) — реляційна база, що працює на основі програмного забезпечення MySQL. Введення даних до бази здійснюється за допомогою таблиць і спадних меню. Пошук у базі даних і додатків можна виконувати за запитом клієнтів. База даних складається з 10 частин. Частина 1 - Технічні характеристики кабелю. Частина 2 - Дані про технічне обслуговування кабелю (моніторинг стану). Частина 3 - Дані про події відмови кабелю. Частина 4 - Дані екологічної кваліфікації кабелю. Частина 5 - Екологічний стан станції та кабелю. Частина 6 - Пом'якшення навколишнього середовища встановленого кабелю. Частина 7 - Заміна кабелю. Частина 8 - Нормативна інформація щодо кабелю. Частина 9 - *Опис методів моніторингу стану*. Частина 10 - *Публікації та література з дослідженнями щодо старіння кабелів*.

У грудні 2010 року Комітет з безпеки ядерних установок (CSNI) Міжурядової Агенції з ядерної енергії (NEA), яка підтримує розвиток науково-технічної бази знань щодо безпеки ядерних установок, погодився підтримати дві наступні заходи у рамках проекту SCAP: 1. скликання наради експертів для створення бази даних щодо старіння кабелів - проект CADAК; 2. скликання наради експертів та створення Програми погіршення експлуатаційного досвіду та старіння компонентів (CODAP) (2011-2014). Проект CADAК є продовженням результатів роботи NEA щодо старіння кабелів за проектом SCAP [1-3]. У 2012 році вісім країн-членів NEA приєдналися до проекту CADAК, щоб об'єднати свої знання в загальну базу даних. Проект фінансувався за рахунок державних внесків кожної країни-учасниці NEA (Бельгія, Канада, Франція, Японія, Словаччина, Іспанія, Швейцарія та США). Україна не приймала участі у цьому проекті.

Проект САДАК мав на меті створити технічну основу для оцінки кваліфікованого життя електричних кабелів у світлі невизначеностей, виявлених після початкового (раннього) кваліфікаційного тестування. Реалізація проекту складалась з двох етапів. Робота першого (2012-2014 р.р.) була зосереджена на продовженні побудови бази даних для збору інформації і визначення методів для національних координаторів, які надають дані та документи, що представляють результати поточної діяльності дослідницьких та тестових програм. База даних дозволяє збирати, обмінюватися, передавати, зберігати та використовувати технічну інформацію про механізми погіршення технічного стану кабелів, відповідні результати досліджень і розробок, а також національні норми та стандарти для проектно-будівельного та експлуатаційного контролю. База даних САДАК включає понад 1300 записів, розділених десятьма частинами, що утворюють структуру бази, та майже 275 окремих збірок документів з десяти країн.

На другому етапі (2015-2017 р.р.) - аналіз даних щодо кабелів був однією з цілей проекту САДАК. Значна частина даних отримана з проекту SCAP, а інша - надана з країн, у тому числі й тих, котрі не брали участі у проекті САДАК протягом другого етапу. На другому етапі залишилося 5 країн-учасників: Канада, Німеччина, Словацька Республіка, Швейцарія та Сполучені Штати Америки. Значні варіації типів кабелів та ізоляційних матеріалів, відмінності умов експлуатації кабелів з тим же типом конструкції та застосованих матеріалів, процедура постачання, технологія виготовлення кабелів на кабельних підприємствах, терміни та умови зберігання, невизначеність існуючих кабельних даних *унеможливило завершення збору даних з інших країн проекту*. Було визнано, що обсяг роботи та ресурси, необхідні для комплексного аналізу, настільки значні, що такий аналіз для кабельних даних в базі САДАК неможливий. Іншими словами, *загальне завершення проекту з демонстрацією відповідного зістареного кабелю з визначеною залишковою продуктивністю за нормального режиму експлуатації та обслуговуванням після аварії для продовження терміну експлуатації 60 років або навіть більше є проблематичним. Для обґрунтування терміну служби 60 років або більше необхідні нові репрезентативні результати тестування та матеріали дослідження кабелів, а також більш детальний аналіз експлуатаційного досвіду для визнання критичного стану, додаткові перевірки з оцінкою технічного стану та профілактичного обслуговування* [3].

