ХЕРСОНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

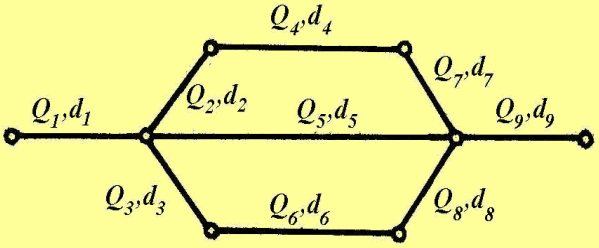
«ГІДРОТЕХНІЧНЕ БУДІВНИЦТВО: МИНУЛЕ, СЬОГОДЕННЯ, МАЙБУТНЄ»

Збірка наукових праць





$$Q = S\omega = SC\sqrt{RJ}$$





Херсон, 2026

Міністерство освіти і науки України Херсонський
державний аграрно-економічний університет Факультет
архітектури та будівництва
Кафедра гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії

ГІДРОТЕХНІЧНЕ БУДІВНИЦТВО: МИНУЛЕ, СЬОГОДЕННЯ, МАЙБУТНЄ

Збірка наукових праць

ВИПУСК IX

Херсон, 2026

УДК 626/627

Гідротехнічне будівництво: минуле, сьогодення, майбутнє: зб. наук. пр.: Вип. 9. – Херсон: ХДАЕУ, 2026. – 123 с.

Редакційна колегія:

Волошин М.М. – к.т.н., завідувач кафедри гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії ФАБ Херсонського ДАЕУ;

Рагулін С.В. – к.т.н., доцент кафедри гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії ФАБ Херсонського ДАЕУ.

В збірнику публікуються наукові статті молодих вчених, аспірантів, магістрів, здобувачів вищої освіти з ефективності гідротехнічних меліорацій, впливу гідротехнічних споруд на навколишнє середовище, інженерного захисту територій, водопостачання та водовідведення, застосування сучасних технологій гідротехнічного будівельного виробництва, використання ГІС-технологій в водній інженерії, застосування сучасних досягнень вишукувань і проектування гідротехнічних споруд та сучасних методів оцінки технічного стану гідротехнічних споруд, застосування енергозберігаючих технологій у гідротехнічному будівництві та меліораціях, застосування результатів сучасних досліджень у зрошуваному землеробстві та плодоовочівництві, меліоративному ґрунтознавстві.

Збірник розрахований на наукових співробітників, інженерно-технічних робітників підприємств, проектних організацій, навчальних та науково-дослідних інститутів напряму гідротехнічного будівництва, водної інженерії та водних технологій.

Рекомендовано до друку вченою радою факультету архітектури та будівництва Херсонського державного аграрно-економічного університету (протокол №3 від 21.10.2026 р.).

Відповідальність за зміст, новизну та оригінальність наданого матеріалу несуть автори статей

© Херсонський державний
аграрно-економічний університет,
2026

ВСТУПНЕ СЛОВО

Шановні читачі збірки наукових праць "Гідротехнічне будівництво: минуле, сьогодення, майбутнє"!

У матеріалах збірки Ви зможете ознайомитися з результатами досліджень, проведених молодими вченими, аспірантами, магістрами та здобувачами вищої освіти в Україні, які присвяченні основним перспективним напрямкам розвитку гідротехнічного будівництва, водної інженерії та водних технологій: ефективність гідротехнічних меліорацій, вплив гідротехнічних споруд на навколишнє середовище, інженерний захист територій, водопостачання та водовідведення, сучасні технології гідротехнічного будівельного виробництва, використання ГІС-технологій в водній інженерії, сучасні досягнення вишукувань і проектування гідротехнічних споруд, сучасні методи оцінки технічного стану гідротехнічних споруд, енергозберігаючі технології у гідротехнічному будівництві та меліораціях, застосування результатів сучасних досліджень у зрошуваному землеробстві та плодоовочівництві, меліоративному ґрунтознавстві.

Сподіваємось, що наукові матеріали молодих, але вже талановитих вчених, які розміщені в даній збірці будуть представляти інтерес для науки і практики у галузі гідротехнічного будівництва, водної інженерії та водних технологій.

З повагою,
Редакційна колегія

ЗМІСТ

Волошин М.М.
ЕФЕКТИВНЕ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНИХ І ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ В СУЧАСНИХ РИНКОВИХ УМОВАХ ТА ЗМІНИ КЛІМАТУ 9

Жуйков О.Г., Жуйков Т.О.
ФЕРТИГАЦІЯ ТА ПЕСТИГАЦІЯ – ДІЄВІ ВАЖЕЛІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ КРАПЛИННОГО ЗРОШЕННЯ 12

Чеканович М.Г.
АНАЛІЗ НАСЛІДКІВ РАКЕТНО/ДРОНОВОГО УДАРУ ПО ГІДРОТЕХНІЧНІЙ СПОРУДІ 16

Волошинов С.А.
ІНТЕГРАЦІЯ ТРИВІМІРНИХ ПРОСТОРІВ У МОДЕЛЬ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ В ЕНЕРГЕТИЦІ 20

Чепіль Р. Д.
ГІДРОАКУМУЛЮВАЛЬНІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ЯК ЕЛЕМЕНТ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСИСТЕМ В УМОВАХ ВОЄННИХ ДІЙ..... 24

Заводянний В.В.
ЗАСТОСУВАННЯ РІДИННИХ ЛІНЗ: ВІД ФІЗИКИ ДО МЕДИЦИНИ..... 29

Байдак Ю.В.
МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ СИЛОВОГО РОЗПОДІЛЬЧОГО ТРАНСФОРМАТОРА..... 34

Зубенко В.О.
ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИЙ ПОТЕНЦІАЛ МЕРЕЖЕВИХ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ НА ПОКРІВЛЯХ ІСНУЮЧИХ БУДІВЕЛЬ 38

Кравченко В.І.

ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ У БУДІВЛЯХ З ВИКОРИСТАННЯМ СТІЧНИХ ВОД..... 42

Литвиненко В.М.
РОЗРОБКА ПОПЕРЕДЖУВАЛЬНОГО РЕЛЕ ЧАСУ ДЛЯ ПОБУТОВИХ МЕРЕЖ..... 45

Борисенко К.І. СУЧАСНІ МЕТОДИ ІНЖЕНЕРНИХ ВИШУКУВАНЬ ТА ЦИФРОВОГО ПРОЄКТУВАННЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД ПІД ЧАС ВІДНОВЛЕННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЇ 47

Коваленко Р. Ю.
ОЦІНКА МАЛОВОДДЯ В БАСЕЙНІ ДНІСТРА ТА ЙОГО ВОДОГОСПОДАРСЬКИХ НАСЛІДКІВ 52

Казмірчук А.С., Кузьмич Л.В.
ОПТИМІЗАЦІЯ ВОДНОГО РЕЖИМУ МЕЛІОРОВАНИХ ҐРУНТІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ СТІЙКОСТІ АГРОЕКОСИСТЕМ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН..... 55

Волошин М.М., Кльоб С.К.
ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ В УМОВАХ СУЧАСНИХ ВИКЛИКІВ..... 57

Гасенко Л.В., Жабченко С.М.
ШЛЯХИ ПРИСКОРЕННЯ РОЗВИТКУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ 60

Ларченко О.В.
КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ РУХОМ ПОЇЗДІВ: ІЄРАРХІЧНА СТРУКТУРА ТА ФУНКЦІОНАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ НА ПРИКЛАДІ ОДЕСЬКОЇ ЗАЛІЗНИЦІ 62

Клименко І. В., Кузьмич Л.В.
ТРАНСФОРМАЦІЯ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА НА ЗАСАДАХ КОНЦЕПЦІЇ «SMART WATER»: КОМПАРАТИВНИЙ АНАЛІЗ ДОСВІДУ БАРСЕЛОНИ ТА ПЕРСПЕКТИВ ХЕРСОНСЬКОГО РЕГІОНУ..... 66

Димова Г.О.
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ОПАЛЕННЯ ЖИТЛОВОГО ПРИМІЩЕННЯ 69

Шеметенко Д.Р.
ВОДНА ІНФРАСТРУКТУРА МІСЬКОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ НАСЕЛЕННЯ ВІД ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ СПЕКИ
..... 72

Гаркуша Н.І., Кузьмич Л.В.
ГІДРОТЕХНІЧНА ІНФРАСТРУКТУРА ВНУТРІШНІХ ВОДНИХ ШЛЯХІВ: ДОСВІД НІМЕЧЧИНИ ТА ВИКЛИКИ ВІДНОВЛЕННЯ В УКРАЇНІ 76

Волошинов С.А., Білоусова Т.П.
РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ АВІАЦІЙНОГО РАДІОКОМПАСА АРК-15 79

Оловяннікова Г.О.
ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ІННОВАЦІЙНИХ МЕТОДІВ УТИЛІЗАЦІЇ ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД 82

Заводянний В.В., Шпилько О.О.
СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ: ЯК АКУМУЛЯТОРИ ДОПОМАГАЮТЬ ЗАБЕЗПЕЧИТИ СТАБІЛЬНЕ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .. 85

Кузьмич С.А.
ПОВОЄННЕ ВІДНОВЛЕННЯ ІНЖЕНЕРНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ МЕЛІОРАТИВНИХ СИСТЕМ УКРАЇНИ: ПРАКТИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ТА ПРІОРИТИЗАЦІЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ..... 89

Скрипниченко Д.А., Зубенко В.О.
ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КРИТИЧНИХ СПОЖИВАЧІВ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АЕС ЗА РАХУНОК СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ 92

Коваленко Р.Ю., Басс Р.Д.
ЗНИЖЕННЯ РИЗИКІВ КАТАСТРОФІЧНИХ ГІРСЬКИХ ПАВОДКІВ ТА ЇХ НАСЛІДКІВ З УРАХУВАННЯМ МІЖНАРОДНОГО ДОСВІДУ..... 95

Рагулін С.В.
ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЦИФРОВИХ БЛИЗНЮКІВ (DIGITAL TWINS) ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД 99

Литвиненко В.М., Гаркуша В.О.
РОЗРОБКА АНАЛОГОВОГО СЛУХОВОГО АПАРАТА 102

Байдак Ю.В., Гаврилов В.О., Шкроб Д.В.
ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНК ФАЗИ РОЗПОДІЛЬЧОГО ТРАНСФОРМАТОРА 104

Зубенко В.О., Шолух К.В.
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ ЗРОШУВАЛЬНИХ СИСТЕМ ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК У РОЗПОДІЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ..... 108

Коршманюк К.А., Кравченко В.І.
УТИЛІЗАЦІЯ ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД КОМУНАЛЬНИХ ОЧИСНИХ СПОРУД ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ 111

Борисенко К. І., Бюргер О.С.
ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ У ЦИВІЛЬНОМУ ТА ГІДРОТЕХНІЧНОМУ БУДІВНИЦТВІ: НОРМАТИВНІ ВИМОГИ ТА ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ..... 114

Рагулін С.В., Стась В.С.
ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ..... 120

УДК 332.3:330.15

Волошин М.М.
Завідувач кафедри, к.т.н., доцент
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

ЕФЕКТИВНЕ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНИХ І ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ В СУЧАСНИХ РИНКОВИХ УМОВАХ ТА ЗМІНИ КЛІМАТУ

Вступ. Ефективне використання наявного земельного фонду, управління родючістю ґрунтів та водокористуванням передбачає перегляд методологічних підходів до організації землеробства у напрямі оптимізації земле - та водокористування, створення та широкого впровадження у практику землеробства автоматизованих інформаційних технологій, насамперед при реалізації плати за послуги по подачі води та в системах точного землеробства.

Основна частина. В умовах реформування відносин між водогосподарськими організаціями і водоспоживачами (фермерами, колективними господарствами, орендарями) необхідна організація ефективного водокористування. При складанні договорів на платне водокористування необхідне відпрацювання оптимізованих пропозицій виробникам сільськогосподарської продукції в залежності від тарифу на подачу води з оцінкою економічної ефективності різних варіантів водокористування, врахуванням екологічних вимог ведення сільськогосподарського виробництва.

Оптимізація взаємовідносин між водопостачальниками та водоспоживачами здійснюється на основі САПР, яка складається з підсистем:

– підсистема вибору оптимальних варіантів водокористування;

– підсистема формування ціни на послуги по подачі води на зрошення або зволоження земель.

САПР являє собою деяку програму на ПЕОМ з розгалуженою базою даних та знань. База даних орієнтована на розв’язання специфічних задач і складається з економічної інформації (закупівельних цін, собівартості продукції при зрошенні і на богарі, нормативних даних для розрахунку собівартостей подачі 1 м^3 води, метеоданих та зрошувальних норм в роки різної забезпеченості, характерних особливостей водовиділів, з яких забирається вода та ін.). Розроблена нами база знань містить комплекс залежностей “урожайність - водозабезпеченість” різних сільськогосподарських культур (озимої пшениці, кукурудзи на зерно, кукурудзи на силос, сої, соняшника, овочевих культур), критерії економічної оцінки для визначення оптимального водо - та землекористування.

Підсистема вибору оптимальних варіантів водокористування базується на використанні критерію питомого додаткового чистого прибутку від зрошення, який обчислюється за формулою [4]:

$$F(P) = (C - C_1) f\left(\frac{U+\xi}{W+\xi}\right) Y^{П} - (C - C_2) f\left(\frac{\xi}{W+\xi}\right) Y^{П} - T_{П}(P)U, \quad U \le U_{КР} \qquad (1)$$

де *F(P)* – додатковий чистий прибуток від зрошення, грн./га;

P – рівень рентабельності, %;

C – закупівельна ціна, грн./ц;

C_1, C_2 – собівартість відповідно при зрошенні і на богарі (без витрат на подачу води), грн./ц;

Y^n – плановий (проектний) урожай, ц/га;

$f\left(\frac{U+\xi}{W+\xi}\right)$, $f\left(\frac{\xi}{W+\xi}\right)$ - зниження урожайності від одиниці при недополиви при зрошенні чи на богарі, в долях одиниці;

U, $U_{кр}$ – значення відповідно поточних та критичних (лімітних) зрошувальних норм, м^3/га;

ξ – опади, м^3/га;

W – значення біологічно оптимальних зрошувальних норм, м^3/га;

$T_n(P)$ – пільговий тариф в залежності від рівня рентабельності, грн./м^3;

$T_n(P)U$ – витрати на лімітне водоспоживання, грн./га.

Кожен водоспоживач перш за все хоче одержати рекомендації, за якими найбільш ефективно вести зрошуване землеробство при даних цінах за воду, тобто яку економічно ефективну зрошувальну норму слід замовити для конкретної культури в умовах певного року та при наявних фінансових можливостях. Для цього САПР проводить розрахунки додаткового чистого прибутку від зрошення і виводить графічні залежності (рис. 1.), які дозволяють визначити оптимальні значення економічно обґрунтованих норм.

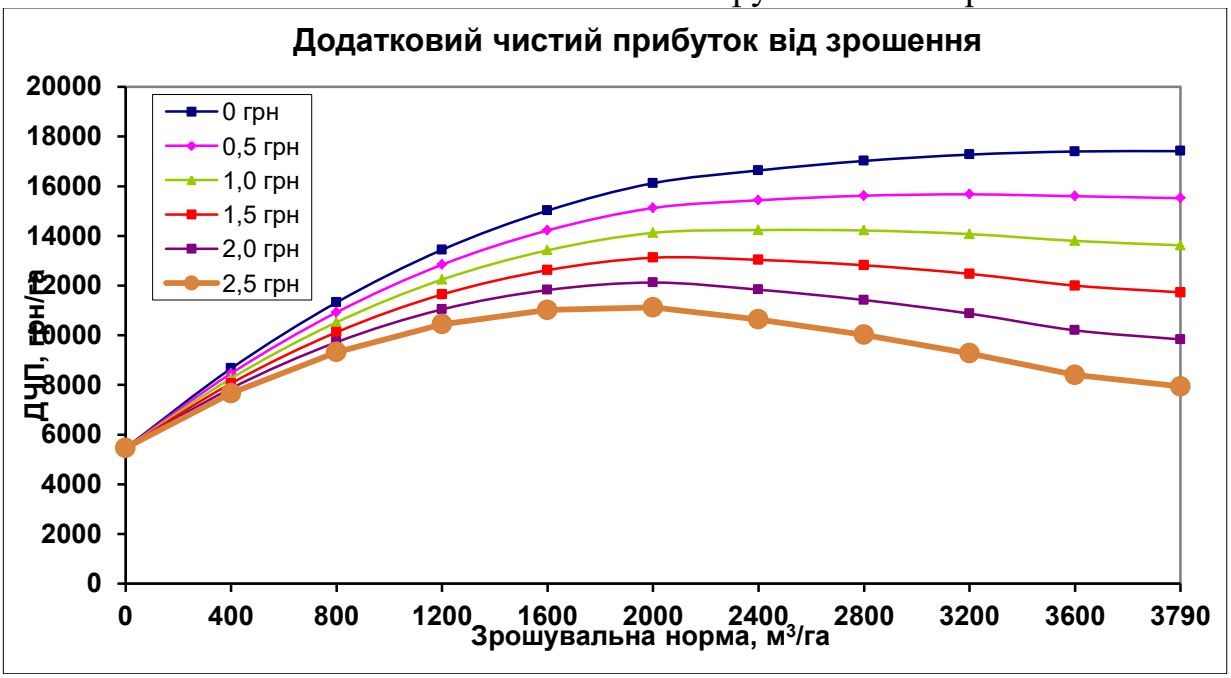


Рис. 1. Залежність додаткового чистого прибутку від зрошення для кукурудзи на зерно у рік 75-% забезпеченості від зрошувальної норми при різних тарифах на воду.

При розробці підсистеми формування ціни на послуги по подачі води на зрошення або зволоження земель створюється понятійний апарат, база даних та знань, розрахункові формули та алгоритми.

Використовуються такі види тарифів, як основний, цільовий поточний, пільговий, договірний тарифи. Основний тариф на послуги водопостачання при

зрошенні – розмір плати, що забезпечує відшкодування усіх нормативно обґрунтованих витрат на одиницю послуги, пов'язаних з подачею води водоспоживачам по всіх технологічних ланках до точки водовиділу і з точки водовиділу, розраховується за формулою:

$$T_{\delta} = \left(C_{\delta B} + C_{\delta П}\right)\left(1 + \frac{P}{100}\right), \quad грн/м^3 \tag{2}$$

де T_{δ} – одно ставковий основний тариф;

$C_{\delta B}$ – середня собівартість водоподачі до точки водовиділу, грн./м^3;

$C_{\delta П}$ - середня собівартість водоподачі з точки водовиділу до поля, грн./м^3;

P – норматив рентабельності, встановлений у відсотках до собівартості витрат за подачу води, %.

В даний час водоспоживачі компенсують витрати, пов'язані тільки з подачею води з точки водовиділу. Для цього використовується одно ставковий (за 1 м^3) цільовий поточний тариф на послуги водопостачання при зрошенні – розмір плати за воду, що забезпечує відшкодування водоспоживачами нормативно обґрунтованих витрат, пов'язаних з подачею води з точки водовиділу. При визначенні поточного тарифу $C_{\delta П}$=0 і Р=0.

Розрахунок собівартості подачі води з водовиділу ведеться за формулою:

$$C_{\delta П} = \left(C^0_{\delta П} + C^E_{\delta П}\right), \qquad грн./м^3, \tag{3}$$

де $C^0_{\delta П}$ - собівартість подачі води з точки водовиділу до поля (без врахування електроенергії);

$C^E_{\delta П}$ - собівартість подачі води з точки водовиділу до поля за витратами електроенергії.

При цьому собівартість $C_{\delta П}$ визначається, як відношення сумарних по статтях калькуляції витрат до сумарної водоподачі водоспоживачами:

$$C_{\delta П} = \frac{\sum B^{П}_i}{U_{план}}, \quad грн/м^3 \tag{4}$$

де $B^{П}_i$ - І -та стаття калькуляції сумарних витрат при подачі води від точки водовиділу до поля, грн.;

$U_{план}$ - сумарна, намічена згідно з розрахунковою водозабезпеченістю, водоподача від точки водовиділу, м^3.

Водовиділи відрізняються також і за витратами водогосподарської організації $C^0_{\delta П}$, тобто управління зрошувальних систем. У зв'язку з цим САПР платного водокористування повинна містити інформацію про кожний водовиділ з розрахованими на початку року відповідними собівартостями. У базі даних доцільно згрупувати водовиділи за однотипними витратами $C^0_{\delta П}$.

Висновки. Запропонована модель САПР дозволяє оптимізувати водокористування, рекомендуючи застосування економічно обґрунтованих зрошувальних норм, відповідних технологій точного землеробства, консолідувати на взаємовигідній основі розподіл додаткового чистого прибутку від зрошення між водогосподарськими організаціями та водоспоживачами в умовах проведення земельної реформи.

УДК 631.674.6:631.8:632.95

Жуйков О.Г.
Інститут водних проблем і меліорації НААН, м. Київ
Жуйков Т.О.
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

ФЕРТИГАЦІЯ ТА ПЕСТИГАЦІЯ – ДІЄВІ ВАЖЕЛІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ КРАПЛИННОГО ЗРОШЕННЯ

Вступ. Сучасне ведення аграрного виробництва в умовах інтенсивних кліматичних змін, тривалих посух та прогресуючого дефіциту якісних водних ресурсів вимагає докорінного перегляду класичних підходів до землеробства та переходу на засади прецизійного управління агрофітоценозами. Серед усього спектра сучасних меліоративних заходів саме краплинне зрошення зарекомендувало себе як найбільш прогресивний, ресурсозберігаючий та екологічно безпечний спосіб подачі вологи сільськогосподарським культурам. Однак потенціал зрошувальних систем розкривається повною мірою лише тоді, коли конструктивні можливості мережі використовуються не лише для ліквідації водного дефіциту, а й для комплексного управління продукційним процесом рослин. Інтеграція процесів мінерального живлення та хімічного захисту безпосередньо у технологічний потік поливної води дозволяє трансформувати інженерну мережу на динамічний інструмент оптимізації умов вирощування. Науково обґрунтоване поєднання фертигації, що передбачає подачу розчинених елементів живлення, та пестигації, спрямованої на введення засобів захисту рослин через емітери, становить основу сучасних інтенсивних агротехнологій. Метою цієї доповіді є всебічне обґрунтування технологічної, економічної та екологічної доцільності застосування цих методів, аналіз специфіки їх реалізації на прикладі основних груп сільськогосподарських культур, а також розгляд технічних параметрів експлуатації сучасних вузлів штучного регулювання ґрунтового середовища.

Основна частина. Традиційні методи поверхневого або локально-стрічкового внесення твердих мінеральних добрив часто характеризуються низьким коефіцієнтом корисного використання поживних речовин через їх нерівномірний розподіл, фіксацію ґрунтовим комплексом або вимивання у глибокі підстилаючі шари поза зону досяжності коріння. Впровадження фертигації радикально змінює архітектоніку живлення, оскільки розчинені іони макро- та мікроелементів подаються безпосередньо в зону найвищої поглинальної здатності кореневої системи, яка збігається з контуром зволоження. Це дозволяє динамічно підтримувати оптимальну концентрацію та осмотичний тиск ґрунтового розчину, повністю нівелюючи ризик виникнення сольового стресу у рослин і підвищуючи коефіцієнт засвоєння азоту до рекордної позначки у вісімдесят п’ять відсотків. Для успішної реалізації технології висуваються жорсткі вимоги до якості добрив, які повинні мати стовідсоткову водорозчинність, низький сольовий індекс та повну хімічну

сумісність у маточних розчинах. Присутність у бакових сумішах несумісних компонентів, таких як кальцієва селітра разом із сульфатами або фосфатами, е призводить до випадання в осад нерозчинних солей та ї хімічної кольматації крапельних ліній. Специфіка розрахунку доз та співвідношення елементів живлення суттєво різниться залежно від біологічних особливостей конкретної культури.

При вирощуванні томатів, перцю чи огірків фертигація проводиться практично з кожним вегетаційним поливом, де на початкових етапах розвитку та вкорінення фокус зміщується в бік фосфорних сполук для стимуляції росту коренів. У фазу масового цвітіння та формування зав'язі баланс переміщується в бік азотно-кальцієвого живлення для запобігання вершинній гнилі плодів, а під час дозрівання різко збільшують частку калію, який безпосередньо впливає на накопичення цукрів, щільність, інтенсивність забарвлення та товарні якості продукції. У промислових яблуневих, грушевих садах та на плантаціях лохини чи суниці садової графік фертигації чітко прив'язаний до фенофаз деревно-чагарникових рослин. Ранньовесняне внесення базується на легкодоступних формах азоту для швидкого старту вегетації та наростання листкової маси, тоді як у період закладання генеративних бруньок на наступний рік та росту плодів критично важливим стає збалансоване калійне та магнієве живлення. Для лохини високої фертигація також виконує функцію постійного регулювання кислотності ґрунту шляхом систематичного введення розчинів ортофосфорної кислоти чи сульфату амонію, які утримують показник водневого показника у межах чотирьох одиниць. При вирощуванні кукурудзи та соняшнику на краплинному зрошенні фертигація дозволяє ліквідувати так звати критичні періоди водоспоживання та поглинання елементів живлення, які у кукурудзи припадають на фази від викидання волоті до наливу зерна. Традиційна техніка не здатна увійти в поле на цих етапах через висоту стеблостою, тоді як через краплинну систему агроном може дрібно вносити карбамідно-аміачну суміш разом із цинковими хелатами, що суттєво підвищує озерненість качана та загальний збір сухої речовини.

Застосування хімічних та біологічних засобів захисту рослин через зрошувальну мережу, відоме у світовій практиці як пестигація або хемігація, являє собою високоефективний метод контролю чисельності шкідливих організмів. Найбільшу ефективність цей підхід демонструє при внесенні системних інсектицидів, фунгіцидів, нематоцидів та окремих видів ґрунтових гербіцидів, дія яких спрямована на захист підземної частини рослин та прикореневої зони. Локальна подача діючих речовин у зволожений об'єм ґрунту дозволяє створювати захисний екран навколо коренів, що забезпечує довготривалу системну дію препарату завдяки його поступовому та безперервному поглинанню рослиною. Експлуатація систем краплинного зрошення для захисту рослин нівелює потребу у багаторазових проходах важких тракторних обприскувачів, що повністю вирішує проблему переущільнення ґрунту, руйнування його структури та механічного травмування вегетуючої маси рослин у міжряддях. Важливою перевагою пестигації є повна незалежність від погодних умов, адже захисні заходи можна

проводити за поривчастого вітру або відразу після випадання природних опадів, коли виїзд техніки на поле є фізично неможливим через перезволоження. При виборі препаратів для пестигації обов’язково враховують їхню рухливість у ґрунтовому профілі, коефіцієнт адсорбції, період напіврозпаду та показники розчинності, щоб запобігти вимиванню токсикантів під дією гравітаційної вологи у глибокі горизонти та підземні водоносні джерела. На посівах томатів, перцю та капусти через краплинну лінію успішно вносять інсектициди на основі діючих речовин тіаметоксам або імідаклоприд (препарати типу Актара чи Конфідор), що гарантує надійний захист від комплексу ґрунтових шкідників, таких як дротяники та личинки хрущів, а також від сисних комах на кшталт попелиць та трипсів на ранніх етапах вегетації. Внесення спеціалізованих фунгіцидів з діючими речовинами флуопірам чи металаксил-М (Луна Експерієнс чи Ридоміл Голд) дозволяє локалізувати та зупинити розвиток фузаріозного, вертицильозного в'янення та кореневих гнилей, які практично не піддаються лікуванню за класичного наземного обприскування по листу. У промислових садах пестигація є безальтернативним та найбільш дієвим методом боротьби з колірними та кореневими нематодами за допомогою внесення препаратів з діючою речовиною оксаміл або флуопірам (Відат чи Велум), а також захищає кореневу шийку молодих дерев від ураження фітофторозом завдяки подачі фосетил алюмінію. Для плантацій суниці садової введення фунгіцидів на основі боскаліду чи флудіоксонілу в період бутонізації забезпечує надійне купірування збудників антракнозу та шкірястої гнилі ягід усередині густого куща. При вирощуванні соняшнику та кукурудзи пестигація використовується для внесення ґрунтових гербіцидів на основі С-метолахлору або ацетохлору з метою підтримання тривалої чистоти міжрядь, а також для оперативного введення системних інсектицидів з діючими речовинами хлорантраніліпрол чи флубендіамід (Кораген) проти стеблового кукурудзяного метелика та бавовникової совки.

Технологічна надійність та точність реалізації процесів фертигації й пестигації цілком залежать від інженерно-конструктивного виконання вузла внесення хімікатів, який є серцем сучасної насосної станції краплинного зрошення. Для дозованого введення маточних розчинів у магістральний трубопровід використовують три основні типи інженерних пристроїв, кожен з яких має свої експлуатаційні характеристики. Найпростішими є інжектори типу Вентурі (зокрема світового стандарту від американської компанії Mazzei Injector), які функціонують за принципом виникнення вакууму при звуженні потоку води, проте вони зумовлюють суттєві гідравлічні втрати тиску в мережі. Більш технологічними є гідравлічні дозувальні насоси пропорційного типу французького бренду Dosatron або ізраїльського Tefen Mixrite, які приводяться в дію виключно кінетичною енергією руху води і автоматично підтримують задану концентрацію розчину незалежно від коливань тиску чи витрати води в системі. На великих промислових об’єктах та в сучасних тепличних комплексах встановлюють автоматизовані розчинні вузли та фертигаційні машини на базі електричних мембранних або поршневих насосів-дозаторів від світових лідерів

Netafim (системи Netajet та Fertikit), Amiad або ITC, що керуються промисловими контролерами і здатні коригувати подачу хімікатів на основі показань датчиків електропровідності та водневого показника в режимі реального часу. Кожна система в обов'язковому порядку оснащується комплексом захисної арматури, яка включає зворотні та вакуумні клапани або антисифонні пристрої від виробників Dorot, Bermad або Raphael, що унеможливлюють зворотний рух хімічного розчину у свердловину чи відкрите водоймище при раптовому вимкненні живлення насосної станції. Невід'ємною фінальною стадією кожного циклу хімізації є обов'язкове технологічне промивання всієї зрошувальної мережі чистою водою – цей захід дозволяє повністю очистити внутрішні стінки трубопроводів та внутрішні лабіринти емітерів від залишків солей та активних речовин пестицидів, запобігаючи хімічній корозії елементів системи, а також розвитку мікробіологічного обростання і бактеріального слизу.

Впровадження інтегрованих систем фертигації та пестигації на базі краплинного зрошення демонструє високі показники окупності інвестицій і докорінно змінює структуру витрат господарства. Загальні витрати мінеральних добрив знижуються щонайменше на тридцяти відсотків порівняно з суцільним внесенням, а обсяги споживання хімічних засобів захисту рослин зменшуються на двадцять відсотків при одночасному зростанні їхньої цільової біологічної ефективності. Економічний ефект також формується за рахунок різкого зниження витрат на пально-мастильні матеріали та амортизацію техніки, оскільки процеси живлення та захисту суміщаються з плановими поливами і не потребують виїзду тракторів у поле. Екологічний вектор ефективності полягає в мінімізації негативного антропогенного впливу на навколишнє природне середовище та агроекосистеми. Краплинна подача малими, дробовими дозами виключає наявність вільних, незв'язаних форм азоту в ґрунті, оскільки рослини встигають практично повністю поглинати внесені елементи. Локальне застосування пестицидів у межах зволожувального контуру обмежує площу контакту хімічних речовин із навколишнім середовищем, суттєво зменшуючи пестицидне навантаження на корисну мікрофлору ґрунту, комах-запилювачів та інші компоненти біоценозу.

Висновки. Підсумовуючи викладений матеріал, можна впевнено стверджувати, що фертигація та пестигація є ключовими, незамінними важелями підвищення загальної ефективності та рентабельності функціонування сучасних систем краплинного зрошення. Вони перетворюють меліоративну мережу з пасивного засобу транспортування води на динамічну біотехнічну систему, здатну оперативно реагувати на найменші зміни в ендогенних та екзогенних потребах рослинного організму. Головними рушійними факторами успішного освоєння цих технологій на виробництві залишаються глибокі знання хімічних властивостей препаратів, точність роботи дозувального обладнання та жорсткий моніторинг стану зрошувальних ліній. Перспективи подальшого розвитку цього напряму нерозривно пов'язані з глобальною цифровізацією та автоматизацією аграрного сектора. Майбутнє належить інтелектуальним кіберфізичним комплексам, які на основі

безперервного аналізу даних від заглиблених датчиків вологості й солоності ґрунту, супутникових знімків індексу вегетації та локальних цифрових метеостанцій зможуть самостійно формувати, коригувати та вносити збалансовані живильні й захисні розчини безпосередньо під кожну рослину в режимі реального часу.

УДК 624.01

Чеканович М.Г.
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

АНАЛІЗ НАСЛІДКІВ РАКЕТНО/ДРОНОВОГО УДАРУ ПО ГІДРОТЕХНІЧНІЙ СПОРУДІ

Вступ. В умовах триваючої воєнної агресії проти України ракетні та безпілотні атаки становлять серйозну загрозу функціонуванню міської інфраструктури й об’єктів критичного призначення. Особливе місце серед них посідають об’єкти гідротехнічного комплексу, які відіграють важливу роль у забезпеченні енергетичної, транспортної та техногенної безпеки держави. Гідроелектростанції, греблі, мостові переходи та інші стратегічно важливі споруди зазнають ризику пошкодження внаслідок ракетних ударів і атак безпілотних літальних апаратів. Руйнування або пошкодження їхніх будівельних конструкцій може спричинити порушення функціонування критичної інфраструктури, ускладнення транспортного сполучення та виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

За таких обставин особливої актуальності набуває своєчасне проведення технічного обстеження пошкоджених будівель і споруд, встановлення характеру та ступеня пошкодження їхніх конструктивних елементів, а також визначення залишкової несучої здатності. Отримані результати є підґрунтям для обґрунтування подальших технічних рішень щодо відновлення, безпечної експлуатації, обмеження використання або консервації пошкоджених об’єктів. Оперативність і достовірність оцінювання технічного стану конструкцій сприяють зниженню ризиків для населення, підвищенню безпеки експлуатації споруд і забезпеченню стійкості енергетичної та транспортної інфраструктури України [1–4].

Основна частина. На прикладі гідроелектростанції розглянуто характерні руйнування та пошкодження конструкцій мостової споруди, розташованої на греблі ГЕС, спричинені ракетно-дроновим ударом (рис. 1–4).

За результатами технічного обстеження конструкцій мосту, проведеного у 2026 році, встановлено погіршення його технічного стану порівняно з результатами попереднього обстеження, виконаного в 2025 року. Основною причиною погіршення стану стали неодноразові пошкодження, спричинені ракетно-дроновими ударами.

На мостовому полотні виявлено нове руйнування окремої ділянки проїзної частини, зокрема асфальтобетонного покриття в прогоні з боку

нижнього б’єфу. У межах прогонів зафіксовано суцільні вибоїни в покритті проїзної частини. Також встановлено руйнування вузла водовідведення в прогоні поблизу опори з боку нижнього б’єфу (рис. 1).



Рис.1. Наслідки ракетно-дронового удару — руйнування плити проїзної частини, тротуару, бар’єрного і перильного огородження



Рис.2. Вид знизу зруйнованої зони, оголена арматура крайки тротуару в прогоні моста, зі сторони нижнього б’єфу після ракетно-дронового удару



Рис. 3. Визначення ширини розкриття тріщини. Тріщина у верхньому шарі під гідроізоляцією розкриттям до 2,4 мм



Рис. 4. Визначення міцності бетону. Руйнування бетону в плитній частині балок прогонової будови

Бар’єрне огородження має локальні руйнування, наскрізні отвори, деформації та розриви елементів. Виявлено корозійні пошкодження сталі зі зменшенням поперечного перерізу металевих елементів огородження в межах прогонів.

Перильне огородження з боку нижнього б’єфу зазнало руйнувань над опорою та в прогонових ділянках. Зафіксовано наскрізні отвори, деформації та розриви елементів, пошкодження з’єднань елементів заповнення, наскрізну корозію сталі й зменшення поперечного перерізу елементів огородження.

У конструкції мостового полотна над опорою з боку нижнього б’єфу виявлено руйнування окремої ділянки та порушення довкола герметизації, що створює умови для проникнення вологи в конструкцію.

Пошкодження прогонової будови з боку нижнього б’єфу охоплюють ділянки над опорою в прогоні. Виявлено руйнування плитної частини балки, тріщину вздовж плити по вуту, оголення арматури, її корозійні пошкодження та деформації. У зоні спирання крайньої балки поблизу опори зафіксовано сколювання бетону ребра. Зазначені пошкодження пов’язані з ракетно-дроновим ударом.

Раніше у верхній частині опори з боку нижнього б’єфу було встановлено руйнування бетону, спричинене ракетно-дроновим ударом. З боку низового прогону глибина вивалів бетону за висотою сягала 1,1 м, а в окремих місцях часткове руйнування поширюється до 2,2 м. Нижче зони основних руйнувань спостерігаються тріщини та локальні виколювання бетону.

Висновки. За результатами аналізу виявлених дефектів і пошкоджень встановлено, що руйнування внаслідок ракетно-дронового удару не поширилося на ригель опори. За результатами обстеження опора зберігає здатність сприймати навантаження від прогонової будови.

Локальне механічне розкриття монолітної плити в зоні пролому до бетону, що не має видимих пошкоджень, показало, що на відстані 550–700 мм від краю розчищеної ділянки бетон залишається неушкодженим.

У плитній частині балки виявлено пошкодження та розшарування бетону, а також закриту тріщину по вуту в консольній ділянці з боку нижнього б’єфу. При цьому пошкодження не поширюються на ребро балки.

За результатами розрахункової перевірки встановлено, що несуча здатність балки за похилими перерізами поблизу опори є достатньою за умови умовного виключення з роботи плитної частини з боку нижнього б’єфу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 «Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану»
2. ДБН В.2.3-22:2009. Мости та труби. Основні вимоги проектування.
3. Чеканович, М. Г. (2024). Теорема для розрахунку будівельних конструкції. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, (5), 199-204. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.5.24
4. Чеканович, М. Г. (2024). Альтернативний розрахунок будівельних конструкції на основі обертального моменту. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, (6), 261-268. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.6.29
5. Залізобетонні конструкції з натягом арматури на бетонну суміш: монографія / Мечислав Чеканович: Херсонський державний аграрно-економічний університет.– Одеса: Олді +, 2024 – 146 с.

УДК 621.311:004.94: 378:004.9

Волошинов С.А.
доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії, Херсонський державний аграрно-економічний університет, Херсон
voloshynov_s@ksaeu.kherson.ua

ІНТЕГРАЦІЯ ТРИВІМІРНИХ ПРОСТОРІВ У МОДЕЛЬ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ В ЕНЕРГЕТИЦІ.

Вступ. Сучасний етап розвитку енергетичного сектору України та світу характеризується масштабною цифровою трансформацією, переходом до децентралізованої генерації, інтеграцією відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та суворими вимогами до надійності й кібербезпеки критичної інфраструктури. У цих умовах традиційні методи моніторингу та диспетчеризації енергетичних об'єктів стають недостатніми для оперативної оцінки складних нелінійних процесів у реальному часі. На заміну їм приходить концепція цифрових двійників (Digital Twins), яка забезпечує створення точних віртуальних копій фізичних активів — від окремих силових трансформаторів і розподільних підстанцій до цілих енергомереж.

Проте, на сучасному етапі розвитку, ефективність цифрових двійників часто обмежується двовимірними (2D) інтерфейсами візуалізації та абстрактними масивами даних (теплові карти, числові графіки, табличні лог-файли), які не дають змоги оператору повною мірою сприймати просторові взаємозв'язки, кінематику обладнання та просторові ризики в аварійних ситуаціях. У зв'язку з цим важливим завданням стає глибока інтеграція тривимірних (3D) просторів, геоінформаційних систем (ГІС) та BIM-моделей (Building Information Modeling) у єдину екосистему цифрових двійників в енергетиці. Це дозволить здійснювати просторовий аналіз, прогнозувати знос обладнання, моделювати наслідки аварій та оптимізувати процеси диспетчеризації та експлуатації в режимі реального часу.

Основна частина. Питанням впровадження технологій цифрових двійників в енергетиці та кіберфізичних систем присвячено чимало праць вітчизняних та закордонних учених. Вагомий внесок у розвиток теорії моделювання складних енергосистем, інтелектуального моніторингу та цифрової трансформації зробили такі дослідники як М. Булгаков, О. Мельник, П. Мельник, С. Планковський, В. Плюхін, Йоргенсен (B. N. Jørgensen), З. Ма (Z. G. Ma) та інші. Водночас аспекти поєднання геопросторових даних, 3D-моделювання та IoT-сенсорів із застосуванням імерсивних технологій у єдину архітектуру цифрового двійника енергетичного підприємства залишаються недостатньо вивченими, особливо щодо вимог до швидкої обробки великих

обсягів тривимірної графічної інформації та забезпечення інтероперабельності даних.

Як ми вже зазначали традиційні методи моніторингу та диспетчеризації вже не справляються з обробкою великих гетерогенних масивів інформації, що надходять від мільйонів датчиків та пристроїв. Вирішенням цієї проблеми вбачається у концепції цифрових двійників (Digital Twins) нового покоління, яка реалізується через тривимірну інтеграцію трьох ключових просторів:

1. Інтелектуального простору ШІ (машинне навчання, аналіз даних та прогнозування).
2. Простору телеметрії та високопродуктивного IoT (синхронізація в реальному часі).
3. Імерсивного простору AR/VR (просторова візуалізація та взаємодія).

Синергія цих компонентів створює єдину кіберфізичну екосистему управління енергетичними активами.



Рис. 1. Інтеграція тривимірних просторів в модель цифрових двійників.

1. Перший простір - штучний інтелект, машине навчання та інтелектуальний аналіз. Ядром будь-якого сучасного цифрового двійника є інтелектуальний аналітичний всесвіт, побудований на методах машинного навчання (Machine Learning) та глибинного навчання (Deep Learning). В енергетиці цей простір відповідає за перетворення сирих потоків даних на чіткі та корисні підказки для прийняття рішень таких як:

- **Предиктивна аналітика та прогнозування навантажень:** Алгоритми ШІ аналізують історичні та поточні дані споживання, погодні умови та ринкові чинники, прогнозуючи пікові навантаження в

електричних мережах із точністю понад 95%. Це дозволяє автоматично балансувати генерацію та попит.

- **Виявлення аномалій і діагностика стану обладнання:** Завдяки нейромережевим моделям (наприклад, згортковим та рекурентним архітектурам) система здатна в режимі реального часу розпізнавати приховані дефекти ізоляції, мікротрещини чи перегрів трансформаторів задовго до виникнення аварійної ситуації.

- **Оптимізація режимів роботи:** Інтелектуальні агенти підсилювального навчання (Reinforcement Learning) знаходять оптимальні параметри маршрутизації потоків потужності, мінімізуючи технічні втрати в електромережах та знижуючи викиди вуглецю.

2. Другий простір - високопродуктивна синхронізація телеметрії та IoT-інфраструктура. Жоден інтелектуальний алгоритм не здатний функціонувати без надійного джерела даних. Саме цей простір охоплює розподілену мережу інтернет-речей (IoT), сенсори, контролери SCADA та системи збору телеметричної інформації високої частоти, виконуючи наступні функції:

- **Архітектура реального часу та обробка великих даних (Big Data):** Енергетичні об'єкти генерують терабайти параметрів за секунду (напруга, частота, температура, вібрації). Високопродуктивні шини даних (наприклад, Apache Kafka, MQTT) забезпечують мінімальні затримки (latency) при передачі телеметрії від фізичного активу до віртуального двійника.

- **Синхронізація станів:** Механізми мікросервісної архітектури гарантують, що стан кожного віртуального елемента (вимикача, генератора, лінії електропередач) повністю синхронізований із фізичним прототипом із похибкою в мілісекундах.

- **Граничні обчислення (Edge Computing):** Для критично важливих об'єктів частина обчислень та первинної фільтрації шумів телеметрії переноситься безпосередньо на периферійні пристрої (Edge gateways), що знижує навантаження на основну мережу зв'язку та підвищує кіберстійкість системи.

3. Третій простір - імерсивні технології AR/VR та просторова інтеграція.

Завершальним етапом інтеграції є надання людині-оператору або інженерному персоналу інтуїтивного доступу до всієї повноти даних через технології доповненої (AR) та віртуальної (VR) реальності, які виконують наступні функції:

- **Віртуальна реальність (VR) для навчання та моделювання:** інженери можуть «занурюватися» у повномасштабну 3D-модель підстанції чи електростанції ще до початку монтажних робіт. Це

дозволяє безпечно відпрацьовувати сценарії ліквідації аварій, проводити віртуальні тренування персоналу в умовах, наближених до реальних, та аналізувати складні просторові взаємозв'язки обладнання.

- **Доповнена реальність (AR) під час експлуатації:** під час виконання робіт на об'єкті технік у спеціальних AR-окулярах бачить поверх реального обладнання контекстні підказки: поточні показники датчиків, схеми потоків енергії, інструкції з ремонту та попередження про небезпечні зони під високою напругою.

- **Зменшення людського фактора:** поєднання просторової геометрії BIM/CAD-моделей із потоками телеметрії в реальному часі через імерсійні інтерфейси радикально скорочує час локалізації несправностей та підвищує безпеку праці на критичних об'єктах інфраструктури.

Висновки

Інтеграція трьох просторів — інтелектуального аналізу на базі ШІ, високопродуктивної телеметрії IoT та імерсивної візуалізації AR/VR — формує нову парадигму управління в енергетиці. Вона перетворює статичні цифрові моделі на живі, адаптивні кіберфізичні системи. Такий підхід забезпечує достатньо високий рівень надійності електромереж, мінімізує аварійні ризики, оптимізує витрати на обслуговування та виводить ефективність української енергетичної галузі на якісно новий технологічний рівень.

Інтеграція технологій доповненої (AR) та віртуальної (VR) реальності дозволить диспетчерам здійснювати віртуальний «обхід» цифрової підстанції, бачачи накладені поверх обладнання графіки теплових режимів та вектори напруги. А ремонтним бригадам на реальних об'єктах засобами AR отримувати предиктивні підказки від цифрового двійника щодо послідовності демонтажу або залишку ресурсу конкретного вузла.

Список використаної літератури.

1. Плюхін В. Цифрові двійники та кіберфізичні системи в енергетиці: методологія та практична реалізація / В. Плюхін, С. Планковський // Вісник інженерних наук. — 2024. — № 2. — С. 45–52.

2. Булгаков М. Інтегровані цифрові двійники та енергоефективність складних енергосистем / М. Булгаков, О. Мельник // Технічна електродинаміка. — 2025. — № 4. — С. 34–41.

3. Jørgensen B. N. Energy Informatics: Foundations for Digital Transformation in Green Energy Ecosystems / B. N. Jørgensen, Z. G. Ma. — Odense : University of Southern Denmark Press, 2024. — 312 p.

4. Ma Z. G. Digital Twins for Industrial Processes, Value Chains, and Business Ecosystems / Z. G. Ma, B. N. Jørgensen // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2025. — Vol. 180. — Art. 113420.

5. Мельник О. Інформаційні технології моделювання та оптимізації режимів роботи енергетичного обладнання / О. Мельник. — Київ : Наукова думка, 2023. — 248 с.

6. Мельник, П. Архітектура IoT-мереж для інженерних систем енергетики / П. В. Мельник // Системи автоматичного управління та автоматики. – 2021. – № 2. – С. 13–22.

7. Jørgensen B. N. Agentic Generative AI for Methodology-Grounded Modelling from Unstructured Documents / H. F. Gärdström, B. N. Jørgensen, Z. G. Ma // Information. — 2026. — Vol. 17, no. 6. — P. 570.

8. Voloshynov SA Alhorytmichna pidhotovka maibutnikh sudnovodiiv z systemoiu vizualnoi pidtrymky v umovakh informatsiinokomunikatsiinoho pedahohichnoho seredovyshcha [Algorithmic training of future navigators with a visual support system in the information and communication pedagogical environment] - Extended abstract of candidate's thesis. Kherson, 2012.

УДК 621.311.21

Чепіль Р. Д.

Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

ГІДРОАКУМУЛЮВАЛЬНІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ЯК ЕЛЕМЕНТ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСИСТЕМ В УМОВАХ ВОЄННИХ ДІЙ

Вступ. Пошкодження енергетичної системи України внаслідок воєнних дій посилило потребу в технологіях накопичення електроенергії та оперативного регулювання навантаження. Гідроакумулювальні електростанції (ГАЕС) забезпечують накопичення електроенергії, покриття пікових навантажень і підтримання балансу між виробництвом та споживанням електроенергії. Метою дослідження є визначення функціональних можливостей ГАЕС для стабілізації енергосистеми України під час воєнного стану шляхом порівняння їхніх технічних та експлуатаційних характеристик із промисловими акумуляторними системами накопичення енергії.

Основна частина. До початку повномасштабного вторгнення основу виробництва електроенергії України становили атомні, теплові та гідроелектростанції. Більше половини загального виробництва електроенергії

становила частка атомної генерації. Балансування енергосистеми забезпечувалося, маневровими потужностями теплової та гідроенергетики, включно з гідроакумулювальними електростанціями (Рис. 1) [1, с. 197–198].

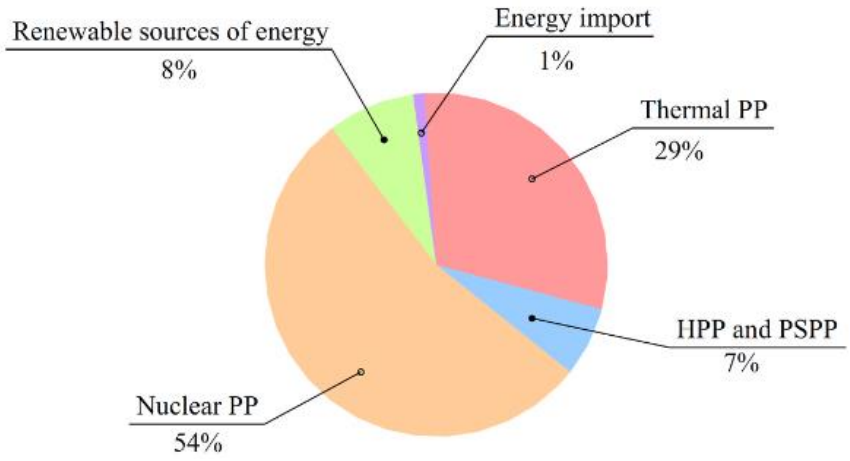


Рис. 1: Частка виробництва енергії за типом електростанцій, станом на 2021 рік [2, с. 2]

З початку повномасштабного вторгнення в лютому 2022 воєнні удари спричинили пошкодження теплових електростанцій, теплоелектроцентралей та високовольтної інфраструктури. Через руйнування енергетичної інфраструктури в країні погіршилась стабільність енергопостачання та виник дефіцит потужностей. Щонайменше 12 ТЕС і ТЕЦ було знищено або пошкоджено, окупація призвела до втрати доступу української енергосистеми до генерувальних потужностей Запорізької АЕС [1, с. 199]. Скорочення доступної генерації та пошкодження мереж ускладнили підтримання балансу між виробництвом і споживанням електроенергії.

В Україні споруджено три гідроакумулювальні електростанції: Дністровську, Київську та Ташлицьку. Канівська ГАЕС проєктною потужністю 1000 МВт залишається нереалізованим проєктом [2, с. 5–7; 3, с. 101;]. ГАЕС використовують для накопичення електроенергії, регулювання потужності та вирівнювання добового графіка навантаження енергосистеми. Їх робота ґрунтується на перетворенні надлишкової електричної енергії на потенційну енергію води та її подальшому поверненні в електричну форму, тож ГАЕС не є першоджерелом енергії. Основними елементами ГАЕС є верхнє й нижнє водосховища, водоводи, насосно-турбінне обладнання, електричні генератори та системи керування (Рис. 2) [3, с. 100–101].

У насосному режимі електродвигун приводить у дію насос, що переміщує воду з нижнього водосховища до верхнього, споживаючи електроенергію з мережі. Вода, розташована на більшій висоті, утримує потенційну енергію, запас якої залежить від об'єму води та перепаду висот між водосховищами. У генераторному режимі потік води спрямовується з верхнього водосховища

через водоводи до турбіни, де рух води приводить у дію генератор – потенційна енергія води перетворюється на механічну, а потім на електричну енергію, що знову подається в мережу. Перехід між режимами дає змогу регулювати навантаження енергосистеми [3, с 101].



Рис. 2: Принципова схема роботи гідроакумулювальної електростанції [3, с. 101]



Рис. 3: Дністровська гідроакумулювальна електростанція

Одним із ключових завдань енергосистеми є підтримання балансу між виробництвом і споживанням електроенергії. ГАЕС забезпечують балансування енергосистеми шляхом споживання електроенергії в насосному режимі та її виробництва в генераторному режимі. Накопичення здійснюється в періоди надлишку доступної генерації або зниженого навантаження, а віддача електроенергії у години підвищеного попиту. Додатковими функціями ГАЕС є регулювання частоти та забезпечення резервів потужності.