**Ефективні методи, методики та сучасна техніка для оцінки технічного стану кабелів АЕС.** Кафедра «Електроізоляційна та кабельна техніка» на протязі більше 20 років займається проблемою оцінки технічного стану кабелів АЕС. Започатковані проф. Набокою Б.Г. науково-дослідні роботи з Сертифікаційним центром АСУ Держцентру якості Державного комітету ядерного регулювання України (м. Харків) продовжуються з

апробацією нових методів неруйнівного моніторингу зразків кабелів АЕС у лабораторних умовах [19-25].

Виконані на кафедрі тривалі ресурсні дослідження зразків кабелів АЕС із застосуванням ефективних методів, методик та сучасної техніки дозволили встановити відмінності у механізмах терморадіаційного старіння різних видів ізоляції з урахуванням особливостей конструкції кабелів та отримати параметри для оцінки технічного стану кабелів (рис. 3) [19]. Тільки частина отриманих даних у період 2000-2007 р.р. включено у відповідні Робочі програми обстежень кабелів, розроблених у СертЦентрі АСУ за участю НТУ «ХП», враховано у програмі управління старінням кабелів АЕС в Україні (ПМ-Т.0.08.121-07) та внесено у базу даних SCAP [4]. Інша (рис. 4 - рис. 9) - у стадії «очікування».

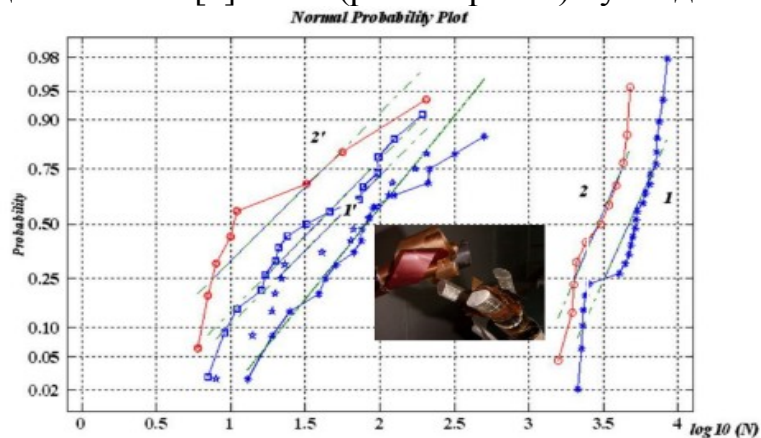


Рис. 3. Інтегральні функції розподілення числа подвійних згинів фазної (криві 1, 1') та поясної (криві 2, 2') паперової ізоляції силового кабелю ААШВ - 3x150-6 кВ в початковому стані після 25 років експлуатації (криві 1, 2) та після додаткового терморадіаційного старіння (криві 1', 2') [19].