В умовах воєнних дій ГАЕС можуть використовуватися для оперативного покриття дефіциту потужності, спричиненого пошкодженням генерувальних об'єктів, а також для підтримання частоти та балансування навантаження. Накопичена електроенергія може частково компенсувати втрату генерації протягом обмеженого часу. Ефективність такого використання залежить від запасу води у верхньому водосховищі, доступності гідроагрегатів і стану електричних мереж [2, с. 6; 4, с. 13].

Для визначення ефективності гідроакумулювальних електростанцій доцільно порівняти їх із сучасними акумуляторними системами промислового масштабу. Обидві технології призначені для накопичення електроенергії та її подальшого використання відповідно до потреб енергосистеми, проте мають значні відмінності.

Для порівняння експлуатаційних характеристик двох технологій накопичення електроенергії обрано Дністровську ГАЕС (Україна) (Рис. 3) та літій-іонну акумуляторну систему Hornsdale Power Reserve (Австралія). (Табл. 1).

Критерій	**Дністровська ГАЕС**	**Hornsdale Power Reserve**
Тип накопичення	Потенційна енергія води.	Електрохімічне накопичення в літій-іонних акумуляторах.
Установлена потужність	1296 МВт у генераторному режимі та 1684 МВт у насосному режимі для чотирьох агрегатів станції.	Установлена потужність заряджання та розряджання системи 150 МВт.
Запас енергії	Орієнтовно 13 ГВт·год теоретичної потенційної енергії води за корисного об'єму 32,7 млн м³ і номінального напору 146 м	194 МВт·год номінальної ємності
Швидкість реагування	Введення гідроагрегату на номінальне навантаження потребує декількох хвилин	Дуже швидке електронне регулювання потужності
Тривалість віддачі енергії	Близько 10 годин	Близько 1,3 години
Ефективність повного циклу	75–85%	82%
Фінансові витрати	Сумарна оцінка трьох черг будівництва становить близько $2,09 млрд за перерахунком оприлюднених оцінок у гривнях за курсом 2021 року.	Загальна сума становить орієнтовно $118 млн за курсами відповідних періодів почергового спорудження.

Табл. 1 – порівняння ефективності накопичувальних споруд Дністровської ГАЕС (Україна) та Hornsdale Power Reserve (Австралія) [2, с. 6–7; 5, с. 3–7]

Порівняння демонструє відмінності між гідроакумулювальними та акумуляторними принципами накопичення енергії за потужністю, обсягом запасу енергії, тривалістю віддачі та ціновою і масштабною категорією. Дністровська ГАЕС завдяки значному запасу потенційної енергії води може забезпечувати триваліше постачання електроенергії та підтримувати баланс великої енергосистеми протягом тривалих періодів, однак потребує масштабної інфраструктури, відповідних природних умов і значних капіталовкладень. Зауважимо, що відношення запасу енергії до ціни ГАЕС у 4 рази більше за відповідне відношення акумуляторної системи.

Важливим напрямом застосування гідроакумулювальних електростанцій є забезпечення ефективної інтеграції відновлюваних джерел енергії. ГАЕС можуть забезпечувати інтеграцію сонячних (СЕС) і вітрових (ВЕС) електростанцій шляхом накопичення надлишкової електроенергії в періоди високої генерації та її повернення до мережі за зниження виробництва. Інтеграція нових СЕС та ВЕС сприяє підвищенню гнучкості енергосистеми та її ефективності. До 2050 року прогнозується збільшення потужностей ГАЕС більш ніж на 100% [4, с. 14].

Воєнні дії в Україні супроводжуються значним негативним впливом на екологію, зокрема забруднення атмосферного повітря та вод. [1, с. 200] За таких умов особливого значення набуває розвиток енергетичних технологій із низьким рівнем викидів парникових газів. Гідроакумулювальні електростанції характеризуються відсутністю прямих викидів вуглекислого газу, а їхній повний вуглецевий слід охоплює лише викиди на етапах будівництва, виробництва матеріалів і технічного обслуговування, що компенсується терміном служби у 80–100 років за умови технічного обслуговування та періодичної заміни обладнання. ГАЕС із замкнутим циклом використовують фіксований об'єм води без залучення сторонніх джерел, виключаючи вплив на екосистему [2, с. 101; 4, с. 14].

Висновки. Гідроакумулювальні електростанції стають надзвичайно корисним елементом стабілізації енергосистем в умовах воєнних дій, оскільки надають змогу накопичувати надлишкову енергію в періоди її генерації та повертати її в мережу під час вимушених виключень і після масованих обстрілів. Спираючись на порівняння Дністровської ГАЕС та акумуляторної системи Hornsdale Power Reserve, ГАЕС є переважаючим за ефективністю методом при розгляді великопланових енергосистем, маючи більш екологічне вирішення та довший термін служби. Залучання ГАЕС до окремих енергосистем сприяє підсиленню ефективності джерел відновлюваної енергії, які посідають провідне місце серед перспективних технологій енергетики.

Список використаних джерел.

1. Чорній В. Вплив війни на енергетичну систему України. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2022. № 2(2). С 196–202.

2. Halych O., Bilkova E., Nowak P., Riabenko O. A review on hydropower in Ukraine – its state, role in the energy system and potential for post-war recovery. *Energy Strategy Reviews*. 2025. № 62. P 1–11.

3. Мирутенко П. П. Гідроакумулюючі електростанції: переваги та перспективи розвитку. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку*. Збірник наукових праць IX Міжнародної науково-технічної конференції. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. С 100–102.

4. Гуляєва О. О., Усов О. Є., Грицак О. А. Гідроакумулюючі електростанції: переваги та перспективи розвитку. *Гідроенергетика України*. 2021. № 3–4. С 13–15.

5. Meng Y. Economic Analysis of Centralized Energy Storage and Impact on NEM. *Earth and Environmental Science*. 2021. Vol 680. P 1–20.

УДК 535.317:615.47

Заводянний В.В.
Херсонський державний аграрно-економічний університет м. Херсон

ЗАСТОСУВАННЯ РІДИННИХ ЛІНЗ: ВІД ФІЗИКИ ДО МЕДИЦИНИ

Анотація

Розглянуто фізичні засади функціонування рідинних лінз, основні способи зміни їхньої оптичної сили та перспективи застосування в медичних системах візуалізації. Проаналізовано роль поверхневого натягу, рівняння Юнга — Лапласа, електрозмочування і мембранного керування. Показано потенціал компактних систем автофокусування для ендоскопії, офтальмологічної діагностики, мікроскопії та портативних медичних пристроїв. Окреслено інженерні обмеження й напрями подальших досліджень.

Ключові слова: рідинна лінза, адаптивна оптика, електрозмочування, поверхневий натяг, автофокусування, медична візуалізація.

1. Вступ та актуальність

Мініатюризація діагностичної апаратури й розвиток малоінвазивних методів лікування посилюють потребу в оптичних компонентах, здатних змінювати фокусну відстань без переміщення масивних груп твердих лінз. Звичайні механічні механізми фокусування потребують простору, можуть зношуватися та ускладнюють герметизацію приладів. Рідинні лінзи пропонують альтернативу: керована межа поділу рідин або еластична мембрана змінює кривизну оптичної поверхні, а отже й оптичну силу.

На відміну від традиційних скляних елементів, такі системи поєднують оптику з гідродинамікою, фізикою поверхонь, електрофізикою та матеріалознавством. Водночас їх практична ефективність залежить від стабільності рідин, температури, гравітації, швидкості відгуку та допустимих аберацій. Тому оцінювання медичних застосувань потребує аналізу не лише можливостей фокусування, а й відтворюваності оптичних параметрів.

Мета роботи — систематизувати фізичні принципи роботи рідинних лінз і визначити найбільш обґрунтовані напрями їх інтеграції в медичні оптичні системи. Метод роботи — аналітичний огляд наукових публікацій та порівняння основних технологічних підходів.

2. Фізичні основи формування оптичної поверхні

Рідинна лінза створює оптичну силу завдяки криволінійній межі між середовищами з різними показниками заломлення. Світловий промінь на цій межі підкоряється закону Снеліуса: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, де n_1 і n_2 — показники заломлення, а θ_1 і θ_2 — кути падіння та заломлення. Зміна кривизни межі змінює напрямки променів і положення фокуса.

Для тонкої лінзи в параксіальному наближенні оптичну силу можна описати співвідношенням $\Phi = 1/f \approx (n_л/n_c - 1)(1/R_1 - 1/R_2)$, де f — фокусна відстань, $n_л$ і n_c — показники заломлення лінзи та навколишнього середовища, R_1 і R_2 — радіуси кривизни поверхонь. Для рідинної лінзи ця формула є корисною

першою оцінкою, хоча реальні системи можуть мати кілька шарів і складну геометрію.

Форма поверхні визначається балансом сил. Рівняння Юнга — Лапласа встановлює зв'язок між стрибком тиску та кривизною: $\Delta p = \gamma(1/R_1 + 1/R_2)$, де γ — коефіцієнт поверхневого натягу. Отже, керуючи перепадом тиску, можна змінювати форму меніска. В малих масштабах капілярні сили часто переважають над гравітаційними, що сприяє створенню компактних оптичних модулів.

Контактний кут на межі рідини й твердої поверхні визначає граничні умови форми меніска. Його залежність від властивостей матеріалів описується рівнянням Юнга: $\gamma SV - \gamma SL = \gamma LV \cos\theta$. У реальних пристроях важливі гістерезис контактного кута, шорсткість і неоднорідність покриттів: вони можуть спричиняти відмінності між налаштуванням фокуса в прямому та зворотному напрямках.

Додатково враховують число Бонда $Bo = \Delta\rho g L^2/\gamma$, яке порівнює гравітаційні й капілярні ефекти. При $Bo \ll 1$ вплив орієнтації приладу зазвичай зменшується; зі збільшенням апертури деформації від гравітації стають суттєвішими.

3. Основні технології керування рідинними лінзами

Одним із найбільш досліджених підходів є електрозмочування (electrowetting). Напруга між провідною рідиною та електродом, ізольованим діелектриком, змінює ефективний контактний кут. В ідеалізованому випадку рівняння Юнга — Ліппмана має вигляд $\cos\theta(U) = \cos\theta(0) + \varepsilon_0\varepsilon_r U^2/(2\gamma d)$, де U — напруга, d — товщина діелектрика, ε_r — його відносна діелектрична проникність. Зміна кута веде до перебудови меніска та фокусної відстані.

Перевагами електрозмочування є відсутність механічного поступального переміщення лінзових груп, компактність і можливість електронного керування. Проте в реальних пристроях спостерігають насичення контактного кута, гістерезис, обмеження електричної міцності ізолятора й залежність характеристик від температури. Тому ідеалізована квадратична залежність не завжди описує весь робочий діапазон.

Інший підхід — гідравлічно або пневматично керована мембранна лінза. Прозора еластична мембрана відділяє рідину від навколишнього середовища; зміна тиску чи об'єму рідини викликає її прогинання. Такі лінзи можуть забезпечувати значний діапазон оптичної сили, але потребують стабільних приводів, герметичних камер та контролю механічних напружень. Властивості мембрани можуть змінюватися з часом і температурою.

Існують також електростатичні, діелектрофоретичні, термокапілярні та акустично керовані реалізації. Їхні характеристики відрізняються за споживанням енергії, швидкодією, складністю виготовлення й біосумісністю матеріалів. Вибір технології має визначатися конкретною медичною задачею: для компактного ендоскопа критичні габарити, тоді як для лабораторного мікроскопа можуть бути важливішими апертура та точність відтворення фокуса.

4. Оптичні характеристики та критерії якості

Ключовими параметрами рідинної лінзи є діапазон оптичної сили, діаметр світлової апертури, час встановлення фокуса, пропускання, хвильові аберації та стабільність. Оптичну силу зазвичай виражають у діоптріях: 1 дптр = 1 $м^{-1}$. Високий діапазон перебудови сам по собі не гарантує високої якості зображення, якщо при крайніх положеннях меніска різко зростають сферична аберація та кома.

Після зміни керувального сигналу рідина може здійснювати затухаючі коливання. Через це слід розрізняти час початкового переміщення фокуса і час повного встановлення оптичних параметрів. У системах реального часу це визначає частоту оновлення зображень та ефективність алгоритмів автофокусування.

Важливим критерієм є функція передачі модуляції (MTF), яка характеризує відтворення контрасту деталей різної просторової частоти. Для медичної діагностики оцінюють не тільки геометричну різкість, а й здатність системи відображати дрібні структури тканин. Погіршення MTF може бути пов’язане з деформацією меніска, неоднорідністю показника заломлення, забрудненням оптичного вікна чи паразитними відблисками.

Температурні коливання впливають на в’язкість, поверхневий натяг, густину та показник заломлення рідин. Внаслідок цього однакова керувальна напруга може давати різну оптичну силу за різних умов. Практичні рішення включають калібрування, температурну компенсацію, замкнений контур керування та програмну корекцію залишкових спотворень.

Для об’єктивного порівняння різних технологій доцільно наводити характеристики за однакових умов: апертури, температури, довжини хвилі, діапазону фокусування та критерію часу встановлення. Без цього пряме зіставлення паспортних показників може бути некоректним.

5. Застосування в ендоскопії та малоінвазивній діагностиці

Ендоскопічні системи мають суворі обмеження щодо діаметра оптичного тракту та відстані до об’єкта. Під час огляду слизових оболонок робоча відстань постійно змінюється, а механічне переміщення лінзових груп у тонкому зонді технічно складне. Керована рідинна лінза потенційно дає змогу реалізувати електронне автофокусування без збільшення кількості рухомих механічних вузлів.

У дослідних оптичних схемах рідинну лінзу розміщують у каналі формування зображення або в допоміжному фокусувальному модулі. При зміні відстані до тканини система може перебудовувати фокус відповідно до оцінки різкості кадру. Це особливо корисно для отримання зображень поверхневих структур на різних глибинах, однак результат залежить від освітлення, руху пацієнта й алгоритму керування.

Можливе застосування також у конфокальній ендомікроскопії та оптичній когерентній томографії, де важливе керування фокусом у невеликому об’ємі. Проте зміна фокуса не замінює осьового сканування, яке використовується в

окремих методах томографії, і потребує узгодження з оптичною схемою та алгоритмами реконструкції.

Для клінічного використання необхідно оцінити стійкість до багаторазових циклів стерилізації або забезпечити розташування лінзи в ізольованому одноразовому модулі. Не менш важливі герметичність, електробезпека, стабільність покриттів та сумісність із нормативними вимогами до медичних виробів.

Отже, рідинна лінза в ендоскопії є насамперед перспективним компонентом системи автофокусування. Твердження про покращення клінічної точності діагностики потребують окремих порівняльних досліджень на пацієнтах.

6. Офтальмологія, мікроскопія та портативні системи

В офтальмологічних діагностичних приладах регулювання фокусної відстані потрібне для компенсації рефракційних відмінностей, наведення різкості та отримання зображень структур ока. Рідинні лінзи розглядають як складові адаптивних оптичних модулів, у яких фокус можна налаштовувати електронно. Водночас вони не є повноцінною заміною корекції всіх аберацій вищих порядків: для цього часто потрібні додаткові адаптивні елементи.

У світловій і флуоресцентній мікроскопії керовані лінзи дають можливість швидко змінювати площину фокусування без механічного переміщення об’єктива чи препарату. Це може зменшувати механічні вібрації та спрощувати серійне отримання оптичних зрізів. Водночас зміна фокуса здатна супроводжуватися зміною збільшення й аберацій, тому необхідні калібрування та цифрове вирівнювання зображень.

Для мікрофлюїдних лабораторій на чипі рідинні лінзи привабливі сумісністю з мініатюрними каналами й можливістю інтеграції з сенсорами. Потенційні завдання включають спостереження за клітинами, аналіз мікрочастинок та автоматизоване наведення різкості. Однак хімічна сумісність робочих рідин із матеріалами мікросистеми й стабільність оптичної поверхні потребують окремої перевірки.

У портативних діагностичних пристроях компактна лінза може зменшити потребу в механічному приводі та полегшити створення автоматизованих систем. Реальні переваги за масою, енергоспоживанням і собівартістю залежать від повного модуля, включно з електронікою керування, джерелом живлення та корпусом.

7. Обмеження, безпека та напрями подальших досліджень

Поширенню рідинних лінз у медичній техніці перешкоджає низка взаємопов’язаних факторів. По-перше, температурна залежність фізичних властивостей рідин може спричиняти дрейф фокуса. По-друге, поверхневі дефекти й гістерезис контактного кута знижують повторюваність. По-третє, механічні коливання після швидкої перебудови обмежують динамічні режими роботи.

Особливого значення набуває довготривала герметичність. Витік робочої рідини, утворення бульбашок, випаровування та деградація покриттів здатні

погіршити оптичні характеристики. Для медичних застосувань необхідні оцінювання ризиків, електрична ізоляція, матеріальна сумісність і випробування на надійність за передбачуваних умов експлуатації.

Перспективним напрямом є поєднання рідинної оптики з алгоритмами комп'ютерного зору. Наприклад, система може оцінювати локальну різкість і підбирати керувальний сигнал за критерієм максимуму контрасту. Використання датчика температури та попередньо виміряної калібрувальної залежності дає змогу частково компенсувати дрейф параметрів.

Інший напрям — багатофункціональні оптичні модулі, які поєднують перебудову фокуса з компенсацією окремих аберацій. Дослідження нових мембранних матеріалів, стійких діелектричних покриттів і робочих рідин можуть розширити діапазон оптичної сили та підвищити ресурс. Однак оптимізація має враховувати не лише фізичні показники, а й технологічність виробництва, стерилізацію та стандарти медичних виробів.

Для подальшої експериментальної роботи доцільно порівнювати рідинний і традиційний фокусувальні модулі в однаковому оптичному тракті за MTF, часом встановлення, енергоспоживанням та стабільністю після циклічних навантажень. Такий дизайн дослідження дозволить кількісно оцінити практичну цінність технології.

8. Висновки

Рідинні лінзи демонструють можливість керувати фокусною відстанню завдяки зміні геометрії межі поділу середовищ або форми еластичної мембрани. Їхня робота безпосередньо пов'язана із законом заломлення, поверхневим натягом, капілярними явищами та електричним керуванням міжфазними процесами.

Електрозмочування забезпечує компактний спосіб електронного регулювання меніска, а мембранні системи використовують керовану зміну тиску або об'єму. Обидва підходи мають переваги й обмеження, тому універсального рішення для всіх медичних оптичних задач не існує.

Найбільш перспективними напрямами є автофокусування в мініатюрних ендоскопічних системах, електронне керування фокусом у мікроскопії, а також адаптивні оптичні модулі офтальмологічних і портативних діагностичних приладів. Клінічна ефективність конкретного рішення має підтверджуватися експериментально й не випливає лише з фізичної можливості змінювати фокус.

Подальший розвиток технології потребує покращення стабільності, швидкодії, оптичної якості, довговічності та безпеки, а також стандартизованого порівняння характеристик у реальних умовах використання.

Список використаних джерел

1. Berge B. Electrocapillarity and wetting of insulator films by water. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série II. 1993. Vol. 317. P. 157–163.

2. Mugele F., Baret J.-C. Electrowetting: from basics to applications. Journal of Physics: Condensed Matter. 2005. Vol. 17. R705–R774. DOI: 10.1088/0953-8984/17/28/R01.

3. Kuiper S., Hendriks B. H. W. Variable-focus liquid lens for miniature cameras. Applied Physics Letters. 2004. Vol. 85. P. 1128–1130. DOI: 10.1063/1.1779954.
4. Ren H., Fox D., Anderson P. A., Wu B., Wu S.-T. Tunable-focus liquid lens controlled using a servo motor. Optics Express. 2006. Vol. 14. P. 8031–8036.
5. Krogmann F., Mönch W., Zappe H. A MEMS-based variable micro-lens system. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2006. Vol. 8. S330–S336.
6. Blum M., Büeler M., Grätzel C., Aschwanden M. Compact optical design solutions using focus tunable lenses. Proceedings of SPIE. 2011. Vol. 8167. 81670W.

УДК 621.565

Байдак Ю.В.
Херсонський державний аграрно-економічний університет м. Херсон

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ СИЛОВОГО РОЗПОДІЛЬЧОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Вступ. Розподільчі трансформатори є важливими елементами систем електропостачання промислових, комунальних і побутових споживачів. Надійність їхньої роботи значною мірою залежить від теплового стану активної частини, до складу якої входять обмотки та магнітопровід, розміщені в трансформаторному маслі, рис.1. Під час роботи трансформатора в обмотках і магнітопроводі виникають втрати електричної потужності, які перетворюються на теплоту. Її передавання відбувається шляхом теплопровідності та конвекції, зокрема через трансформаторне масло до навколишнього середовища. Інтенсивність нагрівання визначається величиною навантаження, тривалістю його дії, теплофізичними характеристиками матеріалів і умовами охолодження.



Рис.1. Зовнішній вигляд силового розподільчого трансформатора і його активної частини зануреної у масло

Особливо актуальним є дослідження нестаціонарних теплових процесів за нерівномірного графіка навантаження, коли трансформатор послідовно працює в режимах із різною величиною струму. Оскільки втрати в обмотках залежать від квадрата струму, зміни навантаження спричиняють відповідні зміни тепловиділення та температурного стану обладнання.

Недостатнє врахування температурних режимів під час проєктування може призводити як до передчасного старіння ізоляції, так і до надмірного вкладання маси активних матеріалів. Тому важливим завданням є розроблення доступних математичних моделей, які дають змогу прогнозувати нагрівання

трансформатора в часі та обґрунтовувати його конструктивні й електромагнітні параметри.

Основна частина. Метою роботи є обґрунтування доцільності застосування математичного моделювання теплового балансу розподільчого трансформатора для прогнозування температур обмоток, магнітопроводу та трансформаторного масла під час експлуатації за змінного навантаження.

Для розв'язання поставленого завдання доцільно застосувати метод еквівалентних теплових заступних схем. Його основна перевага полягає в можливості представлення складного процесу теплопередачі у вигляді системи взаємопов'язаних теплових вузлів із зосередженими теплоємкостями, тепловими опорами та витоками теплоти.

У спрощеній моделі активну частину трансформатора надано з трьох основних вузлів, рис.2:

- узагальненою обмоткою, у якій виділяється теплота внаслідок електричних втрат;
- феромагнітним стрижнем магнітопроводу, який нагрівається через магнітні втрати;
- трансформаторним маслом, яке переносить теплоту від обмотки й магнітопроводу у навколишнє середовище.

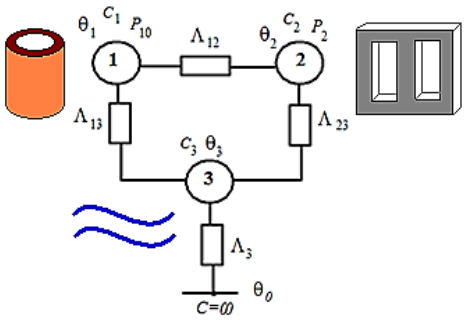


Рис.2. Еквівалентна теплова заступна схема СРТ

Теплові зв'язки між вузлами характеризуються відповідними тепловими провідністями, а здатність елементів накопичувати теплоту визначається їхніми теплоємкостями. Навколишнє середовище розглядається як тіло з нескінченою теплоємністю, температура якого в межах розрахунку вважається сталою.

Математична модель теплового балансу. Зміну температури кожного вузла описує рівняння теплового балансу, яке встановлює співвідношення між накопиченням теплоти, внутрішніми тепловими втратами та тепловими потоками між суміжними елементами.

Для узагальненого вузла рівняння можна записати у вигляді:

$$C_n \frac{d\theta_n}{dt} = \sum_{i=1}^{q(i=n)} \Lambda_{in} (\theta_i - \theta_n) + P_n,$$

де C_n - теплоємність вузла, Дж/К; θ_n - його температура, К або °С; P_n - потужність тепловиділення у вузлі, Вт; Λ_{in}- теплова провідність між вузлами , Вт/К; t - час, с.

Для обмотки джерелом теплоти є переважно електричні втрати, які за незмінного опору приблизно пропорційні квадрату струму:

$$P_{10} \approx I_{\text{н}}^2 R$$

де $I_{\text{н}}$ - струм навантаження, R - активний опір обмотки.

Уточнена модель має враховувати залежність опору від температури, а також інші складові втрат, якщо вони є суттєвими.

У магнітопроводі тепловиділення зумовлене втратами в сталі, які за незмінних умов живлення та конструкції в першому наближенні можна вважати сталими. Тепло, що виділяється в обмотках і магнітопроводі, передається маслу, а від нього - до навколишнього середовища.

Система рівнянь для трьох вузлів дає змогу визначити часові залежності середніх температур обмотки, магнітопроводу та масла:

$$C_1 d\theta_1 + \Lambda_{12}\theta_1 dt + \Lambda_{13}\theta_1 dt - \Lambda_{12}\theta_2 dt - \Lambda_{13}\theta_3 dt = P_{10}(1 - \alpha\theta_1)dt,$$
$$C_2 d\theta_2 + \Lambda_{12}\theta_2 dt + \Lambda_{23}\theta_2 dt - \Lambda_{12}\theta_1 dt - \Lambda_{23}\theta_3 dt = P_2 dt,$$
$$C_3 d\theta_3 + \Lambda_3\theta_3 dt + \Lambda_{13}\theta_3 dt + \Lambda_{13}\theta_1 dt - \Lambda_{23}\theta_2 dt = 0.$$

За відомих початкових температур і заданого графіка навантаження її можна розв'язати чисельними методами та отримати температурні діаграми для різних режимів експлуатації, рис.3.

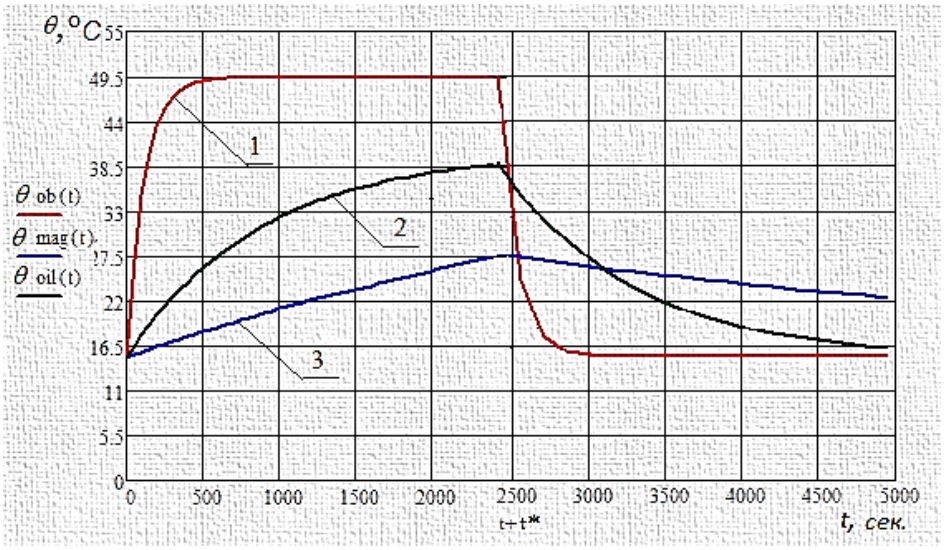


Рис. 3. Часові діаграми нагріву охолодження СРТ за умови температури оточуючого середовища +15ºС (1 – обмотка, 2 – трансформаторне масло, 3 – магнітна система)

Важливою перевагою такого підходу є можливість дослідження не лише усталеного теплового режиму, а й перехідних процесів під час збільшення або зменшення навантаження. Це дає змогу врахувати теплову інерційність трансформатора температура елементів якого змінюється із запізненням відносно зміни струму навантаження.