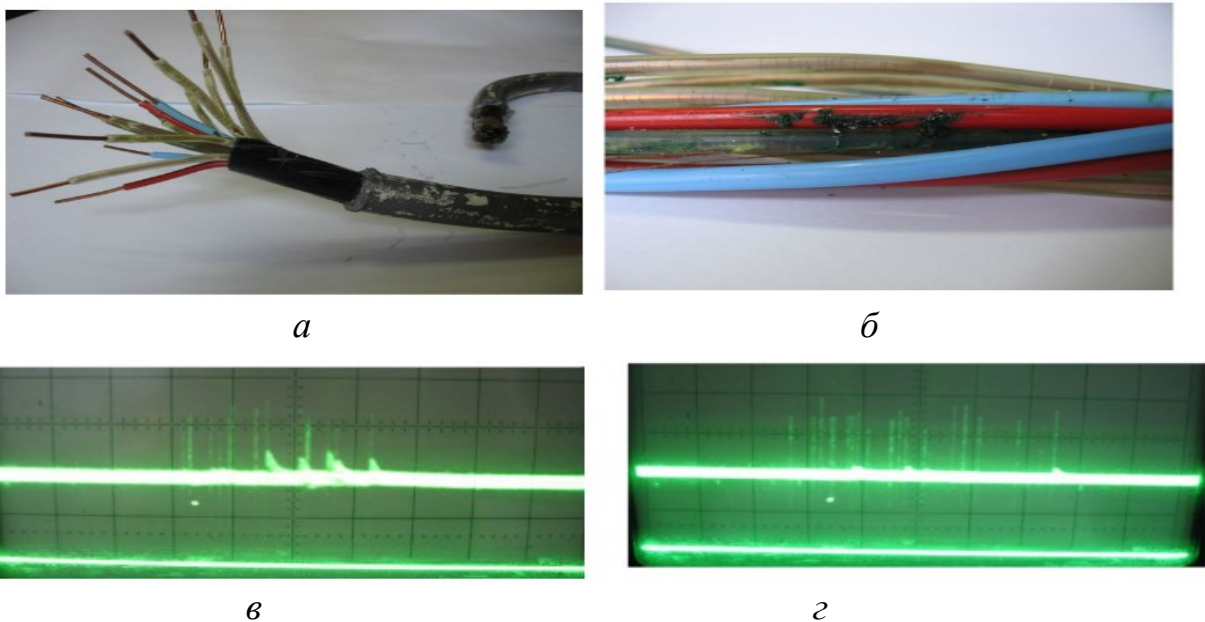
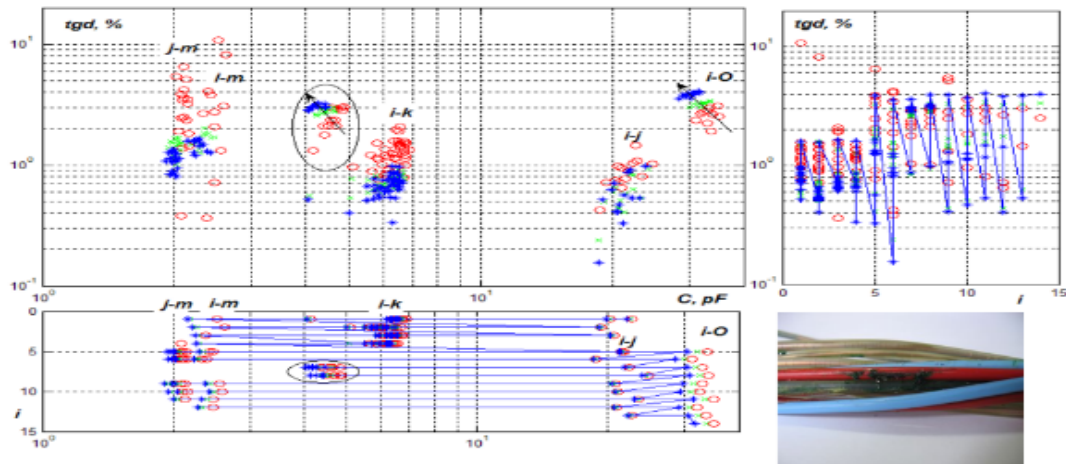


Рис. 4. Часткові розряди у зразках контрольного кабелю КпоСГ 2,5x14 після 25 років експлуатації до (а, в) та додаткового прискореного терморадіаційного старіння (б, г) [20].