Практичне значення результатів моделювання. Результати моделювання теплового балансу доцільно використовувати на завершальному та етапах

уточнення даних проектування розподільчих трансформаторів. Отримані температурні залежності дають змогу оцінювати відповідність теплового режиму допустимим значенням і визначати, наскільки ефективно використовуються активні матеріали трансформатора.

Практичне застосування запропонованого підходу передбачає:

1. *Прогнозування температур у часі.* Визначення середніх температур обмоток, магнітопроводу та масла за заданого графіка навантаження, зокрема за повторно-короткочасних і нерівномірних режимів роботи.

2. *Перевірку теплової надійності.* Оцінювання можливості перевищення допустимих температур, що є важливим для забезпечення тривалого терміну служби ізоляції обмоток.

3. *Обґрунтований вибір електромагнітних навантажень.* Уточнення допустимої магнітної індукції в магнітопроводі та густини струму в обмотках з урахуванням обмежень за нагріванням.

4. *Раціональне використання матеріалів.* Зменшення ризику надмірного запасу активних матеріалів за умови підтвердження допустимості розрахункових температур.

5. *Порівняння режимів експлуатації.* Аналіз впливу тривалості та величини навантаження на тепловий стан трансформатора, а також оцінювання можливостей удосконалення режимів його використання.

Водночас слід ураховувати, що модель із трьома вузлами визначає усереднені температури відповідних елементів і не відтворює повністю локальні перегріви, зокрема температуру найбільш нагрітої точки обмотки. Точність розрахунку залежить від достовірності даних про втрати потужності, теплоємності, теплові провідності та умови охолодження. Для підвищення точності параметри моделі доцільно уточнювати за результатами теплових випробувань або детальнішого чисельного моделювання.

Висновки. Застосування математичної моделі теплового балансу на основі еквівалентної теплової заступної схеми є доцільним для оцінювання теплового стану розподільчих трансформаторів на завершальному етапі уточнення даних проєктування.

Модель, що враховує взаємний теплообмін між обмоткою, магнітопроводом і трансформаторним маслом, дає змогу визначати часові залежності середніх температур елементів активної частини та досліджувати вплив нерівномірного графіка навантаження на тепловий режим обладнання.

Використання отриманих результатів створює передумови для обґрунтованого вибору магнітної індукції в магнітопроводі та густини струму в обмотках, забезпечення допустимого нагрівання ізоляції й раціонального використання активних матеріалів. Подальше вдосконалення моделі пов’язане з

урахуванням температурної залежності теплофізичних властивостей, зміни втрат і параметрів охолодження, а також із перевіркою результатів за експериментальними даними.

Список використаних джерел

1. Tanguy, A., Patelli, J. P., Devaux, F., Taishe, J. P., Ngnegueu, T. 2004. *Thermal performance of power transformers: thermal calculation tools focused on new operating requirements*. Presented at CIGRE Session, CIGRE, Paris, France, Session 2004, Report Nr. A2-105.

2. Mufuta, J.-M., Eric van den Bulck. Modelling of the mixed convection in the winding of the a disc- type power transformer. *Applied Thermal Engineering*. 20 (2000). - P. 417-437. http:www.elsevier.com.

УДК 621.311.243:69

Зубенко В.О.

Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИЙ ПОТЕНЦІАЛ МЕРЕЖЕВИХ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ НА ПОКРІВЛЯХ ІСНУЮЧИХ БУДІВЕЛЬ

Вступ. Зростання вартості електричної енергії, пошкодження енергетичної інфраструктури та необхідність виконання міжнародних зобов’язань щодо скорочення викидів парникових газів роблять питання енергозбереження в будівництві одним із пріоритетних. Енергетична стратегія України передбачає суттєве збільшення частки відновлюваних джерел у енергобалансі держави [3], а Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» визначає підвищення енергоефективності будівель як складову державної політики [2]. Для існуючої забудови одним із найбільш доступних заходів є розміщення сонячних фотоелектричних станцій (СЕС) на покрівлях, які не потребують відведення додаткових земельних ділянок і дозволяють виробляти електроенергію безпосередньо в місці її споживання.

Метою роботи є дослідження енергетичної та екологічної ефективності мережевої СЕС встановленою потужністю 400 кВт, розміщеної на покрівлях існуючих будівель, як енергозберігаючого рішення в цивільному будівництві. Для досягнення мети проаналізовано умови роботи мережевих СЕС, розроблено технічне рішення розміщення фотоелектричних модулів на покрівлях, досліджено річний та помісячний режими вироблення електроенергії й отримано кількісні показники енергетичного та екологічного ефекту.

Основна частина. Проаналізовано принцип роботи мережевої СЕС, яка функціонує паралельно із зовнішньою електромережею: вироблена електроенергія насамперед використовується для власного споживання об’єкта,

а її надлишок може передаватися в мережу загального призначення з продажем за «зеленим тарифом» [1]. Встановлено, що в умовах планових і аварійних відключень електроенергії доцільно доповнити мережеву СЕС системою накопичення енергії (СНЕ) на базі акумуляторних батарей. Така система забезпечує резервне живлення відповідальних споживачів у разі зникнення напруги в зовнішній мережі, дозволяє накопичувати вироблену енергію та перерозподіляти її на години пікового споживання.

Розроблено технічне рішення розміщення СЕС, яке забезпечує максимально ефективне використання покрівлі існуючих будівель, найбільше середньорічне вироблення електроенергії та мінімальну вартість 1 Вт встановленої потужності без зниження якості й надійності обладнання. Прийнято монокристалічні фотомодулі Trina Solar TSM-575-DE19 потужністю 575 Вт, трифазні інвертори SolaX, акумуляторні батареї системи накопичення енергії, систему дахового кріплення та контролери управління потужністю. Об’єкт розташований у м. Кропивницький; розроблену схему розміщення фотоелектричних модулів (ФЕМ) на покрівлях виробничих будівель наведено на рис. 1, а отримані розрахункові показники станції – у табл. 1.

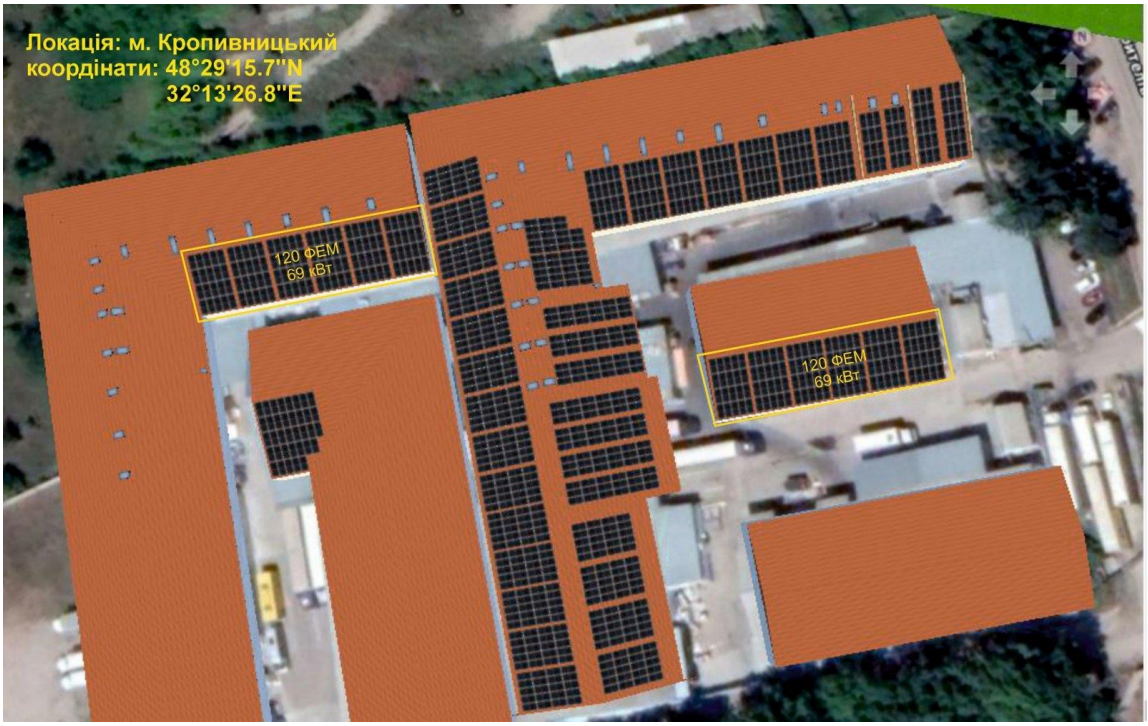


Рис. 1. Схема розміщення фотоелектричних модулів на покрівлях існуючих будівель

Таблиця 1 – Основні техніко-енергетичні показники СЕС

Показник	Значення
Встановлена потужність інверторного обладнання, кВт	400,0
Потужність масиву фотомодулів, кВт	571,55
Площа масиву фотомодулів, м²	2687,23
Глобальна іррадіація, кВт·год/м²	1285,45
Річне вироблення електроенергії, кВт·год/рік	666 171
Питома продуктивність, кВт·год/кВт	1165,41
Коефіцієнт ефективності (PR), %	89,7
Втрати від затінення, %	2,3
Річне споживання об'єкта, кВт·год/рік	6 225 078
Рівень самозабезпечення, %	10,7
Скорочення викидів CO_2, т/рік	313,1

Досліджено енергетичні показники станції та встановлено, що при глобальній іррадіації 1285 кВт·год/м² СЕС забезпечує річне вироблення понад 676 тис. кВт·год за питомої продуктивності 1165 кВт·год/кВт. Отриманий коефіцієнт ефективності на рівні 89,7 % і втрати від затінення лише 2,3 % підтверджують раціональність розробленої схеми розміщення фотомодулів. Проаналізовано співвідношення потужності масиву фотомодулів (571,55 кВт) і інверторів (400 кВт), яке становить близько 1,43; таке перевищення дозволяє збільшити вироблення в ранкові та вечірні години й у похмурі дні, коли інвертори працюють з неповним навантаженням .

Досліджено помісячний розподіл вироблення електроенергії (рис. 2). Встановлено, що максимальне вироблення припадає на червень – липень (93,8 – 94,9 тис. кВт·год), мінімальне – на грудень (13,7 тис. кВт·год). Отримано, що частка покриття власного споживання змінюється від 2,6 % у грудні до 18,3 % у червні, а за період квітень – вересень СЕС виробляє близько 74 % річного обсягу електроенергії.

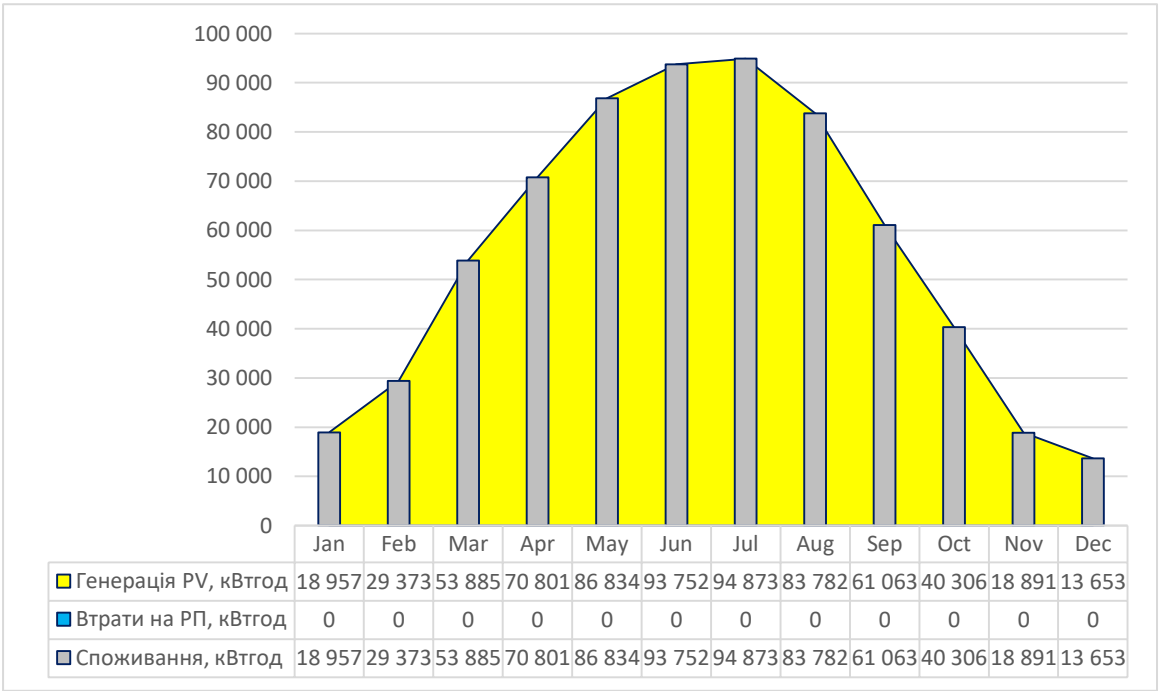


Рис. 2. Помісячне вироблення електроенергії СЕС, тис. кВт·год

Отримано, що з кожного квадратного метра задіяної покрівлі станція виробляє близько 248 кВт·год електроенергії на рік. Проаналізовано енергетичний баланс об'єкта: уся вироблена енергія використовується для покриття власних потреб, тобто надлишків, що передаються в мережу, не виникає. Тому система накопичення енергії використовується насамперед для резервування живлення та зниження пікових навантажень, а не для накопичення надлишків генерації. При річному споживанні 6,23 млн кВт·год рівень самозабезпечення становить 10,7 %, а обсяг електроенергії, що купується із зовнішньої мережі, зменшується до 5,56 млн кВт·год на рік. Отриманий екологічний ефект полягає у скороченні викидів CO_2 на 313 т щороку.

Проаналізовано будівельну складову проєкту, ключовою вимогою якої є забезпечення несучої здатності покрівлі. Масив фотомодулів площею понад 2,6 тис. м² разом із системою кріплення створює додаткове постійне навантаження, а також змінює снігові та вітрові навантаження на покрівлю. Розроблено рекомендації щодо підготовки до монтажу: виконання обстеження конструкцій та перевірочних розрахунків відповідно до ДБН В.1.2-2:2006 [4], застосування кріплення, яке не порушує гідроізоляційного шару покрівлі, а також урахування орієнтації, кута нахилу модулів і затінення від надбудов і сусідніх споруд.

Висновки. У роботі проаналізовано умови застосування мережевих сонячних фотоелектричних станцій на покрівлях існуючих будівель і встановлено, що вони є ефективним енергозберігаючим рішенням у цивільному будівництві, оскільки не потребують додаткових земельних ділянок. Обґрунтовано доцільність доповнення СЕС системою накопичення енергії на базі акумуляторних батарей, що підвищує надійність електропостачання об'єкта в умовах відключень зовнішньої мережі. Розроблено технічне рішення розміщення СЕС потужністю 400 кВт на покрівлях виробничих будівель. Досліджено річний та помісячний режими вироблення електроенергії й отримано, що станція виробляє 676 тис. кВт·год на рік, покриває 10,7 % власних потреб об'єкта та скорочує викиди CO_2 на 313 т/рік. Отримані результати свідчать, що для подальшого підвищення рівня самозабезпечення доцільно поєднувати впровадження СЕС із заходами з термомодернізації будівель і зниження власного енергоспоживання, а обов'язковою умовою реалізації таких проєктів є перевірка несучої здатності покрівельних конструкцій.

Список використаних джерел

1. Про альтернативні джерела енергії : Закон України від 20.02.2003 № 555-IV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15 (дата звернення: 14.10.2026).

2. Про енергетичну ефективність будівель : Закон України від 22.06.2017 № 2118-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19 (дата звернення: 14.10.2026).

3. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» : Розпорядження

Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 № 605-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-р (дата звернення: 14.10.2026).

4. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. [Чинний від 2007-01-01]. Київ : Мінбуд України, 2006. 75 с.

УДК 697.1:628.4

Кравченко В.І.

Херсонський державний аграрно-економічний університет

ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ У БУДІВЛЯХ З ВИКОРИСТАННЯМ СТІЧНИХ ВОД

Вступ. Для забезпечення сприятливих умов всередині будинків витрачається значна частина енергоресурсів, які переважно базуються на традиційних імпортованих викопних видах палива і цим спричинюють значну частку викидів шкідливих та парникових газів у довкілля. Визначено, що на сьогодні на долю енергозабезпечення будівель загалом припадає майже 20 % загального рівня викидів парникових газів [1].

Ефективним методом економії паливно-енергетичних ресурсів вважається використання вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР). При класифікації ВЕР окрім паливних, теплових та ВЕР надлишкового тиску розрізняють енергетичні ресурси низького потенціалу, зокрема стічні води. В побутових, промислових або комерційних будівлях вони містять значну кількість теплової енергії, яка скидається в каналізаційну систему з температурою від 10 до 25°С. Приблизно 40% тепла, що виробляється в житлових будинках населених пунктів, втрачається в каналізації [2].

Основна частина. Стічні води можуть виступати як ефективне джерело для рекуперації теплоти, оскільки мають більш високу температуру взимку, і, відповідно, холоднішу влітку ніж температура навколишнього повітря.

Системи рекуперації тепла стічних вод можуть використовуватися в окремих будинках та житлових приміщеннях, а також у нежитлових приміщеннях з більшим споживанням гарячої. На відміну від сонячних технологій, ефективність яких залежить від коливань інтенсивності сонячного випромінювання, потенціал рекуперації побутових стічних вод є відносно постійним протягом року. Це можна вважати перевагою такого підходу, особливо в зимові місяці, коли попит на тепло найвищий.

Здатність правильно вибрати тип технології для рекуперації тепла стічних вод у будівлі підвищує ефективність їх рекуперації, а також потенціал для зменшення споживання енергії та викидів парникових газів. На рівні житлових будівель, через невеликі обсяги стічних вод, добові коливання та високі економічні витрати, а також у нежитлових будівлях найбільш доцільніше використовувати теплообмінники. Це пасивна технологія, яка не потребує жодного зовнішнього джерела енергії.

Існує кілька місць, де гаряча вода використовується в будівлях, включаючи душові, ванни, пральні машини, раковини, посудомийні машини тощо. У лікарнях, промислових будівлях, басейнах тощо стічні води мають значну кількість та постійну швидкістю потоку [3].

На сьогодні достатньо ефективно можуть бути залучені такі типи теплообмінників: плівковий трубчастий випарник, концентричні труби, пластини, кожухотрубний резервуар (рис. 1).

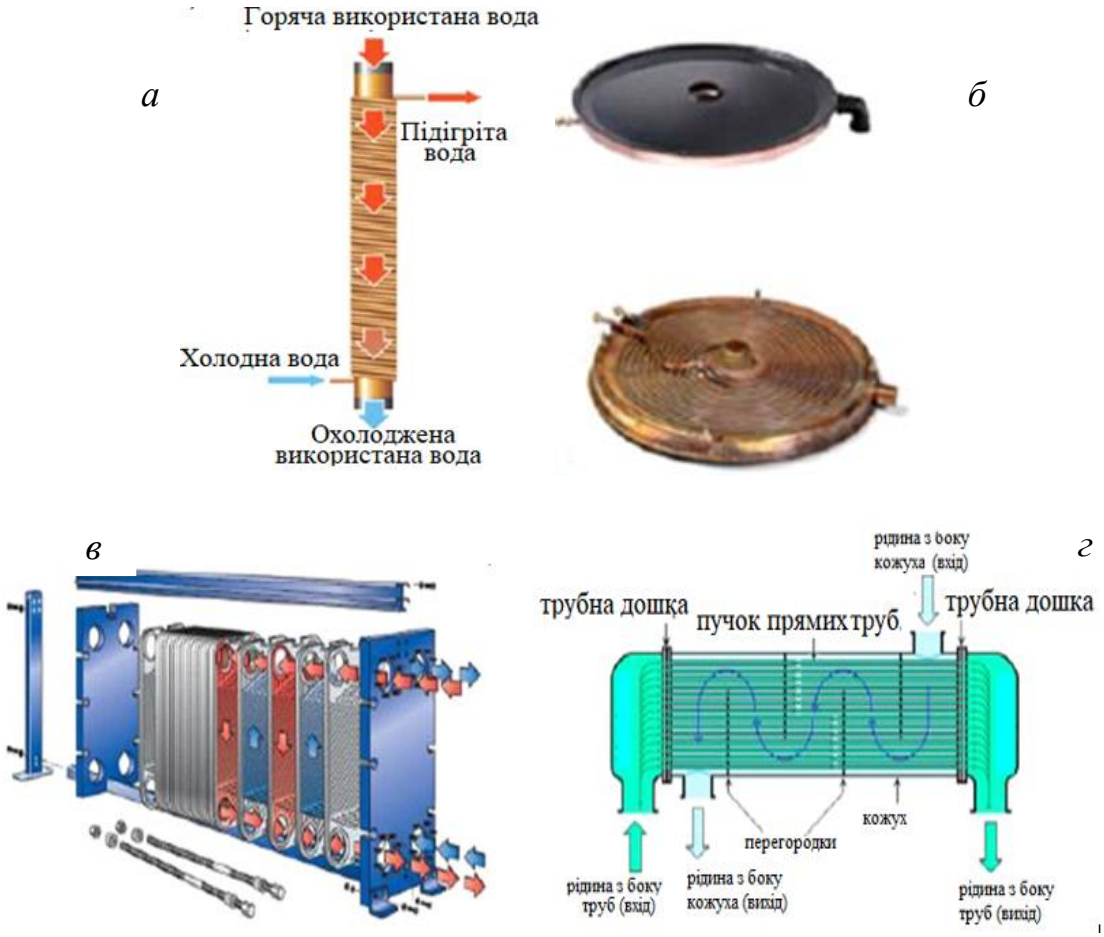


Рисунок 1 – Теплообмінники для побутового використання: а) плівковий; б) спіральний, інтегрований у душовий піддон; в) пластинчастий; г) кожухотрубний

Одним із способів використання тепла стічних вод є встановлення теплообмінників на стояках каналізації. Цей спосіб ефективний при його застосування в житлових будівлях, пансіонатах, готелях, гуртожитках, медичних закладах, спортивних спорудах тощо. Використання тепла стічних вод усередині будинку може здійснюватися для попереднього підігріву холодної води без застосування теплових насосів. Для цієї мети може використовуватися теплообмінник, показаний на рисунку 1 а.

Доцільним може бути варіант застосування душового піддону з інтегрованим теплообмінником (1б). Така система може бути розроблена для підтримки нормальної висоти душового піддону та забезпечення максимальної

продуктивності теплообмінника. Стічні води стікають у закруглену мідну пластину. Під мідною пластиною встановлений мідний теплообмінник у формі спіралі. Холодна вода, яка заповнює теплообмінник, попередньо нагрівається гарячими стічними водами, що обтікають теплообмінник. Такий тип теплообмінників рекомендується встановлювати в будинках, басейнах, спортзалах, туалетах тощо.

Вибір теплообмінника визначається забрудненням потоку. Таким чином, для рідин з низьким вмістом твердих частинок використовуються пластинчасті та кожухотрубні теплообмінники (рис. 1 в, г), що відрізняються більш інтенсивним теплообміном.

Окрім душових систем, тепло стічних вод можна рекуперувати з інших компонентів, таких як посудомийні та пральні машини. Ці компоненти скидають стічні води при досить високих температурах; наприклад, температура води на виході для типової побутової посудомийної машини коливається від 19°C до 61°C залежно від етапу миття. Посудомийні машини на промислових кухнях та пральні машини у пральнях, використовують велику кількість гарячої води, тому можуть мати значний потенціал для рекуперації тепла від стічних вод.

Окрім душових кабін, посудомийних машин або пральних машин, у побутових, комерційних та промислових приміщеннях існує безліч інших компонентів, що генерують гарячі стічні води, наприклад, раковини в перукарнях, басейни/спа-центри, харчова промисловість тощо.

Висновки. Сьогодні існує потреба в інноваційних технологіях, що використовують енергію стічних вод для теплозабезпечення систем водопостачання та водовідведення.

Системи рекуперації тепла стічних вод із запропонованими теплообмінниками доцільно використовуватися у системах водопостачання в житлових та нежитлових приміщеннях будинків.

Список використаних джерел

1. Climate Change 2014:Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the IPCC 5th Assessment Report Changes to the underlying Scientific/Technical Assessment .URL: http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/

2. Єфремова О.О. Оцінка енергетичного потенціалу стічних вод в Україні // Вісник Хмельницького національного університету. – 2023. – №2(307). – С. 45–52.

3. R. Pintér, A. Vessey, O. Tisso, White Paper, Role of Wastewater Heat Recovery in Decarbonising European Buildings,WWHR Europe, Cu0270, 2. of Households Energy Consumption Patterns Across the EU, 2022. Available at: https://www.enerdata.net/publications/executive-briefing/households-energy-efficiency.

621.382.2/.3

Литвиненко В.М.
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

РОЗРОБКА ПОПЕРЕДЖУВАЛЬНОГО РЕЛЕ ЧАСУ ДЛЯ ПОБУТОВИХ МЕРЕЖ

Вступ. Реле часу має елементарне призначення – увімкнення або вимкнення лінії фазового провідника з перебігом заданого проміжку часу. Тобто людина налаштовує реле на час роботи, через яке воно має розімкнути електричний ланцюг і йде. Після закінчення часу реле розмикає ланцюг, внаслідок чого відключається прилад, який підключений до лінії, керованої цим реле. Це може бути зроблено з метою економії електроенергії і водночас через непотрібність роботи приладу після певного періоду його роботи. Принцип роботи реле часу полягає в тому, що блок управління реле є електронним таймером, що налаштовується вручну і який із закінченням заданого часу дає сигнал виконавчому механізму, який і розмикає ланцюг [1]. При експлуатації різних електричних пристроїв, що живляться від мережі змінного струму, дуже корисно передбачити їхнє автоматичне вимкнення за допомогою реле часу. Це виключає зайву витрату електроенергії та зменшує ймовірність виникнення пожежі, якщо увімкнений пристрій залишився без нагляду.

Основна частина. На рис. 1 наведено принципову схему розробленого реле часу.