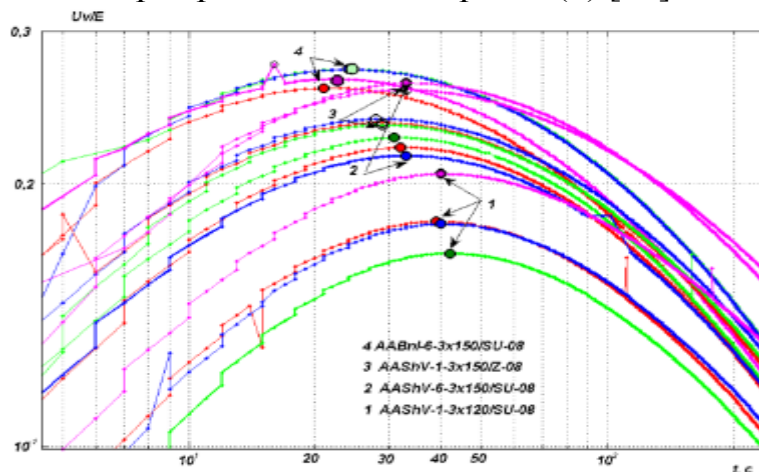


а



б

Рис. 5. Реалізація методу сукупних вимірювань ємності та тангенсу кута діелектричних втрат (а) та  $C-tg\delta-I_s$  діаграма зразка контрольного кабелю КпоСГ 2,5x14 після 25 років експлуатації та додаткового прискореного терморадіаційного старіння (б) [21].



1- ААШв-1кВ-3x120; 2- ААШв-6кВ-3x150; 3- ААШв-1кВ-3x150; 4- ААБнГ-6кВ-3x150

Рис. 6. Криві відновлюваної напруги зразків силових кабелів АЕС з паперово-просоченою ізоляцією у початковому стані після 25 років експлуатації (найближче до критичної області - кабель 4, подалі - 1).

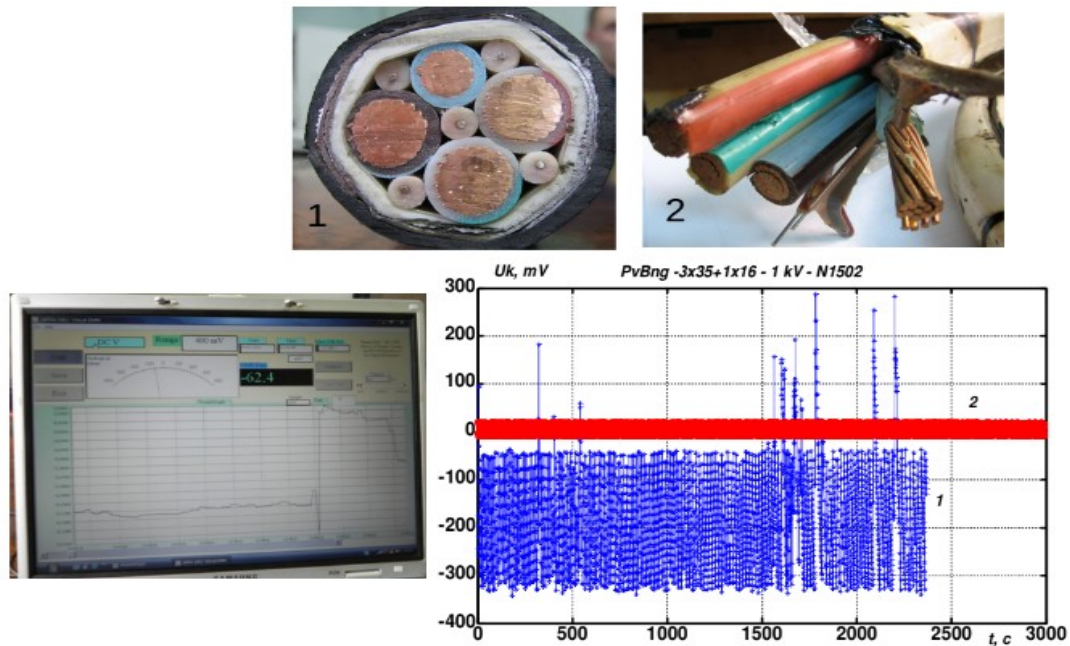


Рис. 7. Динаміка змінення трибопотенціалу у зразку силового кабелю ПвБнг 3x35+1-1 кВ в початковому стані після 25 років експлуатації (крива 1) та після додаткового терморадіаційного старіння (крива 2) [24].