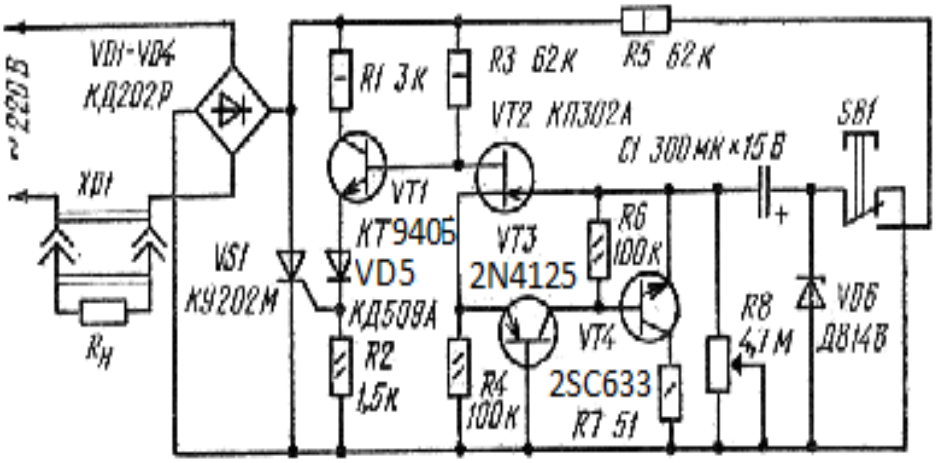


Рис. 1. Принципова схема реле часу

Розроблене реле часу відрізняється від відомих наявністю в ньому позитивного зворотного зв'язку у вузлі, який задає час спрацювання, що сприяє швидкому вимиканню пристрою навіть при великих витримках часу, що особливо необхідно для трансформаторних блоків живлення апаратури [2, 3].

Розраховано на підключення до нього споживачів електроенергії потужністю не більше 1000 Вт. У вихідному стані реле споживає потужність близько 1 Вт і дозволяє встановлювати витримку часу вимикання в межах 0...30 хв. Безконтактне вимикання підвищує надійність та довговічність конструкції, а відсутність блоку живлення знижує її масу та розміри. Реле часу (рис. 1) містить випрямний міст на діодах VD1 - VD4, тиристор VS1, електронний ключ VT1 і вузол, що задає час, на транзисторах VT2 - VT4. У вихідному стані, поки кнопка SB1 не натиснута, конденсатор C1 розряджений, транзистори VT2 - VT4 відкриті, транзистор VT1 і тиристор VS1 закриті. У цей час через навантажувальний пристрій $R_н$, підключений до гнізда XP1, струм не протікає. При натисканні кнопки SB1 через резистор R5 і p-n переходи транзисторів VT2, VT3 заряджається конденсатор C1 до напруги стабілізації стабілітрона VD6. При цьому транзистори VT1 - VT4 та тиристор VS1 знаходяться у вихідному стані. Після відпускання кнопки SB1 виведення позитивної обкладки конденсатора знову з'єднується із загальним ланцюгом реле часу і на затворі польового транзистора VT2 виникає негативна напруга. Транзистор VT2 закривається і закриває транзистори VT3 і VT4. Одночасно струмом, що протікає через резистор R3, відкривається транзистор VT1, який своїм колекторним струмом відкриває тиристор VS1. При відкритому транзисторі VT1 тиристор відкривається на початку кожного напівперіоду мережевої напруги, пропускаючи номінальний струм через підключений пристрій. Після розрядки конденсатора C1 (через резистор R8) до напруги 5В, що відповідає напрузі відсічки транзистора VT2, цей транзистор відкривається, що призводить до відкривання транзисторів VT3 і VT4, що утворюють для транзистора VT2 позитивний зворотний зв'язок. Тепер конденсатор C1 швидко розряджається через малий опір відкритого транзистора VT4 і резистор R7, в результаті транзистор VT2 повністю відкривається. При цьому транзистор VT1 і тиристор закриваються, а навантажувальний пристрій $R_н$ знеструмлюється - реле часу встановлюється у вихідний стан. Діод VD5 покращує режим закриття транзистора VT1 і, крім того, дозволяє використовувати польовий транзистор VT2 з меншим струмом стоку, наприклад КП307. Використовуючи конденсатор C1 ємністю 1000мкФ, витримку часу на вимикання можна збільшити до 60 хв.

Висновки. Розроблено попереджувальне реле часу для побутових мереж. Пристрій має високу надійність та порівняно невисоку вартість.

Список використаних джерел

1. Схемотехніка: Пристрої цифрової електроніки: в 2 т. / В.М. Рябенький, В.Я. Жуйков, Ю.С. Ямненко, А.В. Заграничний. К.: НТУУ «КПІ», 2016. 757с.
2. Квітка С.О. Силові електронні пристрої в системах керування. Підручник. Мелітополь: Видавничо- поліграфічний центр «Люкс», 2021. 180с.
3. Електротехніка та основи електроніки. Підручник /А.М. Гуржій, С.К. Мещанінов, А.Т. Нельга, В.М. Співак. К.: Літера АТД, 2020. 288с.

УДК 627.8:004.9

Борисенко К. І.
к.т.н., доцент кафедри гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії
Херсонський державний аграрно-економічний університет, Херсон,
borysenko_k@ksaeu.kherson.ua

СУЧАСНІ МЕТОДИ ІНЖЕНЕРНИХ ВИШУКУВАНЬ ТА ЦИФРОВОГО ПРОЄКТУВАННЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД ПІД ЧАС ВІДНОВЛЕННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЇ

Вступ. Гідротехнічні споруди є важливими елементами водогосподарської та енергетичної інфраструктури, від технічного стану й надійності яких залежать функціонування систем водопостачання, зрошення, виробництво електроенергії та захист територій від затоплення. В умовах пошкодження інфраструктурних об’єктів унаслідок воєнних дій особливого значення набувають питання оцінювання їхнього фактичного технічного стану, обґрунтування проєктних рішень щодо відновлення та впровадження сучасних інженерних технологій. За результатими п’ятою оцінки завданої шкодти та потреб на відновлення України (RDNA5), підготовленою Світовим банком, Урядом України, Європейським Союзом та ООН, станом на 31.12.2025 прямі збитки становлять 195,1 млрд дол. США, а потреби у відновленні й відбудові на 2026–2035 рр. – 587,7 млрд дол. США [1, с. 16]. У секторі зрошення та водних ресурсів збитки оцінено у 0,9 млрд, а потреби – у 12,5 млрд дол. США; близько 85 % збитків припадає на гідравлічну інфраструктуру, а першочергові завдання охоплюють модернізацію державних зрошувальних систем і відновлення захисних гідротехнічних споруд уздовж дніпровських водосховищ [1, с. 33]. Під час оцінювання потреб у відновленні та відбудові у звіті RDNA5 враховано підхід Building Back Better (BBB) [11] - відновлення з підвищенням стійкості об'єктів та зменшення ризиків у майбутньому. Зокрема, під час визначення потреб у фінансуванні можуть враховуватися додаткові витрати на модернізацію, підвищення енергоефективності та забезпечення відповідності сучасним стандартам сталого розвитку [1, с. 4]. Реалізація зазначеного підходу потребує достовірної інформації про фактичний технічний стан гідротехнічних споруд. Водночас проведення традиційних інженерних обстежень пошкоджених об'єктів може ускладнюватися обмеженим доступом, небезпечними умовами виконання робіт та значною тривалістю досліджень. Це зумовлює необхідність застосування сучасних методів інженерних вишукувань, зокрема дистанційного отримання та цифрового опрацювання просторових даних.

Метою роботи є аналіз сучасних методів інженерних вишукувань і цифрового проєктування гідротехнічних споруд та визначення порядку їх застосування під час відновлення та модернізації.

Завдання: розглянути нормативні вимоги до класифікації споруд; порівняти методи збору даних про стан споруд; розглянути вплив просторової роздільної здатності зйомки з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) на виявлення дефектів; визначити роль технології інформаційного моделювання (BIM) у проєктуванні відновлення та модернізації.

Методи: нормативно-аналітичний і порівняльний аналіз, розрахунок роздільної здатності за фотограмметричною залежністю.

Основна частина. *Нормативні вимоги.* Основні положення проєктування гідротехнічних споруд, зокрема класифікацію гідротехнічних споруд за класами, встановлено державними будівельними нормами (ДБН) В.2.4-3:2010 [3]; клас наслідків (відповідальності) визначають окремо за ДБН В.1.2-14:2018, який встановлює й загальні принципи надійності та конструктивної безпеки [4].

Нормативно-організаційні засади впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні визначено Концепцією, схваленою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17.02.2021 № 152-р [5]. Концепція передбачала поетапне впровадження BIM-технологій у будівельну галузь, зокрема реалізацію пілотних проєктів із використанням державного фінансування. Подальший розвиток нормативно-правового регулювання BIM пов'язаний із законопроєктом № 6383, прийнятим Верховною Радою України за основу у 2022 році [6]. Основні принципи організації та управління інформацією протягом життєвого циклу будівель і інженерних споруд визначено міжнародним стандартом ISO 19650-1:2018 [8].

Сучасні методи вишукувань. Для обстеження наявних споруд з обмеженим доступом використовують БПЛА в поєднанні з методами комп’ютерного зору для тривимірної реконструкції. У дослідженні великої бетонної гравітаційної греблі Brighton Dam (штат Меріленд, США) за зображеннями 16 Мп з відстані близько 2,5 м побудовано тривимірні хмари точок, у яких розпізнано дефекти завширшки 1 і 3 мм; у разі використання зображень 4 Мп і нижче більшість дефектів не виявлялася, а вади завширшки 0,7 мм не відтворила жодна модель. Для верхніх ділянок греблі БПЛА забезпечив достатню роздільну здатність, а наземний сканер мав обмежений огляд із землі [9].

Таблиця 1 – Порівняння методів збору даних про стан гідротехнічних споруд

Метод	**Що дає**	**Обмеження**
Аерозйомка БПЛА	Хмара точок, ортофотоплан; видимі тріщини, деформації за повторних вимірювань [9]	Не охоплює підводні й приховані частини
Наземне лазерне сканування	Висока геометрична точність за відповідних обладнання, дальності та прив’язки	Затінення; обмежені точки встановлення на висоті [9]
Гідрографічна (ехолотна) зйомка	Рельєф дна верхнього та нижнього б’єфів (батиметричні дані)	Залежить від умов на водному об’єкті
Геофізика та буріння	Властивості основи, ознаки зон фільтрації та порожнин	Точкова інформація; роботи потребують часу

Потенційну деталізацію фотограмметричної реконструкції значною мірою обмежує розмір проєкції пікселя на поверхні споруди (GSD, ground sampling distance), який обчислюють за відомою фотограмметричною залежністю:

$$GSD = H \cdot p / f, \quad (1)$$

де H – відстань від камери до поверхні, м; p – розмір пікселя матриці, м; f – фокусна відстань об’єктива, м. За даними [9], при відстані близько 2,5 м один піксель відповідав приблизно 1 мм, а дефекти завширшки 1 мм розпізнано. У цьому прикладі GSD дорівнювала ширині дефекту, тому лише як припущення можна вважати, що GSD не повинна перевищувати ширину дефекту; запас для надійного виявлення потребує перевірки. За формулою (1) за незмінних камери й об’єктива GSD пропорційна відстані H: збільшення відстані з 2,5 до 5 м збільшить GSD з 1 до 2 мм, і дефекти завширшки 1 мм можуть не розпізнаватися (залежить і від контрасту, освітлення, алгоритму). Для висотних ділянок потрібна менша GSD: менший розмір пікселя, більша фокусна відстань або менша відстань зйомки.

Цифрове проєктування. На відміну від автоматизованого проєктування (CAD), що використовують для створення геометричних моделей і креслень, BIM формує інформаційну модель із даними про елементи об’єкта. За висновками аналізу в [10, с. 97–104], вона може підвищити якість робіт, зменшити витрати та підвищити безпеку під час відновлення будівельних об’єктів, пошкоджених воєнними діями. Бар’єрами впровадження BIM в Україні названо потребу в нових фахівцях і відсутність чітких правил взаємодії учасників проєкту. У країнах ЄС BIM застосовують і для наявних будівель та інженерних споруд; приклад реконструкції промислової будівлі в Литві (не гідротехнічного об’єкта) показує, що відсутня документація збільшує терміни й бюджет [10]. Для споруд I класу та класу наслідків CC3 автори [2, с. 92] вважають ключовим етапом реконструкції багаторівневу перевірку проєктних рішень: інженерно-геодезичні та геологічні вишукування, оцінку фільтраційної стійкості, аналіз аварійних сценаріїв, чисельне та фізичне моделювання водоскидних споруд і нижнього б’єфа.

Порядок робіт. На основі аналізу розглянутих джерел запропоновано узагальнену послідовність застосування сучасних методів інженерних вишукувань і цифрового проєктування під час відновлення гідротехнічних споруд (рис. 1). На першому етапі формують вихідні дані із використанням БПЛА, що дозволяє мінімізувати необхідність перебування фахівців у потенційно небезпечних зонах. На другому їх доповнюють методами наземного інженерного дослідження фахівцями лише там, де це необхідно. На третьому етапі дані вишукувань прив’язують до елементів моделі та інтегрують у цифрову інформаційну модель фактичного стану споруди. Четвертий етап відповідає розробці та перевірці проєктних рішень з урахуванням міцності, стійкості й фільтраційної безпеки конструкцій [2, с. 92]. Завершальним етапом є передавання інформаційної моделі для подальшої експлуатації та моніторингу технічного стану споруди..

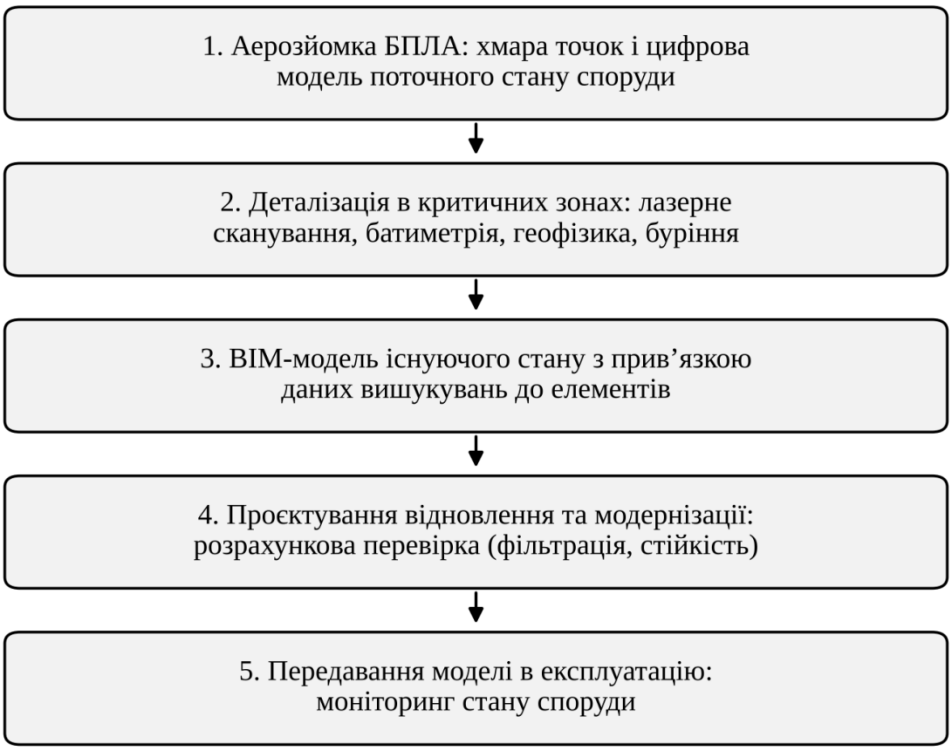


Рисунок 1 – Послідовність цифрових вишукувань і проєктування під час відновлення гідротехнічної споруди (узагальнення автора на основі джерел)

Висновки. 1. Відновлення гідротехнічних споруд, пошкоджених унаслідок воєнних дій, доцільно здійснювати з урахуванням принципу Building Back Better («Відбудувати краще, ніж було»), спрямованого на підвищення надійності та стійкості об'єктів до майбутніх ризиків. Обґрунтування проєктних рішень щодо відновлення та модернізації має ґрунтуватися на комплексному оцінюванні технічного стану споруд із застосуванням сучасних методів інженерних вишукувань і цифрового проєктування. 2. Для відповідальних споруд доцільно поєднувати БПЛА, лазерне сканування, геофізичні та геотехнічні методи, оскільки кожен метод має обмеження. 3. Можливість виявлення дефектів за знімками БПЛА значною мірою залежить від GSD: її доцільно підбирати не більшою за ширину шуканого дефекту (припущення за одним дослідженням), а при збільшенні відстані зйомки вдвічі вона зростає вдвічі. 4. Упровадження BIM у відновлення гідротехнічних споруд може створити умови для об'єднання даних вишукувань, розрахункових моделей, проєктних рішень та експлуатаційної інформації в єдиному інформаційному середовищі; джерело [10] стосується будівель, тож для гідротехнічних споруд це потребує підтвердження. 5. Потребують дослідження національні вимоги до цифрової моделі споруди та точності БПЛА-зйомки.

Список використаної літератури:

1. Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA5): February 2022 – December 2025 / World Bank, Government of Ukraine, European Union, United Nations. Washington, DC : World Bank, 2026. 76 p. URL: https://www.undp.org/ukraine/publications/ukraine-fifth-rapid-damage-and-needs-assessment-rdna5-february-2022-december-2025

2. Середа В.В., Стрепетова Х.В. Інженерні аспекти відновлення Каховської ГЕС у контексті повоєнної реконструкції гідротехнічних споруд. Сучасні технології та досягнення інженерних наук в галузі гідротехнічного будівництва та водної інженерії : зб. наук. праць. 8-й вип. Кропивницький ; Херсон : ХДАЕУ, 2026. С. 90–94.

3. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні споруди. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. (Накази Мінрегіонбуду від 11.01.2010 № 1 та від 29.07.2010 № 287; чинний з 01.01.2011).

4. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Київ : Мінрегіон України, 2018.

5. Про схвалення Концепції впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні та затвердження плану заходів з її реалізації : розпорядження Кабінету Міністрів України від 17.02.2021 № 152-р.

6. Олексій Чернишов: ВР прийняла у першому читанні законопроєкт щодо впровадження BIM-технологій у будівництві. Урядовий портал. 08.07.2022. URL: https://www.kmu.gov.ua/news/oleksii-chernyshov-vr-pryiniala-u-pershomu-chytanni-zakonoproekt-shchodo-vprovadzhennia-bim-tekhnolohii-u-budivnytstvi (дата звернення: 14.10.2026).

7. Нові правила для забудовників: закон про BIM виходить на фінішну пряму / Т. Науменко. Mind.ua. 30.07.2026. URL: https://mind.ua/news/20308129-novi-pravila-dlya-zabudovnikiv-zakon-pro-bim-vihodit-na-finishnu-pryamu

8. ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles. Geneva : ISO, 2018.

9. Khaloo A., Lattanzi D., Jachimowicz A., Devaney C. Utilizing UAV and 3D Computer Vision for Visual Inspection of a Large Gravity Dam. Frontiers in Built Environment. 2018. Vol. 4. Art. 31. DOI: 10.3389/fbuil.2018.00031.

10. Hudyma L. O. BIM-Technologies in Construction: Modern Challenges for Ukraine. Бізнес Інформ. 2024. № 2. С. 97–104. DOI: 10.32983/2222-4459-2024-2-97-104.

11. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). Build Back Better. Sendai Framework Terminology on Disaster Risk Reduction. 2017. URL: https://www.undrr.org/terminology/build-back-better

12. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. Geneva : UNDRR, 2015. 32 p. URL: https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030

УДК 556.167:628.1(477.8)

Коваленко Р. Ю.,
к.т.н., доцент кафедри гідротехнічного будівництва,
водної та електричної інженерії
Херсонський державний аграрно-економічний університет, Херсон
kovalenko_r@ksaeu.kherson.ua

ОЦІНКА МАЛОВОДДЯ В БАСЕЙНІ ДНІСТРА ТА ЙОГО ВОДОГОСПОДАРСЬКИХ НАСЛІДКІВ

Вступ. Гідрологічна посуха є суттєвим чинником ризику для водозабезпечення населення, функціонування гідротехнічних споруд та збереження річкових екосистем. Особливу увагу привертає басейн Дністра, водні ресурси якого використовуються для питних, господарських і гідроенергетичних потреб в Україні та Молдові. У 2026 році в басейні спостерігалося тривале екстремальне маловоддя, що супроводжувалося зменшенням річкового стоку, спрацюванням запасів Дністровського водосховища й ускладненнями в роботі водозабірних споруд [1–3]. Метою роботи є оцінювання природних передумов та масштабів маловоддя Дністра у 2026 році, а також аналіз його наслідків для водопостачання та регулювання водосховища.

Основна частина. Інформаційною основою дослідження слугували відкриті оперативні матеріали Українського гідрометеорологічного центру, Державного агентства водних ресурсів України, Міністерства економіки та довкілля України, Басейнового управління водних ресурсів річок Прут та Сірет [1–5]. У роботі застосовано методи аналізу та узагальнення гідрологічних даних, а також порівняльний аналіз показників водності Дністра у вересні 2026 року на гідрологічних постах Самбір, Галич і Заліщики. На основі оприлюднених даних розраховано відхилення водності від відповідних багаторічних середньомісячних норм. Окрему увагу приділено аналізу водогосподарських наслідків маловоддя, зокрема особливостей експлуатації Дністровського водосховища та функціонування систем водопостачання окремих населених пунктів.

За даними Укргідрометцентру, маловоддя в басейні Дністра почало формуватися із середини травня 2026 року на тлі слабовираженого весняного водопілля та тривалого дефіциту атмосферних опадів. За січень–серпень у басейні річки випало 325 мм опадів, що становило 63 % кліматичної норми, а в червні–серпні їхня кількість становила близько 62 % норми [1]. Недостатнє атмосферне зволоження в поєднанні зі слабким весняним водопіллям сприяло зменшенню річкового стоку. У червні–липні водність Дністра на гідрологічних постах Самбір, Галич і Заліщики становила лише 9–19 % відповідних місячних норм [1].

Подальше зниження водності спостерігалося у вересні 2026 року, коли, згідно з оперативною оцінкою Укргідрометцентру, маловоддя за основним

критерієм фіксувалося в усіх трьох досліджених створах Дністра. Результати порівняння наведено в табл. 1 та на рис. 1.

Таблиця 1. Водність Дністра та її зниження відносно багаторічної місячної норми у вересні

Гідрологічний пост	Водність, % норми	Зниження відносно норми, в. п.
Самбір	6	94
Галич	14	86
Заліщики	12	88

Джерело: водність — [1]; дефіцит обчислено автором.

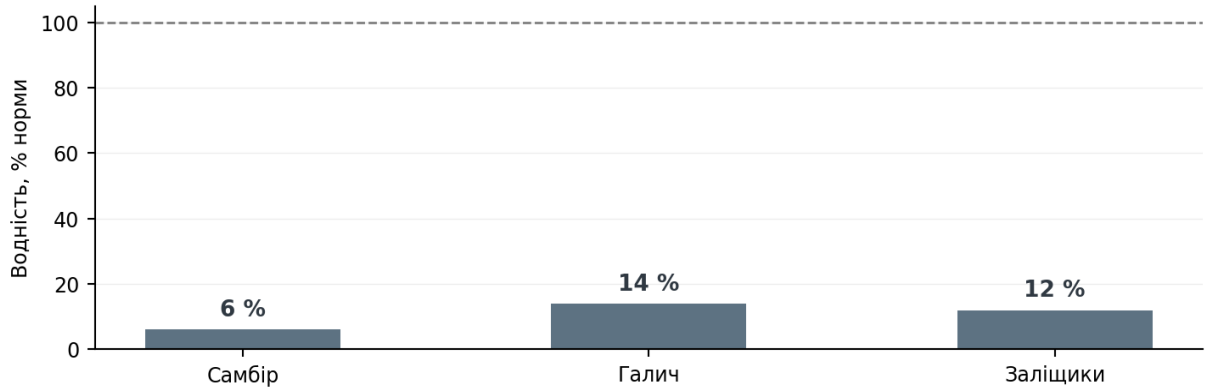


Рис. 1. Порівняння водності Дністра у вересні 2026 року з багаторічною місячною нормою [1]

За результатами проведеного аналізу встановлено, що у вересні 2026 року водність Дністра на досліджених гідрологічних постах становила лише 6–14 % відповідних місячних норм. Найбільше відносне зниження водності спостерігалося у створі Самбір, де відхилення від норми становило 94 відсоткові пункти. При цьому відносні показники водності не слід ототожнювати з абсолютними витратами води, оскільки для кожного гідрологічного поста характерні власні багаторічні норми. Додатковим свідченням несприятливої гідрологічної ситуації є те, що у вересні витрати води на постах Галич і Заліщики становили відповідно 80 % та 71 % розрахункової екологічної витрати [1].

Значне зниження водності Дністра вплинуло також на режим експлуатації Дністровського водосховища. За інформацією Держводагентства, починаючи з 30 квітня 2026 року протягом тривалого періоду середньодобовий приплив води до водосховища був нижчим за скидні витрати. Унаслідок цього відбувалося поступове зменшення запасів води, а рівень водосховища лише за місяць знизився більш як на один метр і станом на 15 вересня становив 111,35 м [2]. За даними Міністерства економіки та довкілля України, 17 і 20 вересня середньодобовий приплив скоротився до 24 м³/с, або 11 % норми, що стало найменшим показником за період експлуатації водосховища [3]. За таких умов особливого значення набуває узгодження режимів роботи гідровузла з

урахуванням обмеженого природного припливу, необхідності збереження запасів води та забезпечення потреб водокористувачів нижче за течією.

Критичне маловоддя створило додаткові ризики для стабільного функціонування систем водопостачання окремих населених пунктів. Держводагентство повідомляло про загрозу роботі питних водозаборів Хотина та Кам'янця-Подільського через зниження рівня води у Дністровському водосховищі [2]. Наприкінці вересня Міністерство економіки та довкілля України відзначило погодинну подачу води в Чернівцях і Новодністровську, а також ускладнення експлуатації водозабору в Хотині [3]. У зв'язку з критично низькою водністю Держводагентство запровадило з 7 до 15 жовтня тимчасові обмеження спеціального водокористування для окремих водокористувачів, які не поширювалися на забір води для питних потреб населення [4]. За інформацією Басейнового управління водних ресурсів річок Прут та Сірет, станом на 7 жовтня водність Дністра в межах відповідної зони спостережень становила лише 12 % норми [5].