У цілому, сукупність експериментальних та теоретичних досліджень дозволяє встановити критерії досягнення граничного стану ізоляції зразків кабелів АЕС, які можуть бути використані при аналізі результатів обстежень кабелів в умовах експлуатації та обґрунтуванні необхідності завчасної заміни тих з них, технічний стан яких став критичним.

Досвід діагностичних обстежень кабелів АЕС різних типів, конструктивного виконання, застосованих матеріалів та умов експлуатації доводить необхідність всебічного аналізу отриманих результатів з урахуванням синергетичного ефекту впливу на електричну ізоляцію матеріалів конструкції, що ґрунтується на сучасних спеціальних знаннях в області електроізоляційної, кабельної та оптоволоконної техніки. Розуміння механізмів старіння різних видів ізоляції полегшує інтерпретацію даних та визначення критичних значень параметрів. Важливо, що у лабораторних умовах реалізується комплексний науковий підхід до оцінки технічного стану кабелів АЕС із застосуванням сучасних неруйнівних ефективних методів, методик, відповідної техніки та методів обробки експериментальних даних [19-25]. В умовах експлуатації неможливо у повній мірі реалізувати таку діагностику для повної оцінки технічного стану старіючої ізоляції. У лабораторних умовах на спеціально відібраних представницьких зразках кабелів вірогідність виявлення прихованих дефектів зістарених кабелів (див. рис. 5 та рис. 7) – змінення поверхні ізоляції з наростаючою сегрегацією поверхневих зарядів з подальшою їх дифузією у товщу високоякісної полімерної ізоляції, значна менше. В той же час, проведення обстежень зразків кабелів у різних лабораторіях на обладнанні різних виробників

унеможливиює, відповідно до концепції невизначеності вимірювань, проведення порівняння результатів обстеження, що є небезпечним фактором у стратегії оцінки технічного стану для визначення залишкового ресурсу з метою пролонгації терміну експлуатації.

**Висновки.** 1. Світовий досвід управління старінням кабелів АЕС доводить, що проведення досліджень та прогнозування терміну експлуатації ґрунтується на раціональному використанні і розвитку науково-технічного потенціалу спеціалізованих наукових та навчальних лабораторій. На державному рівні країни з ядерними установками всебічно підтримують та заохочують наукову спільноту до виконання проєктів, надають гранти у частині управління старінням, розробці нових ефективних методів моніторингу та в проведенні досліджень щодо отримання критеріїв для визначення технічного стану кабелів АЕС.

2. Різноманітність методів контролю для оцінки електричних і механічних характеристик кабелів АЕС не забезпечує повну діагностику всіх типів кабелів та жодний окремий метод не підтверджує всі характеристики одного типу кабелів. Необхідно застосування комплексу методів для визначення механічних та електричних характеристик, що найбільш доцільно робити на «представницьких» зразках кабелів, відібраних з АЕС для досліджень у лабораторних умовах.

3. Обмеження в існуючих методах оцінки терміну служби кабелів АЕС пов'язано з недостатньою репрезентативністю прискореного старіння та неврахуванням полімерного складу ізоляції та оболонки (наприклад, наповнювачів, добавок, антиоксидантів) у моделях старіння кабелів. Необхідно багатопараметричний підхід при створенні моделей старіння ізоляції для більш точної оцінки терміну служби кабелів.

4. Існує нагальна потреба у комплексній стратегії управління старінням як безпосередньо в експлуатації, на АЕС, так і в спеціальних лабораторіях з залученням фахових досвідчених науковців-спеціалістів щодо проведення комплексних діагностичних обстежень з фізично обґрунтованим аналізом отриманих результатів на основі сучасніших технологій проведення досліджень та обробки отриманих результатів.