Наведені дані свідчать про суттєві водогосподарські наслідки маловоддя, що проявилися в ускладненні регулювання Дністровського водосховища та створенні ризиків для роботи водозабірних споруд. Водночас використані показники характеризують різні часові періоди, а наявні оперативні дані не дають змоги виконати детальний розрахунок водного балансу водосховища або кількісно визначити вплив окремих чинників на перебої водопостачання. Подальше дослідження цих питань потребує аналізу добових рядів припливу, попусків і рівнів води, а також експлуатаційних показників систем водопостачання.

Висновки. Проведений аналіз засвідчив, що у 2026 році в басейні Дністра сформувалося виражене гідрологічне маловоддя, основними природними передумовами якого стали слабке весняне водопілля та тривалий дефіцит атмосферних опадів. За результатами порівняльного аналізу встановлено, що у вересні водність Дністра на гідрологічних постах Самбір, Галич і Заліщики становила лише 6–14 % відповідних багаторічних місячних норм, що відповідає зниженню на 86–94 відсоткові пункти. Скорочення природного припливу до Дністровського водосховища супроводжувалося зменшенням його водних запасів та ускладненням регулювання водного режиму. Критичне маловоддя створило додаткові ризики для функціонування питних водозаборів і стабільного водопостачання окремих населених пунктів. Для підвищення стійкості водогосподарських систем до подібних явищ доцільно вдосконалювати моніторинг водності, узгоджувати режими роботи гідротехнічних споруд з екологічними та господарськими потребами, а також передбачати резервні джерела водопостачання. Подальші дослідження доцільно спрямувати на аналіз добових показників припливу, попусків і рівнів води для оцінювання водогосподарського балансу Дністровського водосховища.

Список використаних джерел

1. Український гідрометеорологічний центр. Оцінка водності основних річок України з метою оцінювання настання (ймовірності настання)

маловоддя за вересень 2026 р. Маловоддя. URL: https://www.meteo.gov.ua/ua/Malovoddya (дата звернення: 02.10.2026).
2. Державне агентство водних ресурсів України. Маловоддя в Україні: Держводагентство вживає заходів. 15.09.2026. URL: https://davr.gov.ua/news/malovoddya-v-ukraini-derzhvodagentstvo-vzhivaye-zahodiv (дата звернення: 12.10.2026).
3. Міністерство економіки та довкілля України. Водність Дністра залишається критично низькою: Україна та Молдова продовжать координувати спільні дії. 30.09.2026. URL: https://www.me.gov.ua/News/Detail/15dedbd1-6266-427b-95fa-6bee56ddf4e7 (дата звернення: 12.10.2026).
4. Державне агентство водних ресурсів України. Держводагентство встановлює тимчасові обмеження водокористування. 07.10.2026. URL: https://www.davr.gov.ua/news/derzhvodagentstvo-vstanovlyuye-timchasovi-obmezhennya-vodokoristuvannya0726 (дата звернення: 12.10.2026).
5. Басейнове управління водних ресурсів річок Прут та Сірет. Інформуємо. 08.10.2026. URL: https://dpbuvr.gov.ua/informuyemo-2/ (дата звернення: 12.10.2026).

УДК 631.67:631.432

Казмірчук А.С.
здобувач третього рівня вищої освіти за спеціальністю “Агрономія”,
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

Кузьмич Л.В.
д.т.н., професор кафедри гідротехнічного будівництва,
водної та електричної інженерії
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

ОПТИМІЗАЦІЯ ВОДНОГО РЕЖИМУ МЕЛІОРОВАНИХ ҐРУНТІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ СТІЙКОСТІ АГРОЕКОСИСТЕМ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

Вступ. Сучасні глобальні та регіональні кліматичні зміни супроводжуються стрімким зростанням середньорічної температури повітря, перерозподілом опадів за сезонами, збільшенням частоти, тривалості та інтенсивності посух, а також виникненням екстремальних гідрометеорологічних явищ. Для аграрного сектору України, зокрема зон Недостатнього та Нестійкого зволоження, ці процеси становлять пряму загрозу продовольчій безпеці. Традиційні підходи до ведення сільського господарства в умовах прогресуючого дефіциту природної вологозабезпеченості втрачають свою ефективність, що зумовлює критичну необхідність переосмислення стратегій меліоративного управління територіями. Оптимізація водного режиму меліорованих ґрунтів є ключовим інструментом, здатним забезпечити сталу продуктивність агроценозів, одночасно мінімізуючи антропогенне

навантаження на навколишнє природне середовище та підтримуючи екологічну стійкість вразливих екосистем.

Існуючий меліоративний комплекс України, спроєктований у другій половині XX століття, потребує радикальної модернізації та адаптації до нових кліматичних реалій. Більшість систем працюють за застарілими технологічними схемами, що призводить до значних втрат води при транспортуванні, нерівномірного зволоження та локального погіршення екологічного стану земель. В умовах дефіциту водних ресурсів першочерговим завданням стає перехід від концепції максимального нарощування обсягів штучного зволоження або форсованого відведення надлишку вод до стратегії прецизійного, ресурсоощадного керування вологозапасами ґрунту.

Основний текст. В основі оптимізації водного режиму лежить системний підхід, який розглядає меліороване поле як цілісну, динамічну систему «ґрунт - рослина - атмосфера - підземні води». Головною метою регулювання є підтримка вологості кореневмісного шару ґрунту в межах оптимального діапазону, що забезпечує максимальну інтенсивність фотосинтезу та транспірації при найменших витратах поливної води на фізичне випаровування.

Методологія сучасного управління водним балансом базується на застосуванні математичного та цифрового моделювання, зокрема програмних комплексів типу CropWat, AquaCrop, Hydrus та ін. Ці інструменти дозволяють у режимі реального часу розраховувати показники сумарного випаровування, прогнозувати динаміку вологозапасів та оперативно коригувати строки і норми поливів чи скидання води. Важливим елементом методології є врахування капілярного підживлення з боку ґрунтових вод, що дає змогу суттєво скоротити обсяги штучного зрошення в регіонах із близьким заляганням водоносних горизонтів.

Невід'ємною складовою оптимізації є автоматизація процесів на основі концепції «розумного зрошення». Вона передбачає інтеграцію польових IoT-датчиків вологості ґрунту, автоматичних метеостанцій та даних дистанційного зондування Землі з супутників Sentinel чи Landsat. Аналіз вегетаційних індексів NDVI, NDWI та індексів водного стресу рослин дозволяє реалізувати диференційований підхід, за якого вода подається саме на ті ділянки поля, які цього найбільше потребують, та в строго необхідній кількості. Додатково впроваджуються технології використання альтернативних джерел води, включаючи очищені зворотні тваринницькі та комунальні стічні води, що знижує навантаження на природні питні та відкриті водойми.

Для зон Полісся та Лісостепу характерним наслідком глобального потепління є катастрофічне зниження рівня ґрунтових вод у літній період. У цих умовах класичні осушувальні системи, що працюють виключно на відведення води, поглиблюють деградацію ландшафтів та призводять до висушування орного шару. Стратегічним рішенням є повна трансформація осушувальних систем у системи двобічної дії з можливістю шлюзування та інверсійного регулювання. Технологія передбачає затримання та акумуляцію весняного поверхневого стоку в магістральних каналах та спеціальних руслових водосховищах. У засушливі періоди літа затримані об'єми води

використовуються для штучного підживлення ґрунтових вод через мережу дрен або каналів.

Інтенсивне штучне зволоження несе в собі серйозні ризики розвитку негативних ґрунтово-екологічних процесів. Надмірні або безсистемні поливи мінералізованими водами викликають вторинне засолення та осолонцювання ґрунтів, що руйнує їхню структуру та робить непридатними для вирощування більшості культур. Оптимізація водного режиму передбачає жорсткий моніторинг якості поливних вод, застосування хімічних меліорантів та періодичне проведення промивних поливів для вимивання солей за межі кореневмісного шару.

Висновки. Оптимізація водного режиму меліорованих ґрунтів у сучасних кліматичних умовах України є комплексною мультидисциплінарною проблемою, вирішення якої лежить на стику гідротехніки, агрономії, екології та цифрових технологій. Перехід до адаптивного, прецизійного управління водними ресурсами є єдиним можливим шляхом збереження високої врожайності сільськогосподарських культур без незворотної руйнації ґрунтового покриву.

УДК 628.1:502.3

Волошин М.М.
Завідувач кафедри, к.т.н., доцент
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон
Кльоб С.К.
Здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ В УМОВАХ СУЧАСНИХ ВИКЛИКІВ

Вступ. Надійне водопостачання є однією з основних передумов громадського здоров'я, санітарної безпеки та сталого розвитку населених пунктів. Водопровідна інфраструктура забезпечує потреби населення, соціальних закладів, промислових підприємств і комунального господарства. Водночас багато систем експлуатуються тривалий час, мають зношені трубопроводи, застаріле насосне обладнання та недостатній рівень автоматизованого контролю. Додатковими чинниками ризику є перебої електропостачання, аварійні пошкодження мереж, сезонні коливання водоспоживання та необхідність підтримувати належну якість питної води.

За таких умов модернізація має бути спрямована не лише на заміну окремих елементів, а й на підвищення стійкості всієї системи. Для цього важливо оцінювати технічний стан споруд, визначати найбільш критичні ділянки, зменшувати втрати води, оптимізувати енергоспоживання та забезпечувати можливість оперативного виявлення несправностей.

Мета роботи - узагальнити технічні й організаційні заходи, що сприяють підвищенню надійності систем водопостачання населених пунктів, і визначити показники для оцінювання результативності їх упровадження.

Основна частина. Система водопостачання є взаємопов'язаним комплексом джерела води, водозабірних споруд, насосних станцій, установок водопідготовки, резервуарів, магістральних і розподільних мереж. Порушення роботи одного елемента може впливати на якість, обсяг і безперервність подачі води споживачам. Тому першочерговим етапом модернізації має бути комплексне обстеження інфраструктури. Воно передбачає аналіз аварійності, вивчення схем мереж, перевірку стану арматури й насосів, оцінювання втрат води та зіставлення фактичного енергоспоживання з обсягом поданої води.

Одним із найважливіших завдань є скорочення втрат води. Витоки спричиняють не лише втрату ресурсу, а й додаткові витрати на його забір, очищення та транспортування. За певних умов падіння тиску може підвищувати ризик потрапляння забруднень у трубопровід через негерметичні з'єднання. Для виявлення проблемних ділянок доцільно використовувати зонування мережі, контроль витрат у нічний період, встановлення витратомірів і датчиків тиску, акустичну діагностику витоків та систематичний облік аварій. Результати такого моніторингу допомагають визначати, які трубопроводи потрібно ремонтувати або замінювати першочергово.

Вибір матеріалів і способу ремонту має враховувати робочий тиск, діаметр труб, властивості ґрунту, умови прокладання, доступність ділянки та очікуваний строк експлуатації. Заміна труб без аналізу гідравлічного режиму не завжди забезпечує очікуваний ефект. Після ремонту важливо виконувати випробування, промивання та, за необхідності, дезінфекцію ділянки згідно з чинними вимогами. Це допомагає знизити ймовірність повторних аварій і зберегти якість води.

Другим напрямом є підвищення енергоефективності насосних станцій. Значна частина електроенергії у системах водопостачання витрачається на підйом і транспортування води. Якщо насос працює не в оптимальному режимі, виникають надлишковий тиск, зайві витрати електроенергії та прискорене зношення обладнання. Застосування частотно-регульованих приводів дає змогу коригувати продуктивність насосів відповідно до реальної потреби. Проте перед їх установленням потрібно перевірити характеристики насосів, побудувати або уточнити робочі графіки, оцінити добовий профіль водоспоживання й виконати техніко-економічне обґрунтування.

Енергозбереження також може включати заміну насосів із низьким коефіцієнтом корисної дії, усунення гідравлічних втрат, оптимізацію графіків роботи та впровадження систем автоматичного керування. Важливим показником є питоме енергоспоживання - кількість електроенергії, витраченої на подачу одного кубічного метра води. Порівняння цього показника до та після модернізації дозволяє оцінити реальний результат і виявити подальші можливості для економії.

Окремою умовою надійності є готовність системи до аварій та перебоїв електропостачання. Для критичних об'єктів доцільно передбачати резервні

насоси, альтернативні джерела живлення, запас ремонтних матеріалів і можливість оперативного перемикання між ділянками мережі. Резервуари чистої води можуть забезпечити тимчасовий запас під час ремонтних робіт, однак їхній необхідний обсяг визначається розрахунком з урахуванням чисельності населення, режиму споживання, категорії споживачів і вимог пожежної безпеки. Під час планування резервування пріоритет слід надавати лікарням, закладам освіти, об'єктам критичної інфраструктури та іншим споживачам, для яких тривала перерва у водопостачанні створює значні ризики.

Надійність водопостачання неможлива без систематичного контролю якості води. Контроль має охоплювати як водопідготовку, так і стан води в розподільній мережі. Лабораторні дослідження необхідно поєднувати з належним технічним обслуговуванням очисних споруд, перевіркою дозувального обладнання та дотриманням установлених режимів промивання й дезінфекції. Автоматизовані датчики можуть допомагати оперативно відстежувати окремі параметри, але не замінюють лабораторного контролю, передбаченого нормативними документами.

Важливу роль відіграють цифрові засоби диспетчеризації. Об'єднання даних про витрату, тиск, рівень води в резервуарах, стан насосів і аварійні сигнали дає змогу швидше виявляти відхилення та планувати профілактичні роботи. На основі накопичених даних можна визначати ділянки з повторюваними аваріями, прогнозувати потребу в ремонті та оцінювати роботу обладнання в різних режимах. Водночас ефективність цифровізації залежить від якості датчиків, регулярної перевірки їхніх показників, надійності зв'язку, кіберзахисту та належної підготовки персоналу.

Для раціонального використання фінансових ресурсів модернізацію доцільно реалізовувати поетапно. Спочатку проводять аудит і формують перелік проблем; далі визначають пріоритети за рівнем ризику, вартістю, терміном виконання та очікуваним ефектом; після цього впроваджують заходи й перевіряють результати. До основних показників оцінювання можна віднести частоту аварій, обсяг неврахованої води, питомі витрати електроенергії, тривалість перебоїв у подачі води, відповідність показників якості нормативам і витрати на ремонт. Такий підхід допомагає порівнювати альтернативні рішення й обґрунтовувати інвестиції.

Таким чином, технічна модернізація повинна поєднувати інженерні рішення з належною організацією експлуатації. Навіть сучасне обладнання не забезпечить тривалої надійності без регулярного обслуговування, підготовленого персоналу, актуальної документації та планів реагування на аварійні ситуації. Комплексне управління активами дозволяє перейти від ліквідації наслідків аварій до їх попередження.

Висновки. Підвищення надійності систем водопостачання потребує комплексного підходу, що охоплює технічне обстеження, скорочення втрат води, енергоефективну роботу насосних станцій, резервування критичних елементів, контроль якості та цифровий моніторинг. Пріоритетність робіт необхідно визначати на підставі фактичного стану інфраструктури й оцінювання ризиків. Поетапне впровадження рішень із подальшим контролем

показників дає змогу обґрунтовано використовувати кошти, зменшувати аварійність і підвищувати безперервність водопостачання. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оцінювання ефективності окремих заходів на конкретних об’єктах із використанням фактичних експлуатаційних даних.

Список використаних джерел

1. Закон України «Про питну воду та питне водопостачання» від 10.01.2002 № 2918-III (зі змінами).

2. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Київ: Мінрегіон України, 2013.

3. World Health Organization. Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First and Second Addenda. Geneva: WHO, 2022.

4. United States Environmental Protection Agency. Control and Mitigation of Drinking Water Losses in Distribution Systems. Technical guidance materials.

УДК 620.92

Гасенко Л.В.
к.т.н., доцент, доцент кафедри гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії, hasenko_l@ksaeu.kherson.ua
Жабченко С.М.
студентка групи 192-4-Д
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

ШЛЯХИ ПРИСКОРЕННЯ РОЗВИТКУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ

Вступ. Прискорення впровадження розподілених сонячних фотоелектричних систем та акумуляторних накопичувачів енергії – важливий етап у забезпеченні енергетичної безпеки України.

Протягом року після повномасштабного вторгнення російської федерації в Україну у 2022 році доступні потужності для диспетчеризації електроенергії скоротилися вдвічі з приблизно 38 ГВт до 19 ГВт. Після серйозних атак навесні 2024 року потужності ще більше скоротилися до 12 ГВт. Ближче до кінця 2024 року Україні вдалося відновити 3 ГВт і вона працювала над відновленням та додаванням додаткових потужностей протягом 2025 року, незважаючи на триваючі атаки. Розподілена сонячна фотоелектрична енергетика відігравала ключову роль у цьому відновленні, забезпечуючи економічно ефективне та швидке збільшення потужностей з виробництва електроенергії і водночас сприяючи стійкості системи та загальній енергетичній безпеці.

Перехід до більшого рівня децентралізації у виробництві електроенергії також може допомогти Україні у досягненні її довгострокових цілей декарбонізації, викладених у Національному енергетичному та кліматичному

плані на період до 2030 [1] року та Енергетичній стратегії на період до 2050 року [2].

Основна частина. Існуюча політика України щодо розподіленої сонячної енергетики складається з низькопроцентних позик, що надаються урядом, «зеленого» тарифу та нещодавно запровадженої схеми нетто-біллінгу. Програма кредитування 5-7-9% надає низькопроцентні позики під 5-7% для комерційних та промислових заявників, під 7% для об'єднань домовласників та під 0% на 10 років для домогосподарств (уряд компенсує банкам різницю між поточною ставкою за кредитом, близько 20%, та ставкою за кредитом програми), але може поєднуватися лише з участю в схемі нетто-біллінгу. «Зелений» тариф наразі пропонує близько 135 євро/МВт·год за електроенергію, вироблену сонячними фотоелектричними системами в приватних домогосподарствах, але припинить виплати після 2029 року. Нарешті, схема нетто-біллінгу передбачає, що домогосподарства можуть продавати надлишок електроенергії за погодинною оптовою ціною на електроенергію, за вирахуванням зборів та податків оператора розподільчої системи (ОРС). Станом на початок 2025 року оптові ціни на електроенергію становлять від 70 до 210 євро за МВт·год, тоді як ціна оператора розподільчої мережі (ОРС) становить в середньому 41 євро/МВт·год і коливається від приблизно 17 до 71 євро/МВт·год, залежно від місцезнаходження. Поточна ціна на електроенергію для населення становить близько 84 євро/МВт·год, але зрештою зросте після поступового скасування субсидій.

Враховуючи останні тенденції розгортання, існуючі стимули та поточні роздрібні ціни на електроенергію, ми оцінюємо, що ця політика може призвести до збільшення потужностей сонячних фотоелектричних установок на 3,1 ГВт та ще на 1,4 ГВт потужностей BESS до 2030 року, при цьому очікувані державні витрати на фінансову підтримку складуть близько 1,4 мільярда євро до 2030 року.

Висновок. Оскільки росія продовжує стратегічно атакувати українську енергетичну інфраструктуру, великомасштабні електростанції, як традиційні, так і відновлювані, є особливо вразливими до атак, враховуючи їхні розміри та розташування. Розподілені сонячні фотоелектричні системи можуть вирішити проблеми, що загрожують українській енергетичній інфраструктурі. По-перше, враховуючи їхню невелику потужність, розподілені сонячні фотоелектричні системи можна розгортати швидше (за кілька місяців), ніж сонячні фотоелектричні системи комунального масштабу (приблизно за один рік) або вітрову енергетику (два-три роки). Крім того, враховуючи близькість до центрів попиту, потреби в розподілених ресурсах для ремонту, модернізації або будівництва нової інфраструктури передачі будуть мінімальними, що зменшить як витрати, так і час, необхідний для забезпечення енергією мережі. Розподілені електростанції потенційно усувають вразливості, з якими стикаються великомасштабні установки, оскільки вони не мають єдиних точок відмови, їх важче атакувати, вони менш складні та швидші в ремонті та менше залежать від загального стану мережі.

Список використаних джерел

1. Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року : схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 25 черв. 2024 р. № 587-р (у редакції розпорядження Кабінету Міністрів України від 10 черв. 2026 р. № 562-р). URL: https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=u (дата звернення: 17.10.2026).

2. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квіт. 2023 р. № 373-р. *Законодавство України*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/373-2023-p (дата звернення: 17.10.2026).

УДК 656.25:004.8

Ларченко О.В.

Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ РУХОМ ПОЇЗДІВ: ІЄРАРХІЧНА СТРУКТУРА ТА ФУНКЦІОНАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ НА ПРИКЛАДІ ОДЕСЬКОЇ ЗАЛІЗНИЦІ

Вступ. Сучасний етап розвитку залізничного транспорту характеризується інтенсивним впровадженням інформаційних технологій та мікропроцесорної техніки в системи автоматики, телемеханіки та зв'язку. Головною метою модернізації інфраструктури є підвищення безпеки руху, збільшення пропускної спроможності ліній та оптимізація експлуатаційних витрат [1]. Традиційні релейні системи управління поступово вичерпують свій ресурс і не здатні повною мірою забезпечити необхідний рівень оперативності обробки даних у реальному часі.

Саме тому актуальним завданням є розробка та дослідження комп’ютеризованих систем управління рухом поїздів, які базуються на принципах ієрархічності, модульності та високої надійності обчислювальних мереж. Впровадження програмно-апаратних комплексів диспетчерської централізації дозволяє автоматизувати більшість рутинних операцій, мінімізувати вплив «людського фактора» та створити єдиний інформаційно-керуючий простір [2]. Метою даної роботи є аналіз структури та функціональних можливостей сучасної комп’ютеризованої системи управління перевезеннями на базі інфраструктури Одеської залізниці.

Основна частина. Комп’ютеризована система управління рухом поїздів, що розробляється та досліджується, має чітко виражену ієрархічну структуру. Вона побудована згідно з діючою моделлю управління перевезеннями на залізничному транспорті та складається з трьох базових рівнів, що забезпечують розподіл функцій від глобального планування до безпосереднього виконання команд на місцях (рис. 1) [3].

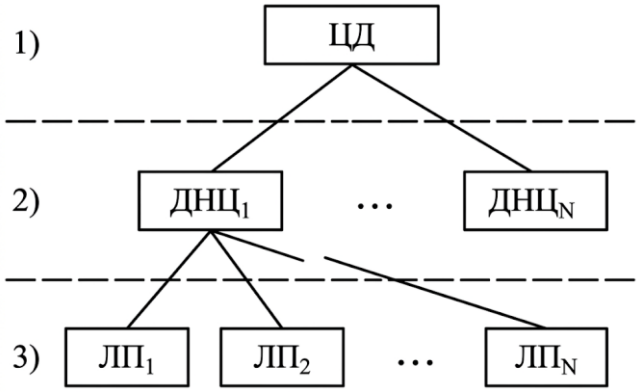


Рис. 1. Ієрархічна структура системи управління перевезеннями

Перший (верхній) рівень – це рівень глобального управління. Його головним завданням є забезпечення контролю за всіма станціями, що знаходяться у підпорядкуванні певного регіонального управління або Головного управління перевезень (ЦД). У даному дослідженні розглядається система управління на прикладі інфраструктури станції Херсон, яка є важливою складовою Одеської залізниці (в межах підконтрольних Україні територій). Одеська залізниця виступає ключовою ланкою єдиного транспортного конвеєра південного заходу України. Масштаби першого рівня управління підкреслюються тим фактом, що магістраль пролягає територією шести областей (Одеської, Миколаївської, Херсонської, Черкаської, Кіровоградської та Вінницької), а її загальна експлуатаційна довжина становить майже 4100 км, що складає близько 18,7% від загальної мережі залізниць країни.

Другий (середній) рівень системи обладнаний комплексами центрального поста (ЦП) диспетчерської централізації певної диспетчерської дільниці (ДНЦ). На цьому рівні забезпечується оперативне керування всіма станціями, які знаходяться в межах визначеного полігону, зокрема на деокупованій правобережній частині Херсонської області. Диспетчерський апарат отримує агреговану інформацію для прийняття оперативних рішень щодо графіка руху.

До третього (нижнього) рівня відноситься диспетчерський контроль безпосередньо на станціях та перегонах – лінійні пункти (ЛП). Саме тут відбувається фізичне управління та збір інформації щодо стану елементів електричної централізації певної станції, таких як стрілочні переводи, світлофори, рейкові кола, переїзні шлагбауми тощо [4].

Основою функціонування системи є програмно-апаратний комплекс мікропроцесорної системи диспетчерської централізації (МСДЦ). Він забезпечує автоматизоване та централізоване керування рухом поїздів, автоматичний аналіз, прогнозування поїзної ситуації, а також взаємодію оперативно-диспетчерського персоналу з об’єктами автоматизації. Комплекс складається з апаратних засобів, спеціалізованого програмного забезпечення та високошвидкісних мереж зв’язку, які об’єднують географічно рознесені складові в єдине інформаційно-керуюче середовище. Апаратні засоби включають апаратуру ЦП та апаратуру перегону диспетчерського контролю (апаратура лінійних пунктів). Лінійні пункти взаємодіють з пристроями релейної або мікропроцесорної електричної централізації станцій, системами

автоблокування та іншими приладами сигналізації, централізації та блокування (СЦБ), зв’язку і енергопостачання [3].

Центральний пост об’єднується з лінійними пунктами через захищені локальні мережі зв’язку в єдину комп’ютеризовану систему (рис. 2).

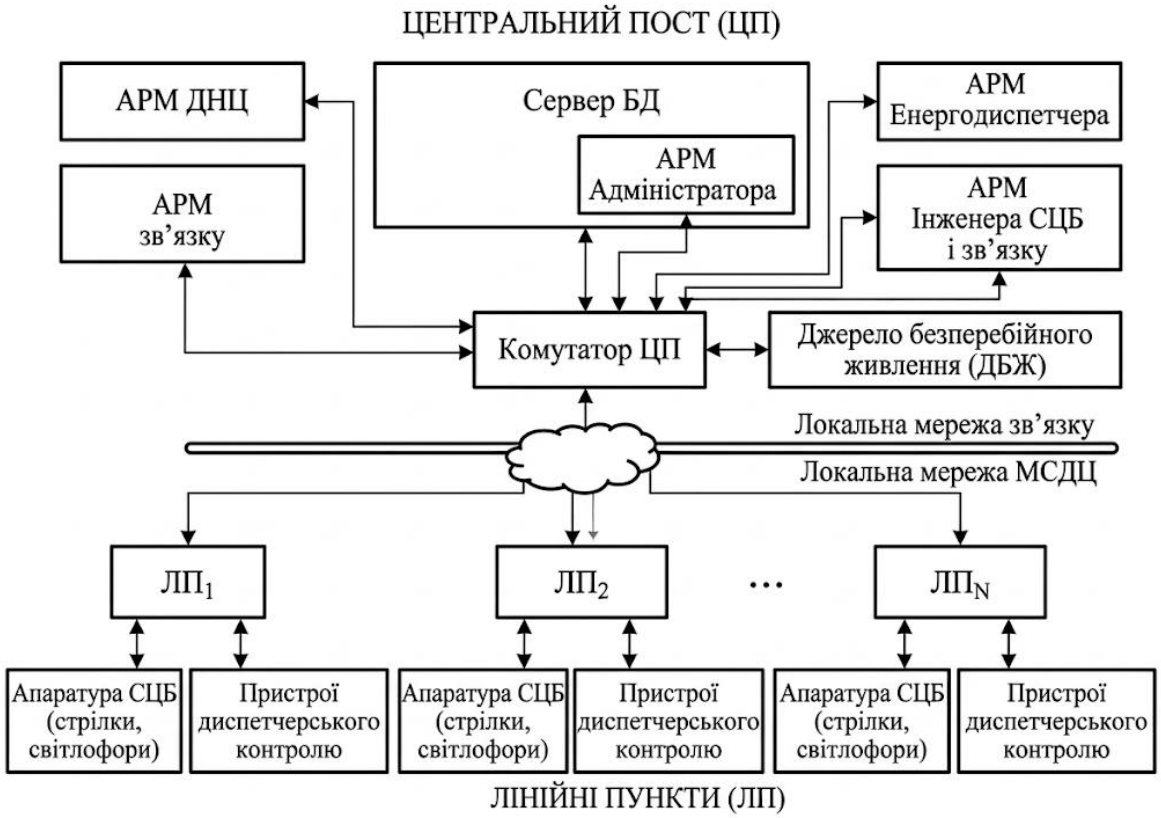


Рис. 2. Структурна схема локальної мережі зв’язку МСДЦ

ЦП розташовується безпосередньо в центрі управління перевезеннями залізниці. До його складу входять автоматизовані робочі місця (АРМ), резервований сервер бази даних із робочим місцем системного адміністратора, комунікаційне обладнання та джерела безперебійного живлення (ДБЖ). Основним завданням ЦП є збереження, обробка, формування та захист інформації.

Для ефективного розподілу обов'язків на центральному посту розгорнуто кілька типів АРМ:

- АРМ поїзного диспетчера: Забезпечує безпосередній контроль перевізного процесу на основі даних від пристроїв СЦБ. Інформація відображається в режимі реального часу: поїзна ситуація у вигляді мнемосхем, рух поїздів (із зазначенням голови та хвоста), графік прогнозного руху, діагностична інформація. Диспетчер дистанційно виконує такі функції: приготування маршрутів, відкриття/закриття світлофорів, переведення стрілок, зміна напряму руху, управління переїздами тощо.

- АРМ енергодиспетчера: Дозволяє контролювати стан та здійснювати управління пристроями енергопостачання на дільниці.

- АРМ інженера СЦБ і зв’язку: Призначене для технічного моніторингу стану пристроїв СЦБ, відображення перевізного процесу, аналізу минулих подій (архівів) та отримання довідкової інформації для своєчасного виявлення та усунення відмов [4].

Програмне забезпечення комплексу побудовано на базі відкритої та надійної операційної системи «LINUX». Це середовище забезпечує високий рівень мережевої безпеки, багатозадачність та стабільність виконання процесів прикладного програмного забезпечення, що орієнтоване на безперервне виконання завдань управління процесом перевезень [2].

Висновки. Аналіз розроблюваної комп’ютеризованої системи управління рухом поїздів на прикладі полігону Одеської залізниці дозволяє зробити наступні висновки. Впровадження трирівневої ієрархічної структури управління (глобальний рівень, диспетчерські центри, лінійні пункти) забезпечує оптимальний баланс між централізацією прийняття рішень та надійністю виконання команд на місцях. Використання програмно-апаратних комплексів на базі мікропроцесорної техніки суттєво розширює функціональні можливості поїзних диспетчерів, енергодиспетчерів та інженерів СЦБ завдяки спеціалізованим АРМ. Застосування мнемосхем у реальному часі, автоматизація приготування маршрутів та ведення системних журналів підвищує безпеку руху та пропускну спроможність. Використання ОС «LINUX» як базового програмного середовища гарантує високу відмовостійкість та захищеність системи, що є критично важливим критерієм для об'єктів критичної інфраструктури, якими є залізниці України.

Список літературних джерел:

1. Данько М.І., Дикань В.Л., Толстова А.В. Управління експлуатаційною роботою на залізничному транспорті: Підручник. Харків: УкрДАЗТ, 2010. 254 с.
2. Бушуєв С.Д., Мулеса О.Ю. Інформаційні технології на залізничному транспорті: стан, проблеми та перспективи розвитку. *Управління проєктами та розвиток виробництва.* 2018. № 1(65). С. 55-63.
3. Гаврилюк В.І. Мікропроцесорні системи автоматики та телемеханіки на залізничному транспорті: Навчальний посібник. Дніпро: Вид-во ДНУЗТ, 2017. 312 с.
4. Самсонкін В.М., Мінніханов С.В., Рябуха В.І. Основи експлуатації мікропроцесорних систем управління рухом поїздів. Київ: Транспорт України, 2015. 280 с.

УДК 556.18:004:332.1

Клименко І. В.
здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальності
194 Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

Кузьмич Л.В.
д.т.н., професор кафедри гідротехнічного будівництва,
водної та електричної інженерії
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

ТРАНСФОРМАЦІЯ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА НА ЗАСАДАХ КОНЦЕПЦІЇ «SMART WATER»: КОМПАРАТИВНИЙ АНАЛІЗ ДОСВІДУ БАРСЕЛОНИ ТА ПЕРСПЕКТИВ ХЕРСОНСЬКОГО РЕГІОНУ

Вступ. Глобальні кліматичні зміни, що супроводжуються зростанням посушливості територій, у поєднанні з антропогенними й техногенними катастрофами, актуалізують проблему дефіциту водних ресурсів. Для Півдня України, зокрема Херсонської області, ситуація стала критичною після руйнування Каховської ГЕС, що призвело до деградації зрошувальних систем та посилення тиску на підземні водоносні горизонти. У цьому контексті перехід від лінійної моделі водокористування до циркулярної (аква-кругообігу) на основі концепції «Smart Water» та регенерації стічних вод (Water Reclamation) є стратегічним пріоритетом відновлення регіону. Дослідження спрямоване на обґрунтування можливості та технологічної межі адаптації європейського досвіду впровадження концепцій «Smart Water» і регенерації води (на прикладі агломерації Барселони) для повоєнної відбудови та модернізації водогосподарського комплексу м. Херсон.

Основна частина. Досвід муніципалітету Барселони (Іспанія) у сфері повторного використання води (water reuse або water reclamation) вважається одним із найуспішніших у світі та слугує глобальним зразком для регіонів, що потерпають від посухи. Зокрема станція регенерації води ERA de El Prat демонструє ефективність концепції Fit-for-purpose water reuse (відповідність якості регенерованої води цільовому призначенню). Технологічна матриця об'єкта базується на триетапному багатобар'єрному захисті:

1. Ультрафільтрація (UF) на капілярних мембранах (робочий тиск 0.5–2.5 бар) для видалення зважених часток (ефективність TSS >99%);

2. Зворотний осмос (RO) на поліамідних мембранах під тиском 10–15 бар із селективністю солевидалення 99.2–99.7% для усунення мікрозабруднювачів (фармацевтичних сполук, пестицидів);

3. Ультрафіолетове опромінення (>400 Дж/м²) у синергії з озонуванням.

Управління системою здійснюється через кіберфізичну платформу (Cyber-Physical Systems) з IoT-датчиками онлайн-моніторингу загального

органічного вуглецю (TOC), каламутності (NTU) та електропровідності. Економічна стабільність моделі забезпечується поєднанням капітальних грантів ЄС (Cohesion Fund покрив до 80% CAPEX) та операційного субсидування (впровадження екологічного податку Water Canon). Це дозволяє постачати регенеровану воду аграріям за тарифом на 40–60% нижчим від питного, а також спрямовувати її для охолодження на заводах у промисловій зоні Free Zone, поливу міських парків, миття вулиць та живлення пожежних гідрантів.

Компаративний аналіз із Херсонським регіоном виявив, що пряме копіювання технологічної схеми Барселони є економічно недоцільним через високу енергоємність зворотного осмосу (0.4–0.8 кВт·год/м³) в умовах дефіциту потужностей в енергосистемі України. Проте суттєві пошкодження очисних споруд м. Херсона відкривають вікно можливостей для технологічного стрибка за принципом Build Back Better (відбудувати краще, ніж було), одразу інтегруючи цифрові рішення у нові проєкти. Це дозволить під час їхньої відбудови одразу впровадити модулі регенерації стічних вод для потреб іригації, перетворивши очисні споруди міста на стратегічне джерело збалансованого водопостачання для локального агросектору.

Для умов м. Херсон обґрунтовано доцільність застосування гібридної, економічно збалансованої схеми: глибока біологічна очистка → автоматизована дискова мікрофільтрація (до показників TSS <5 мг/л) → високоінтенсивне УФ-знезараження, впровадження якої дозволяє отримувати воду, що повністю відповідає Регламенту ЄС 2020/741 щодо мінімальних вимог до повторного використання води для іригації технічних і зернових культур.

Інтеграція компонента «Smart Water» у м. Херсон має передбачати розгортання мереж розумних ультразвукових лічильників на базі технологій передачі даних з низьким енергоспоживанням (NB-IoT або LoRaWAN) та створення цифрового двійника (Digital Twin) гідравлічної мережі міста. Це дозволить скоротити технологічні втрати води (які в Україні історично сягають 40–50%) до європейського нормативу (<15%). Фінансова архітектура херсонського проєкту на першому етапі має орієнтуватися на 100% донорське капітальне фінансування (програма Ukraine Facility, гранти Світового банку, EBRD) із подальшим переходом на модель покриття операційних витрат через залучення промислових та аграрних водокористувачів.

Висновки: Впровадження концепції «Smart Water» та регенерації води для міста Херсон є не просто модернізацією інфраструктури, а критично важливим інструментом екологічного виживання та відновлення агропромислового потенціалу регіону після руйнування Каховської ГЕС. При цьому оптимальним для умов міста Херсон визначено гібридний технологічний шлях, що базується на комбінації дискової мікрофільтрації та ультрафіолетової дезінфекції, яка дозволяє мінімізувати операційні витрати (OPEX) в умовах дефіциту потужностей в енергосистемі, водночас забезпечуючи безпечну регенеровану воду для потреб локального агросектору згідно із жорсткими нормативами Регламенту ЄС 2020/741. Водночас успішна практична реалізація таких проєктів потребує невідкладної адаптації національного законодавства до

вимог Водної рамкової директиви ЄС задля комплексного нормативно-правового врегулювання статусу регенерованих вод в Україні.

Список використаної літератури:

1. Водна рамкова директива ЄС 2000/60/ЕС: Основні положення та впровадження в Україні / за ред. А. В. Яцика. Київ : Знання, 2019. 124 с.
2. Про прийняття Регламенту Європейського Парламенту та Ради (ЄС) 2020/741 від 25 травня 2020 року про мінімальні вимоги до повторного використання води. Офіційний вісник Європейського Союзу. 2020. L 177. С. 32–55.
3. Світовий банк. Оцінка збитків та потреб на відновлення України внаслідок руйнування Каховської ГЕС: аналітична доповідь. Вашингтон : Світовий банк, 2023. 86 с.
4. Концепція Державної цільової програми розвитку водного господарства та екологічного оздоровлення басейну річки Дніпро на період до 2035 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 14 грудня 2022 р. № 1214-р. Урядовий кур'єр. 2022. № 272.
5. Aigües de Barcelona. El Prat Water Reclamation Plant: Master Plan and Smart Management Report. Barcelona : AB Digital Press, 2022. 48 p.
6. Monnot M., Moulin P., Casas S. High-recovery reverse osmosis for water reclamation in the Mediterranean region: The case of Barcelona. Journal of Water Process Engineering. 2021. Vol. 42. P. 102–115.
7. Smart Water Management: IoT and Cyber-Physical Systems for Urban Water Networks / Ed. by O. Verlinden, M. Rossi. Cham : Springer, 2023. 310 p.
8. Про затвердження Стратегії відшкодування витрат на послуги з водопостачання та водовідведення в контексті євроінтеграційних вимог України: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 17 лютого 2026 р. № 144-р. Офіційний вісник України. 2026. № 16. С. 12–18.

УДК 697.1:519.876.5

Димова Г.О.
Херсонський державний аграрно-економічний університет,
м. Херсон-Кропивницький

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ОПАЛЕННЯ ЖИТЛОВОГО ПРИМІЩЕННЯ

Вступ. Процес теплопередачі в будинках та житлових приміщеннях є інерційним явищем, що зумовлює зміщення фаз між коливаннями температури всередині приміщення та за його межами, а також зменшення амплітуди внутрішніх коливань порівняно із зовнішніми. Дійсно, без увімкненого опалення всім процесом керують коливання температури зовнішнього повітря. Якщо температура зовні вища за внутрішню, повітря в приміщенні нагрівається. Цей процес триває і в деякий початковий період після того, як зовнішнє середовище починає охолоджуватися, оскільки система має теплову інерцію. У результаті внутрішнє повітря не досягає тих мінімальних і максимальних значень температур, які спостерігаються ззовні, а амплітуда його коливань виявляється суттєво згладженою.

Для опису теплових процесів в якості базової моделі використовується балансове рівняння [1]:

$$\frac{dU}{dt} = W_{in} - W_{ex}$$

де U – внутрішня енергія приміщення, пропорційна температурі T ($U = CT$, де C – загальна теплоємність системи); W_{in} – теплова потужність опалювального пристрою; W_{ex} – теплова потужність, що втрачається приміщенням назовні. Вважаючи основним каналом втрат тепла теплопровідність огороджувальних конструкцій та вікон, тепловий потік можна подати у вигляді:

$$W_{ex} = \Lambda\big(T - T_{ex}(t)\big)$$

де Λ – коефіцієнт, що визначається теплопровідністю та площею стін і вікон. У результаті вихідне диференціальне рівняння зводиться до виду:

$$\frac{dT}{dt} = -k\big(T - T_{ex}(t)\big) + \frac{W_{in}}{C}$$

де $k = \frac{\Lambda}{C}$ – коефіцієнт температуропровідності (швидкості теплообміну).

Досліджуючи добові коливання, температуру зовнішнього середовища $T_{ex}(t)$ доцільно моделювати як гармонічну функцію часу з періодом 24 години:

$$T_{ex}(t) = T_m + T_a \cos(\omega t + \varphi)$$

де $\omega = \frac{\pi}{12}$ год$^{-1} \approx 7.3 \cdot 10^{-5}$ с$^{-1}$, $\varphi = -\frac{4\pi}{3}$ (враховуючи, що мінімум температури припадає на 4-ту годину ранку, а максимум – на 16-ту годину дня), T_m – середня зовнішня температура, T_a – амплітуда її добових коливань.

Основна частина. На першому етапі дослідимо випадок, коли внутрішнє опалення відсутнє або вимкнене ($W_{in} = 0$). Необхідно розв'язати лінійне неоднорідне диференціальне рівняння першого порядку з постійними коефіцієнтами:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_m - T_a \cos(\omega t + \varphi))$$

Загальний розв'язок цього рівняння шукається як сума загального розв'язку однорідного рівняння $X(t) = Ae^{-kt}$ та частинного розв'язку неоднорідного рівняння $Y(t)$. Для знаходження частинного розв'язку зручно скористатися методом комплексних амплітуд, аналогічним до розрахунку електричних кіл змінного струму [2]. Заміна змінної дозволяє перейти до комплексного рівняння, розв'язок якого шукається у вигляді гармонічної функції з комплексною амплітудою:

$$Z_0 = \frac{T_a e^{i\varphi}}{1 + i\frac{\omega}{k}}$$

Амплітуда коливань температури всередині приміщення V_0 визначається як модуль комплексної амплітуди, а фазовий зсув – як її аргумент.

Якісний аналіз отриманого виразу демонструє два граничні випадки:

1) якщо час встановлення коливань $1/k$ набагато менший за період зовнішніх коливань ($k \gg \omega$), то внутрішня температура практично миттєво адаптується до зовнішньої, повністю повторюючи її за амплітудою та фазою;

2) якщо інерційність системи велика ($k \ll \omega$), встановлення режиму триває впродовж багатьох діб, а амплітуда внутрішніх коливань стає дуже малою порівняно з амплітудою зовнішніх коливань.

Проведені оцінки для типового дачного будинку об'ємом 50 м^3 з площею вікон 2 м^2 та товщиною скла 4 мм показують, що чистий розрахунок за теплопровідністю скла дає завищене значення k. На практиці суттєву затримку тепла створює прикордонний шар повітря біля поверхонь, а також теплоємність внутрішніх меблів і стін, що узгоджує модельні часи релаксації з експериментальними даними (кілька годин) [3].

Дослідимо вплив роботи опалювальних пристроїв на мікроклімат приміщення. Увімкнення опалювача на постійну потужність W_0 еквівалентне зсуву середньої зовнішньої температури на величину $\frac{W_0}{C}$:

$$\frac{dT}{dt} = -k\left(T - \left(T_m + \frac{W_0}{\Lambda}\right) - T_a\cos(\omega t + \varphi)\right)$$

Це підвищує загальний температурний рівень приміщення, проте не усуває добові коливання. Для забезпечення комфортних умов часто ставиться вимога підтримки мінімальної допустимої температури T_{min}. Оптимальна функція потужності опалювача $W_{in}(t)$, яка гарантує сталу мінімальну температуру за мінімальних енерговитрат, має вигляд:

$$W_{in}(t) = C\left(\frac{dT_{min}}{dt} + k\big(T_{min} - T_{ex}(t)\big)\right)$$

Доведено, що такий режим роботи, при якому опалювач працює у протифазі зі змінами зовнішньої температури (максимальна потужность при мінімальній температурі ззовні), забезпечує економію енергії E_{opt} порівняно з режимом постійного опалення E_{const}:

$$E_{opt} = \int_0^{24} W_{in}(t)dt < E_{const}$$

Оскільки реалізувати плавне гармонічне регулювання потужності технічно складно, розглядаються періодичні ступінчасті функції керування. Моделювання таких режимів за допомогою параметрів (час увімкнення t_0, тривалість роботи за добу Δt та максимальна потужність W_{max}) дозволяє знайти оптимальні режими роботи систем розумного опалення [4].

Висновки. Запропонована математична модель теплового балансу житлового приміщення дозволяє успішно прогнозувати динаміку температурних режимів з урахуванням добових коливань і теплової інерції будинку. Аналітичне розв’язання за допомогою методу комплексних амплітуд підтверджує значне згладжування амплітуд внутрішніх коливань. Показано, що використання переривчастих та ступінчастих алгоритмів керування потужністю опалювача відкриває перспективи для оптимізації витрат енергоресурсів при проєктуванні систем «розумний дім».

Список використаної літератури:

1. Богословський В. М. Будівельна теплофізика (теплофізичні основи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря). К.: Вища школа, 2001. 320 с.

2. Жежеленко І. В., Чорний О. П., Лутін О. В. Методи математичного моделювання в електротехніці та електроенергетиці. Кременчук: КрНУ, 2013. 320 с.

3. Дешко В. І., Суходуб І. О. Математичне моделювання теплового режиму будівель з урахуванням нестаціонарних теплових впливів. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. № 1. С. 54-61.

4. Димова Г. О., Ларченко О. В. Реалізація комп'ютерної програми оптимізації опалення заміських будинків. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2020. Вип. 5-6 (124-125). С. 72-78.

УДК 711.4:628.1(443.61)

Шеметенко Д.Р.
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

ВОДНА ІНФРАСТРУКТУРА МІСЬКОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ НАСЕЛЕННЯ ВІД ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ СПЕКИ

Вступ. Влітку 2026 року в Європі трималася сильна спека. У червні у Франції зафіксовано температурні рекорди для цього місяця, а в Парижі багато квартир виявилися непристосованими до таких температур. Мешканці шукали прохолоду біля води: у фонтанах, на каналах, у річках. Проте більшість таких місць не призначена для купання. За офіційними повідомленнями, з 18 по 27 червня у Франції сталося щонайменше 74 випадки утоплення, здебільшого у водоймах без нагляду, а до кінця літа їх кількість перевищила 300.

Ці дані показують, що в місті бракує саме безпечних місць для користування водою, самої води вистачає. У Парижі вже облаштовано кілька зон купання в Сені, але їхня місткість обмежена, а робота залежить від якості води й погоди. Крім того, кліматологи допускають, що в майбутньому температура в місті може наближатися до 50 °C, тому потреба в охолодженні зростатиме.

Воду давно застосовують для охолодження, і сучасна гідротехніка використовує її ширше, ніж для купання: збирає дощову воду, випаровує її з поверхонь, створює в кварталах водні зони з тінню. Мета статті полягає в розробленні концепції мережі водних вузлів охолодження міського простору Парижа, яка поєднує накопичення дощових вод, облаштовані зони купання та ГІС-аналіз для вибору місць їх розміщення.

Основна частина. Паризька спека пояснюється не лише кліматом, а й самим містом. Екстремальні температури стають частішими й сильнішими [1], а для Парижа вже моделюють сценарії з 50 °C [10]. Щільна мінеральна забудова прогрівається помітно більше, ніж околиці. У 2003 році різниця між центром і передмістями сягала 10 °C. Понад 80 % території міста штучно перетворено, а 85 % забудови лежить у зонах, де острів тепла додає понад 5 °C до загального потепління. Цинкові дахи гаусманівських кварталів і асфальт удень нагріваються понад 60 °C [5, с. 11–21]. Платять за це люди. Спека 2003 року забрала у Франції близько 15 000 життів понад норму, з них близько 5 000 в Іль-де-Франс [7]. У Парижі приблизно кожна десята смерть припала на невитребувані тіла літніх самотніх мешканців горищних кімнат, до яких просто нікому було зазирнути. Загроза не зводиться до оселі. З 18 по 27 червня 2026

року у Франції втопилися щонайменше 74 людини [3], а за все літо утоплень було понад 300 [2].

Кондиціювання проблему не розв'язує. У масштабі міста воно споживає багато енергії й викидає тепло на вулицю. Споживання холоду в паризьких крамницях за двадцять років подвоїлося, а потреба міста до 2050 року зросте з 2–3 до 3,5–4 ТВт·год на рік. Централізована мережа холоду покривала лише п'яту частину нинішнього попиту. Дослідження показують, що рання адаптація скорочує майбутні витрати енергії на кондиціювання [9]. Отже, кожен спосіб знизити температуру без компресора одразу економить енергію.

Звіт міської місії має слабке місце. Воду в ньому розглянуто поверхово: Сену, поєднання спеки з посухою, водокористування й водовідведення, так само як підвали та інші природно прохолодні місця. А вода в місті працює проти охолодження. Непроникні покриття не дають їй випаровуватися й швидко відводять у каналізацію, і під час злив змішані стоки подекуди потрапляють у Сену. Ця сама вода могла б охолоджувати квартали. Потенціал блакитної інфраструктури підтверджується: за даними систематичного огляду, найсильніше охолодження дають ботанічні сади, близько 5,0 °C, і водно-болотні угіддя, близько 4,9 °C, хоч оцінки сильно розходяться [8]. Порівняння водних, зелених і конструктивних заходів в окремому огляді допомагає добирати їх під конкретний квартал [4]. Для щільного міста ці цифри слід вважати верхньою межею, а не прогнозом. Адаптація все ж дає результат: для Великого Лондона звіт оцінює скорочення смертності від спеки на 32–69 % до 2050 року, а під час останніх хвиль спеки у Стокгольмі, Лондоні й Франції померло у 3–4 рази менше людей, ніж очікували. Тому пропонується мережа водних вузлів охолодження на трьох рівнях. Одна й та сама вода працює на різних масштабах, від даху до річки.

Почати можна з даху: квартальні накопичувачі дощової води збирають те, що зараз іде в каналізацію. Покрівлі гаусманівських будинків збирають багато води, а двори й підвали дають місце під підземні резервуари. Накопичена вода розвантажує каналізацію під час злив, а в піки спеки йде на охолодження. Технічна вода тут доречна, бо звіт сам називає розгортання мережі непитної води серед заходів адаптації, а за затяжної спеки без опадів питну воду на охолодження витрачати не можна. Масштаб видно з простого розрахунку. З покрівлі площею 400 м² при коефіцієнті стоку 0,9 одна злива на 20 мм дає близько 7 м³. Якщо подавати воду на покрівлю з інтенсивністю випаровування 0,3 л/м² на годину, запасу вистачить приблизно на 60 годин, тобто на шість денних циклів по десять годин. За цей час від покрівлі відводиться близько 80 кВт тепла, або приблизно 200 Вт на квадратний метр. Цифри орієнтовні, їх потрібно перевірити моделюванням.

Далі йдуть публічні вузли там, де люди проводять час на спеці без кондиціювання: площі, ринки, зупинки, тераси кафе. Це туманні завіси, мілкі басейни для бризкання, питні фонтани й навіси з випарним охолодженням, що живляться з квартальних накопичувачів. Окремий варіант полягає в угодах із закладами харчування. Кафе отримує готовий модуль охолодження тераси й стає частиною мережі, а місто без нового будівництва дістає додаткові точки

прохолоди. Системам розпилення потрібен контроль якості води й температурного режиму, щоб вони не створювали санітарних ризиків.

Завершує мережу безпечна річкова зона. У 2025 році Париж відкрив три облаштовані місця для купання в Сені: Bras Marie, Bercy та Grenelle. Вони працювали щодня з 5 липня до 31 серпня, але лише за помірної течії, щоденно перевіреної якості води та м'якої погоди. Місткість невелика: на Bras Marie одночасно може бути 150 осіб, на Grenelle до 200 [6]. Лише на такі зони розраховувати не можна, бо спека охоплює все місто. Дрібні вузли в кварталах знімають навантаження з річки й залишають купання там, де його можна контролювати. Це стосується і утоплень у водоймах без нагляду.

Новизна підходу в тому, як вибирають місця для вузлів. Вирішує не наявність вільної ділянки, а поєднання теплового ризику, вразливості населення та водного потенціалу. Ці чинники оцінюють у ГІС багатокритеріальним накладанням шарів. Пріоритет ділянки розраховується як зважена сума нормованих показників:

$$P_i = w_1 T_i + w_2 V_i + w_3 D_i + w_4 R_i, \quad (1)$$

де:

P_i – інтегральний пріоритет розміщення вузла на ділянці i, $P_i \in [0; 1]$;

$i = 1, 2, \ldots, n$ – номер ділянки, n – кількість ділянок, що аналізуються;

T_i – нормований показник теплового навантаження ділянки i з урахуванням острова тепла й озеленення, $T_i \in [0; 1]$;

V_i – показник вразливості населення ділянки i, $V_i \in [0; 1]$;

D_i – нормований показник віддалі від ділянки i до найближчого місця прохолоди, $D_i \in [0; 1]$;

R_i – нормований показник водного потенціалу ділянки i, який визначається площею покрівель для збору води, $R_i \in [0; 1]$;

w_k – вагові коефіцієнти показників, $k = 1, 2, 3, 4$, що визначаються методом аналізу ієрархій, $w_k \geq 0$, $\sum_{k=1}^{4} w_k = 1$.