5. Науково-практичні дослідження та розробки кафедри щодо методів, методик та техніки можуть бути корисними при проведенні оцінки технічного стану кабелів ТЕС, при впровадженні та експлуатації модульних ядерних реакторів, тощо.

#### Список використаної літератури:

1. International Atomic Energy Agency. Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL). Safety Reports Series. No. 82 (Rev. 1). Vienna: IAEA, 2020. 120 p.
2. Assessing and Managing Cable Ageing in Nuclear Power Plants. IAEA Nuclear Energy Series. No. NP-T-3.6. Vienna: IAEA, 2012. 111 p.
3. Cable Ageing in Nuclear Power Plants Report on the first and second terms (2012-2017) of the NEA Cable Ageing Data and Knowledge (CADAK) Project. Vienna: IAEA, 2018. 60 p.
4. Technical basis for commendable practices on ageing management. SCC and Cable Ageing Project (SCAP). Final Report. NEA/CSNI/R(2010)15, 2011. 132 p.

5. Benchmark Analysis for Condition Monitoring Test Techniques of Aged Low Voltage Cables in Nuclear Power Plants. Final Results of a Coordinated Research Project. Vienna: IAEA, 2017. 192 p.
6. Šimić Z., Peinador M. V., Banov R. Correlation between events with different safety significance in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*. 2022. v. 54, issue 7. P. 2510-2518. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.01.034>
7. Alshaketheep T., Murakami K., Sekimura N., Itoi T. In search of extendable conditions for cable environmental qualification in nuclear power plants. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2016. no 53(11). P.1735–1741. <https://doi.org/10.1080/00223131.2016.1152922>
8. Santhosh T. V., Gopika V., Ghosh A. K., Fernandes B. G. An approach for reliability prediction of instrumentation & control cables by artificial neural networks and Weibull theory for probabilistic safety assessment of NPPs. *Reliability Engineering & System Safety*. 2018. vol. 170, no. 2. P. 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.10.010>
9. Fabiani D., Suraci S.V., Bulzaga S. Aging Investigation of Low-Voltage Cable Insulation Used in Nuclear Power Plants. *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. 2018. P. 516–519. <https://doi.org/10.1109/EIC.2018.8481139>.
10. Banerjee S., Rouison D., Mantey A. Low frequency dielectric spectroscopy as a condition monitoring technique for low voltage cable in nuclear plants. *International Conference on Insulated Power Cables Jicable'19*. 2019.
11. Suraci S. V., Fabiani D. Aging modelling of low-voltage cables subjected to radio-chemical aging. *IEEE Access*. 2021. vol. 9. P. 83569-83578. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3086987>
12. Crosby C., Ferree C., Ellis P. Effects of Accelerated Aging Phenomena on Cable Condition Monitoring Data. *Proceedings of the 2021 ANS Winter Meeting*. 2021.
13. Ferree C. R., Ward P. R., Toll T. A. Survivability of Low-Voltage Cable Insulations in Small Modular Reactor Environments. *Proceedings of the American Nuclear Society 12th Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human–Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT)*. 2021.
14. Hashemian H. M., Shumaker B. D., Ledlow J. B., O’Hagan R. D., McCarter D. E. Remaining Useful Life Estimation of Electric Cables in Nuclear Power Plants. *Annual Meeting American Nuclear Society*. 2013.
15. Glass S. W., Jones A. M., Fifield L. S., Hartman T. S. Frequency domain reflectometry NDE for aging cables in nuclear power plants. *Conference: 43rd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. 2017. vol. 36. Art. no. 080015. <https://doi.org/10.1063/1.4974640>.
16. Шугайло О. П., Плачков Г. І., Гребенюк Ю. П., Шевченко І. А., Дибач О. М., Зелений О. В., Москалішин Р. І. Основні результати аналізу стану управління старінням атомних електростанцій в Україні. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2018. 3(79). С. 3-9.
17. Ehtasham M., Ramy S. A. Afia, Oummaima N., Zoltan A. T. Implementation of Non-Destructive Electrical Condition Monitoring Techniques on Low-Voltage Nuclear Cables: I. Irradiation Aging of EPR/CSPE Cables. *Energies*. 2021. no14(16). P. 5139. <https://doi.org/10.3390/en14165139>
18. ПМ-Д.0.03.222-14. Типовая программа по управлению старением элементов и конструкций энергоблока АЭС.
19. Беспрозванных А. В., Москвитин Е. С. Число двойных перегибов как индикатор старения кабельных бумаг. *Электротехника і Електромеханіка*. 2011. № 3. С. 62-66.
20. Беспрозванных А.В. Сильное электрическое поле и частичные разряды в многожильных кабелях. *Технічна електродинаміка*. 2010. №1. С. 23-29.
21. Беспрозванных А. В. Диэлектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей методом совокупных измерений. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 3. С. 30 – 36.
22. Беспрозванных А. В., Рудаков С. В., Москвитин Е. С. Предотвращение чрезвычайных ситуаций путем контроля состояния изоляции многожильных кабелей по параметрам частичных емкостей и тангенсу угла диэлектрических потерь. *Монографія*. Харків. 2013. 165 с.
23. Беспрозванных Г. В., Костюков І. О., Москвітін Е. С. Розділення абсорбційних процесів в неоднорідній ізоляції за кривими відновлювальної напруги силових високовольтних кабелів. *Технічна електродинаміка*. 2021. №6, С. 13–19. <https://doi.org/10.15407/techned2021.06.013>
24. Беспрозванных А. В., Бойко А. Н. Контактная разность потенциалов – как показатель степени старения полимерной изоляции силовых кабелей. *Электротехника і Електромеханіка*. 2014. № 5. С. 62 – 67.
25. Беспрозванных А. В., Бойко А. М. Обоснование и обеспечение технологических показателей трибоэлектрического метода контроля кабелей с полимерной изоляцией. *Электротехника і Електромеханіка*. 2014. №6. С. 56 – 60.

#### References:

1. International Atomic Energy Agency. Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL). *Safety Reports Series*. No. 82 (Rev. 1). Vienna. IAEA, 2020. 120 p.
2. Assessing and Managing Cable Ageing in Nuclear Power Plants. *IAEA Nuclear Energy Series*. No. NP-T-3.6. Vienna. IAEA, 2012. 111 p.

3. Cable Ageing in Nuclear Power Plants Report on the first and second terms (2012-2017) of the NEA Cable Ageing Data and Knowledge (CADAK) Project. Vienna. IAEA, 2018. 60 p.
4. Technical basis for commendable practices on ageing management. SCC and Cable Ageing Project (SCAP). Final Report. NEA/CSNI/R(2010)15, 2011. 132 p.
5. Benchmark Analysis for Condition Monitoring Test Techniques of Aged Low Voltage Cables in Nuclear Power Plants. Final Results of a Coordinated Research Project. Vienna. IAEA, 2017. 192 p.
6. Šimić Z., Peinador M. V., Banov R. Correlation between events with different safety significance in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*. 2022. v. 54, issue 7. pp. 2510-2518. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.01.034>
7. Alshaketheep T., Murakami K., Sekimura N., Itoi T. In search of extendable conditions for cable environmental qualification in nuclear power plants. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2016. no 53(11). pp. 1735–1741. <https://doi.org/10.1080/00223131.2016.1152922>
8. Santhosh T. V., Gopika V., Ghosh A. K., Fernandes B. G. An approach for reliability prediction of instrumentation & control cables by artificial neural networks and Weibull theory for probabilistic safety assessment of NPPs. *Reliability Engineering & System Safety*. 2018. vol. 170, no. 2. pp. 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.10.010>
9. Fabiani D., Suraci S.V., Bulzaga S. Aging Investigation of Low-Voltage Cable Insulation Used in Nuclear Power Plants. *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. 2018. pp. 516–519. <https://doi.org/10.1109/EIC.2018.8481139>.
10. Banerjee S., Rouison D., Mantey A. Low frequency dielectric spectroscopy as a condition monitoring technique for low voltage cable in nuclear plants. *International Conference on Insulated Power Cables Jicable'19*. 2019.
11. Suraci S. V., Fabiani D. Aging modelling of low-voltage cables subjected to radio-chemical aging. *IEEE Access*. 2021. vol. 9. pp. 83569-83578. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3086987>
12. Crosby C., Ferree C., Ellis P. Effects of Accelerated Aging Phenomena on Cable Condition Monitoring Data. *Proceedings of the 2021 ANS Winter Meeting*. 2021.
13. Ferree C. R., Ward P. R., Toll T. A. Survivability of Low-Voltage Cable Insulations in Small Modular Reactor Environments. *Proceedings of the American Nuclear Society 12th Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human–Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT)*. 2021.
14. Hashemian H. M., Shumaker B. D., Ledlow J. B., O'Hagan R. D., McCarter D. E. Remaining Useful Life Estimation of Electric Cables in Nuclear Power Plants. *Annual Meeting American Nuclear Society*. 2013.
15. Glass S. W., Jones A. M., Fifield L. S., Hartman T. S. Frequency domain reflectometry NDE for aging cables in nuclear power plants. *Conference: 43rd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. 2017. vol. 36. Art. no. 080015. <https://doi.org/10.1063/1.4974640>.
16. Shugailo A., Plachkov G., Grebenyuk Yu., Shevchenko I., Dybach O., Zeleny O., Moskalysyn R. The Main Results of Ageing Management State Analysis of Ukrainian NPPs. *Nuclear and radiation safety*. 2018. no 3(79). pp. 3-9.
17. Ehtasham M., Ramy S. A. Afia, Oummaima N., Zoltan A. T. Implementation of Non-Destructive Electrical Condition Monitoring Techniques on Low-Voltage Nuclear Cables: I. Irradiation Aging of EPR/CSPE Cables. *Energies*. 2021. no14(16). pp. 5139. <https://doi.org/10.3390/en14165139>
18. Standard Program for Ageing Management of NPP Components and Structures. *Tipovaya programma po upravleniyu stareniyem elementov i konstruktsiy energobloka AES. PM-Д.0.03.222-14*.
19. Bezprozvannykh G. V., Moskvitin E. S. Double-kink number as an indicator of degree of cable paper ageing. *Electrical engineering & electromechanics*. 2011. no 3. pp. 62–66.
20. Bezprozvannykh G. V. Strong electric field and partial discharges in multicore cables. *Technical electrodynamic*. 2010. no. 1. pp. 23-29.
21. Bezprozvannykh G. V. Dielectric scanning of the transverse structure of stranded cables by the method of cumulative measurements. *Technical electrodynamic*. 2008. no. 3. pp. 30-36.
22. Bezprozvannykh G. V., Rudakov S. V., Moskvitin E. S. Prevention of emergency situations by monitoring the state of insulation of multi-core cables according to the parameters of partial capacitances and tangent of the angle of dielectric losses. *Monograph. Kharkiv* 2013. 165 p.
23. Bezprozvannykh G. V., Kostukov I. A., Moskvitin E. S. Differentiation of absorption processes in inhomogeneous insulation by curve of recovering voltage of power high voltage cables. *Technical electrodynamic*. 2021. no. 6. pp. 13–19. <https://doi.org/10.15407/techned2021.06.013>
24. Bezprozvannykh G. V., Boyko A. N. Contact potential difference as a measure of power cable polymer insulation aging. *Electrical engineering & electromechanics*. 2014. no. 5. pp. 62 – 67.
25. Bezprozvannykh G. V., Boyko A. N. Substantiation and guaranteeing of technological parameters of triboelectrical method of monitoring of cables with polymer insulation. *Electrical engineering & electromechanics*. 2014. no. 6. pp.56 – 60.

Надійшла до редакції 28.10.2022 р.