Дані для цих шарів уже є. За звітом, ризик смерті від надзвичайної спеки на 18 % вищий у найменш озеленених комунах. У Парижі у 2019 році жило понад 80 000 самотніх людей віком від 75 років. В Іль-де-Франс майже 80 % зайвих смертей літа 2022 року припало на людей старших за 75 років. Накладання цих шарів показує, де вузол потрібен насамперед, і дозволяє будувати мережу поетапно. Вона не замінює озеленення чи термомодернізацію, а доповнює їх. Ефективність для обраного кварталу має підтвердити мікрокліматичне моделювання до і після встановлення вузлів.

Висновки. Паризька спека 2003 року й літо 2026 року показали, що небезпека виникає і вдома, і поза ним. У першому випадку люди гинули в нагрітих горищних кімнатах, у другому тонули у водоймах без нагляду. В обох випадках міська вода й міська забудова не були пристосовані до людини, якій потрібна прохолода.

Відповіддю на це може стати мережа водних вузлів охолодження на трьох рівнях: квартальні накопичувачі дощової води, публічні вузли на площах, ринках і терасах кафе та облаштовані місця для купання в Сені. Дощова вода з покрівель живить охолодження на місці, не навантажує каналізацію й не потребує питної води. Орієнтовний розрахунок для покрівлі площею 400 м² показав, що одна злива накопичує близько 7 м³, цього вистачає приблизно на 60 годин випарного охолодження, а від покрівлі відводиться близько 80 кВт тепла. Річкові зони за такої схеми розвантажуються дрібними вузлами в кварталах.

Місця для вузлів вибирають за інтегральним показником пріоритету, який об'єднує тепловий ризик, вразливість населення, віддаль до найближчого місця прохолоди та водний потенціал ділянки. Вузли з'являються спершу там, де сума цих чинників найбільша, і мережа розростається поетапно. Для міста це означає можливість вкладати кошти там, де вони найшвидше зменшують ризик для людей, а не розподіляти їх рівномірно по всіх кварталах. Угоди з кафе дають змогу додати точки прохолоди без нового будівництва, а використання дощової води знижує навантаження на каналізацію й водопровід. Таке рішення доповнює озеленення та термомодернізацію й не потребує кондиціювання, яке підвищує споживання енергії та нагріває вулицю.

Отримані значення мають орієнтовний характер. Далі потрібно налаштувати вагові коефіцієнти методом аналізу ієрархій на реальних ГІС-даних і виконати мікрокліматичне моделювання обраного кварталу до й після встановлення вузлів. Лише після цього можна говорити про реальну ефективність мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers. Geneva: IPCC, 2023. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf (дата звернення: 22.10.2026).
2. Drownings surge past 300 in France amid heatwaves. *ARY News*. 2026. 23 Aug. URL: https://arynews.tv/drownings-surge-past-300-france-amid-heatwaves (дата звернення: 22.10.2026).
3. France says 74 drowning deaths since 18 June. *Arab News*. 2026. 27 June. URL: https://www.arabnews.pk/node/2648800 (дата звернення: 22.10.2026).
4. Kumar P. et al. Urban heat mitigation by green and blue infrastructure: Drivers, effectiveness, and future needs. *The Innovation*. 2024. Art. 100588. DOI: https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100588 (дата звернення: 22.10.2026).
5. Paris at 50 degrees: adapting to heat waves. Paris: Paris City Council, 2023. URL: https://cdn.paris.fr/paris/2023/04/21/paris_a_50_c-le_rapport-Jc4H.pdf (дата звернення: 22.10.2026).

6. Paris Climate Action Plan 2024–2030. Paris, 2025. URL: https://cdn.paris.fr/paris/2025/06/25/plan-climat-en-9E8O.pdf (дата звернення: 22.10.2026).
7. Pirard P. et al. Summary of the mortality impact assessment of the 2003 heat wave in France. *Eurosurveillance*. 2005. Vol. 10, Iss. 7. DOI: https://doi.org/10.2807/esm.10.07.00554-en (дата звернення: 22.10.2026).
8. Qureshi A. M., Rachid A., Bartlett D. Quantifying the cooling effect of urban heat stress interventions. *International Journal of Global Warming*. 2023. Vol. 30, No. 1. P. 60–80. DOI: https://doi.org/10.1504/IJGW.2023.130493 (дата звернення: 22.10.2026).
9. Viguié V. et al. Early adaptation to heat waves and future reduction of air-conditioning energy use in Paris. *Environmental Research Letters*. 2020. Vol. 15, No. 7. Art. 075006. DOI: https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6a24 (дата звернення: 22.10.2026).
10. Yiou P. et al. How could 50 °C be reached in Paris: analyzing the CMIP6 ensemble to design storylines for adaptation. *Climate Services*. 2024. Vol. 36. Art. 100518. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cliser.2024.100518 (дата звернення: 22.10.2026).

УДК 626.1:656.62

Гаркуша Н.І.
здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальності 194 Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

Кузьмич Л.В.
д.т.н., професор кафедри гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

ГІДРОТЕХНІЧНА ІНФРАСТРУКТУРА ВНУТРІШНІХ ВОДНИХ ШЛЯХІВ: ДОСВІД НІМЕЧЧИНИ ТА ВИКЛИКИ ВІДНОВЛЕННЯ В УКРАЇНІ

Вступ. Гідротехнічні споруди та інженерні об'єкти внутрішніх водних шляхів є стратегічно важливими елементами транспортної та водогосподарської інфраструктури, що забезпечують судноплавство, регулювання стоку й стабільне функціонування логістичних систем. В умовах масштабних пошкоджень інфраструктури України внаслідок воєнних дій особливої актуальності набувають питання оцінювання фактичного технічного стану судноплавних гідроспоруд, обґрунтування інженерних рішень щодо їх

відновлення та модернізації з урахуванням світового досвіду. За результатами звіту *Rapid Damage and Needs Assessment* (RDNA5) [1], прямі збитки та довгострокові потреби у відбудові інфраструктурних об'єктів досягли критичних масштабів. У секторі гідравлічної та водної інфраструктури першочергові завдання охоплюють відновлення захисних і регулювальних гідротехнічних споруд, зокрема вздовж дніпровських водосховищ, що зазнали деструктивного впливу після підриву Каховської ГЕС у червні 2023 року. Під час планування відновлення критично важливо реалізувати підхід "*Build Back Better"* - модернізацію з підвищенням стійкості об'єктів до кліматичних та антропогенних ризиків у майбутньому. У цьому контексті інженерний досвід Німеччини, яка має високотехнологічну й інтегровану мережу внутрішніх водних шляхів, є фундаментальним для визначення технічних орієнтирів модернізації українських гідротехнічних об'єктів.

Метою роботи є порівняльний аналіз техніко-гідротехнічних особливостей функціонування внутрішніх водних шляхів Німеччини та України й визначення перспективних можливостей та інженерних напрямів модернізації судноплавних гідроспоруд в Україні.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання: розглянути структуру інженерного облаштування водних шляхів Німеччини; оцінити руйнування та обмеження гідротехнічної інфраструктури України; дослідити інженерно-технічні можливості та технологічні рішення для модернізації українського каскаду шлюзів і портових споруд; визначити послідовність кроків для відновлення гідротехнічних об'єктів України на основі міжнародних підходів.

Основна частина. Ефективність функціонування водних артерій визначається не лише природними умовами, а й рівнем інженерно-технічного облаштування русел. Німеччина експлуатує одну з найпотужніших мереж внутрішніх водних шляхів у Європі загальною протяжністю близько 7 300 км. Її інфраструктурний комплекс включає каскади шлюзів, регулювальні греблі, суднопідіймачі та канальні мости, що забезпечують безперебійну навігацію. Ключове значення мають басейни річок Рейн, Ельба та Дунай, інтегровані в єдину систему за допомогою штучного каналу Рейн - Майн - Дунай. Забезпечення експлуатаційної надійності цих споруд спирається на жорсткі стандарти моніторингу та управління інформацією протягом усього життєвого циклу об'єктів, що відповідає принципам міжнародних стандартів [2-4].

Водночас німецька гідротехнічна модель стикається з серйозними викликами, викликаними кліматичними змінами. Тривалі періоди низького рівня води у вигляді маловоддя на Рейні обмежують осідання суден і потребують адаптації гідротехнічних споруд, днопоглиблення та постійної інженерної модернізації судноплавних ділянок. Це свідчить про необхідність безперервного геотехнічного моніторингу споруд і впровадження цифрових технологій управління інфраструктурою [3, 4].

Україна володіє потужним природним потенціалом для річкової навігації (головні артерії: Дніпро, Дунай, Південний Буг), проте стан судноплавних гідроспоруд і шлюзів ще до 2022 року потребував масштабних

капіталовкладень через значне зношення. Повномасштабні воєнні дії призвели до критичних руйнувань, наймасштабнішим з яких став підрив Каховського гідровузла. Це повністю дестабілізувало гідрологічний режим дніпровського каскаду, унеможливило наскрізне судноплавство Дніпром та пошкодило суміжні гідротехнічні об'єкти.

За цих умов повоєнна відбудова відкриває перед Україною **унікальне технологічне вікно можливостей** для повної інженерної трансформації внутрішніх водних шляхів, що базується на наступних напрямах:

1. **Технологічний апгрейд шлюзових систем.** Замість відновлення застарілих радянських механізмів, Україна має можливість впровадити німецький досвід автоматизації. Це включає перехід на сучасні гідравлічні приводи затворів і воріт, встановлення автоматизованих систем управління наповненням камер (для зменшення турбулентності та прискорення шлюзування), а також використання композитних матеріалів високої зносостійкості для ущільнювальних елементів.
2. **Впровадження енергоощадних гідротехнічних рішень.** На дніпровських шлюзах є доцільним будівництво судноплавних споруд з **заощаджувальними басейнами** (технологія, яка масово використовується в Німеччині на каналах). Це дозволить повторно використовувати до 60% води під час кожного циклу шлюзування, що є критично важливим в умовах маловоддя та зміни клімату.
3. **Екологічна модернізація та будівництво рибоходів.** Нові та відновлювані гідровузли повинні проєктуватися за сучасними європейськими стандартами екологічної безпеки. Інтеграція ефективних рибопропускних споруд європейського типу дозволить відновити міграційні коридори для цінних видів риб, що серйозно постраждали через багаторічне зарічкове перегородження Дніпра.

Розвиток Дунайського кластера портових гідроспоруд [5]**.** За умов обмеження роботи чорноморських портів стратегічного значення набули об'єкти Нижнього Дунаю. Поточні можливості України пов'язані з будівництвом сучасних шпунтових причальних стінок, захисних дамб нового покоління та впровадженням високоточних автоматизованих систем днопоглиблення для підтримання гарантованих глибин суднового ходу (Кілійське гирло, канал Дунай - Чорне море).

Висновки.

1. Порівняльний аналіз показує, що якщо Німеччина фокусується на адаптації споруд до кліматичних змін та цифровізації управління, то для України першочерговим викликом є ліквідація наслідків воєнних руйнувань і відновлення базової життєздатності гідровузлів.
2. Україна має унікальні інженерні можливості здійснити «технологічний стрибок», відмовившись від застарілих рішень на користь автоматизованих шлюзових систем, водозберігаючих басейнів та сучасних екологічних стандартів будівництва гідровузлів. Нові об'єкти повинні проєктуватися з урахуванням європейських екологічних вимог та інтегруватися в єдину цифрову систему моніторингу внутрішніх водних шляхів ЄС.

Список використаної літератури:

1. S. Kuzmych, M. Radchuk, V. Guryn, L. Kuzmych. (2023). Study of the deformation characteristics of the base soil of shore fortification with reinforced concrete slabs. *4th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities, Landslide 2023*. Volume 2023, p.1 - 5 **DOI:** 10.3997/2214-4609.2023500005
2. L. Kuzmych, V. Guryn, M. Radchuk, S. Kuzmych. (2023). Methodology for calculating the stability of the base of riverside slopes reinforced concrete slabs. *4th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities, Landslide 2023*. Volume 2023, p.1 - 5 **DOI:** 10.3997/2214-4609.2023500006
3. Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA5): February 2022 – December 2025 / World Bank, Government of Ukraine, European Union, United Nations. Washington, DC : World Bank, 2026. 76 p. URL: undp.org
4. Inland Waterways of Germany. *Identec Solutions News*. 2024. URL: Identec Solutions
5. Evaluation of the potential of infrastructure funds: The case of inland waterway infrastructure in Germany. *Technological Forecasting and Social Change*. 2024. Vol. 202. Art. 123305. URL: ScienceDirect
6. German-Ukrainian Project Strengthens Sustainable Water Infrastructure in Ukraine. *German Water Partnership (GWP)*. Berlin / Mykolaiv, August 14, 2025. URL: German Water Partnership
7. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні споруди. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010.

УДК 629.7.05:621.396

Волошинов С.А., Білоусова Т.П.

Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ АВІАЦІЙНОГО РАДІОКОМПАСА АРК-15

Вступ. Надійність бортового радіонавігаційного обладнання є важливою умовою отримання достовірної навігаційної інформації. Автоматичний авіаційний радіокомпас АРК-15 визначає напрямок на радіостанцію та забезпечує індикацію курсового кута. Його працездатність залежить від узгодженої роботи антенних каналів, приймального тракту, системи автоматичного пеленгування, індикації та живлення. Тому під час технічного обслуговування необхідно перевіряти не лише факт увімкнення приладу, а й відповідність його параметрів установленим вимогам. Ручні перевірки потребують послідовного виконання операцій, фіксації показів і розрахунків, що збільшує тривалість робіт та створює ризик помилок. Мета статті —

узагальнити принципи роботи АРК-15 і розглянути підхід до побудови мікроконтролерної системи контролю та діагностики.

Основна частина. Призначення та принцип роботи АРК-15. Автоматичний радіокомпас належить до радіотехнічних засобів навігації, які використовують сигнали наземних радіостанцій для визначення напрямку на джерело випромінювання. За технічними матеріалами щодо радіокомпаса АРК-15М [1], прилад працює в діапазоні частот 150–1799,5 кГц і може встановлюватися на літаках та гелікоптерах. До його основних функцій належать політ на радіостанцію та від неї, визначення й безперервна індикація курсового кута, а також приймання позивних сигналів. Перед практичним контролем конкретні характеристики й допустимі значення необхідно звіряти з технічною документацією відповідної модифікації.

Робота системи пеленгування ґрунтується на взаємодії рамкової та ненаправленої антен [2]. Ненаправлена антена приймає сигнали з різних напрямків без вираженої залежності рівня від азимута. Рамкова антена має спрямовану діаграму у формі «вісімки» з двома протилежними напрямками мінімального приймання. Поєднання сигналів цих антен дає змогу усунути неоднозначність напрямку. У АРК-15 дві взаємно перпендикулярні обмотки рамкової антени взаємодіють із гоніометром, який містить нерухомі польові котушки та рухому пошукову котушку. Напрямок результуючого поля пов’язаний із напрямком приходу радіохвилі, а вихідний сигнал надходить до підсилювальних і модуляційних кіл.

У балансному модуляторі рамковий сигнал взаємодіє із сигналом місцевого звукового генератора та сигналом ненаправленої антени. Після проходження приймального тракту й детектування керувальна схема визначає сторону та величину відхилення від потрібного напрямку. Виконавчий двигун змінює положення пошукової котушки, доки рамкова складова не досягне мінімуму. Відповідне положення передається на покажчик курсового кута. Отже, правильність пеленгування залежить від роботи кількох взаємопов’язаних вузлів; порушення фазового узгодження або несправність одного з каналів може спричинити помилкову індикацію чи нестабільне стеження [2].

Обґрунтування автоматизації контролю. Під час ручної перевірки фахівець під’єднує вимірювальні засоби, установлює режими, контролює параметри, записує покази та порівнює їх із допустимими межами. Мікроконтролерна система може автоматизувати повторювані операції: керувати послідовністю тестів, збирати виміряні дані, обчислювати відхилення, порівнювати результати з допусками та формувати протокол [1, 4]. Такий підхід сприяє скороченню трудомісткості, підвищенню повторюваності перевірок і зменшенню кількості помилок під час ручного перенесення даних.

Доцільна структура діагностичного пристрою охоплює інтерфейс підключення до об’єкта контролю, вимірювальний канал, мікроконтролерний блок, засіб відображення результатів і джерело живлення. На початковому етапі перевіряють комплектність, стан кабелів і роз’ємів, відповідність живлення та готовність вимірювальних каналів. Далі задають передбачений методикою

контрольний режим і подають тестовий вплив. Виміряні аналогові сигнали, за потреби, перетворюються на цифрові значення, після чого програма виконує масштабування та обчислює відхилення від заданого параметра: $\Delta x = x_{вим} - x_{зад}$. За симетричного допуску результат відповідає вимогам, якщо $|\Delta x| \leq \Delta_{доп}$. Числові допуски мають визначатися технічною документацією або затвердженою методикою відповідно до принципів технічного діагностування [3], а не задаватися довільно.

Результати діагностики варто поділяти на три категорії: «відповідає вимогам», «не відповідає вимогам» і «перевірку не завершено». Останній статус застосовують, коли виникла помилка процедури, вимірювання є недостовірним або перервано живлення чи з'єднання. Відсутність достовірних даних не може трактуватися як підтвердження справності. Протокол доцільно формувати в єдиному форматі із зазначенням дати, позначення обладнання, режиму перевірки, фактичних значень, допустимих меж і підсумкового статусу. Збереження протоколів дає змогу порівнювати результати в часі та виявляти тенденції до погіршення параметрів, що узгоджується з підходом до експлуатації авіаційної техніки за технічним станом [4].

Надійність і обмеження системи. Для оцінювання надійності використовують, зокрема, інтенсивність відмов і ймовірність безвідмовної роботи; планування технічного контролю має враховувати фактичний стан обладнання [4]. За припущення сталої інтенсивності відмов ймовірність безвідмовної роботи описують експоненційною моделлю $P(t) = \exp(-\lambda t)$, де λ — інтенсивність відмов, а t — час роботи. Ця модель є спрощеною та застосовна лише за прийнятності припущення про сталість інтенсивності. Дані про надійність можуть допомагати планувати профілактичні перевірки, проте рішення мають враховувати умови експлуатації та нормативні вимоги.

Автоматизація не гарантує правильності діагнозу сама по собі. Похибка вимірювального каналу, некоректний контрольний сигнал, неправильне підключення або помилка програмного алгоритму можуть призвести до хибного висновку. Тому необхідні калібрування, самоконтроль, перевірка алгоритмів на контрольних даних і регулярне підтвердження метрологічних характеристик; терміни й процедури контролю слід узгоджувати з нормативними положеннями технічного діагностування [3]. Система має підтримувати технічне рішення, але не замінювати кваліфікованого фахівця та регламентовані процедури обслуговування.

Висновки. Узагальнено принцип роботи автоматичного авіаційного радіокомпаса АРК-15 і визначено, що його функціонування залежить від узгодженої роботи рамкової та ненаправленої антен, гоніометра, приймального тракту й системи стеження. Обґрунтовано доцільність застосування мікроконтролерної системи для автоматизації повторюваних операцій технічного контролю, оброблення вимірювань і формування протоколів. Для достовірної діагностики необхідні нормативно визначені допуски, придатні вимірювальні засоби, калібрування та облік помилкових або неповних тестів. Подальша робота має бути спрямована на експериментальну перевірку

алгоритмів і оцінювання ефективності системи в реальних умовах технічного обслуговування.

Список використаних джерел

1. Данилюк О. С., Мартинов Д. В., Пальоха А. О., Кафтанов Б. С., Сіліверстов І. Р. Удосконалення процесу технічного обслуговування радіокомпасу АРК-15М. Матеріали науково-технічної конференції Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. URL: https://hups.mil.gov.ua/assets/doc/science/conference/17/xvii-conf-hnups.pdf (дата звернення: 16.10.2026).
2. Фриз С. П., Андреєв О. В., Рихальський О. Р., Дубина О. Ф. Теорія і техніка радіолокації та радіонавігації : навчальний посібник. Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2020. 178 с.
3. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення : ДСТУ 2389–94. Київ : Держстандарт України, 1994. 24 с.
4. Розгляд алгоритму експлуатації авіаційної техніки державної авіації України «за станом» з використанням наземних засобів технічного контролю та систем бортових вимірювань. Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2021. DOI: https://doi.org/10.37701/dndivsovt.9.2021.10.

УДК 628.336:504.06

Оловяннікова Г.О.
Незалежна дослідниця, м. Херсон

ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ІННОВАЦІЙНИХ МЕТОДІВ УТИЛІЗАЦІЇ ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД

Вступ. Осади стічних вод – неминучий побічний продукт очищення, обсяг якого зростає разом із розширенням каналізування та підвищенням вимог до якості очищення, зокрема відповідно до Директиви 91/271/ЄЕС [1]. В Україні значна частина осадів і нині накопичується на мулових майданчиках, які займають великі території, є джерелом викидів метану й неприємних запахів та створюють ризик забруднення ґрунтових вод. Водночас осади містять органічну речовину, біогенні елементи, передусім фосфор, і енергетичний потенціал, які за такого поводження втрачаються. Ієрархія поводження з відходами, закріплена в Директиві 2008/98/ЄС [2] та в Законі України «Про відходи» [3], орієнтує на запобігання утворенню, повторне використання та рекуперацію ресурсів, а не на захоронення. Для післявоєнного відновлення систем водовідведення південних регіонів, зокрема Херсонщини, вибір технології утилізації осадів є не лише екологічним, а й економічним рішенням, що визначає експлуатаційні витрати станцій на десятиліття. Метою роботи є

порівняльна еколого-економічна оцінка сучасних методів утилізації осадів стічних вод та визначення підходів до їх вибору.

Основна частина. Огляд практики європейських країн показує, що структура поводження з осадами сильно різниться залежно від законодавства, масштабу станцій і доступності земель, а загальною тенденцією є відхід від складування до рекуперації [4]. Розглянемо основні групи методів, які вважають інноваційними для умов України. Анаеробне зброджування зменшує масу осаду, стабілізує його та дає біогаз, що може покривати частину потреб станції в теплі й електроенергії [5]. Компостування й агрономічне використання повертають органічну речовину та поживні елементи в ґрунт, проте потребують контролю вмісту важких металів і патогенів відповідно до вимог Директиви 86/278/ЄЕС [6]; якість кінцевого продукту як добрива в ЄС регулює Регламент 2019/1009 [7]. Термічні методи – моноспалювання, піроліз, газифікація – забезпечують найбільше зменшення об’єму, знищення патогенів і органічних полютантів та можливість утилізації тепла, але вимагають попереднього зневоднення чи сушіння й суворого контролю викидів [8]. Окремий напрям становить вилучення фосфору з осаду або золи, що знижує залежність від імпортованої мінеральної сировини; його техніко-економічну та екологічну доцільність порівнюють на основі життєвого циклу [9]. В Україні вимоги до осадів, які використовують для удобрювання, встановлює національний стандарт ДСТУ 7369:2013 [10], тому європейський досвід потребує адаптації до національних норм.

Для коректного порівняння доцільно застосовувати інтегральний підхід. Економічну складову оцінюють чистою приведеною вартістю на 1 т сухої речовини: $ЧПВ = \sum (B_t – C_t) / (1 + r)^t – K$, де B_t – вигоди року t (енергія, добриво, уникнені платежі за розміщення відходів), C_t – експлуатаційні витрати, K – капітальні інвестиції, r – ставка дисконтування, n – тривалість розрахункового періоду (сума береться за $t = 1, …, n$). Екологічну складову виражають через зміну потенціалу глобального потепління, викидів у воду й повітря та землеємність. Порівняльну характеристику методів наведено в таблиці.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика методів утилізації осадів

Метод	**Екологічний ефект**	**Економічна особливість**
Мулові майданчики	Метан, запах, фільтрація	Низькі витрати, висока плата за територію
Анаеробне зброджування	Біогаз, зменшення маси	Висока капіталоємність, окупність за рахунок енергії
Компостування	Повернення органіки в ґрунт	Залежить від якості та збуту продукту
Термічні методи (спалювання, піроліз, газифікація)	Знищення патогенів, біовугілля	Складне обладнання, потреба у сушінні
Вилучення фосфору	Заміна мінеральних добрив	Доцільність залежить від масштабу станції [9]

Джерело: складено автором на основі [4, 5, 8, 9].

Із таблиці видно, що жоден метод не є універсальним. Мулові майданчики формально дешеві, проте приховані витрати – плата за землю, викиди метану, ризики для водних об'єктів – роблять їх найменш привабливими в довгостроковій перспективі. Анаеробне зброджування економічно виправдане за достатнього обсягу осаду, оскільки висока капіталоємність окупається власною енергією. Для малих і середніх станцій південних регіонів, де кліматичні умови дозволяють застосовувати сонячне підсушування, доцільно розглядати його поєднання з компостуванням або подальшим термічним оброблянням, що може знижувати витрати на зовнішню енергію. Для великих станцій оптимальним є комплекс «зброджування – зневоднення – термічна утилізація – вилучення фосфору», який дозволяє замкнути потоки енергії й біогенних елементів. Вирішальними чинниками вибору є обсяг і склад осаду, наявність земель під його використання, вартість енергії, вимоги до якості продукту та доступність фінансування, зокрема міжнародної допомоги на відновлення інфраструктури.

Результати такої оцінки чутливі до вихідних припущень, тому її доповнюють аналізом чутливості до тарифів на електроенергію та розміщення відходів, ставки дисконтування, вологості й зольності осаду. Зростання вартості енергії підвищує привабливість зброджування й термічних методів, тоді як посилення вимог до вмісту важких металів і мікрозабруднювачів обмежує пряме внесення осаду до ґрунту й переносить акцент на технології, які гарантують знищення або зв'язування полютантів. Окремо слід ураховувати ризики воєнного часу: пошкодження мереж і споруд, нестабільність енергопостачання та потребу в модульних, швидко відновлюваних рішеннях, які можна впроваджувати поетапно.

Висновки. Інноваційні методи утилізації осадів стічних вод забезпечують одночасно зменшення екологічного навантаження та часткове відшкодування витрат за рахунок енергії, добрив і уникнених платежів. Вибір технології має ґрунтуватися на інтегральній оцінці, що поєднує чисту приведену вартість та показники життєвого циклу, а не на порівнянні лише капітальних витрат. Для України, зокрема для відновлення об'єктів Херсонщини, доцільно застосовувати диференційований підхід залежно від потужності станції: для малих – підсушування й компостування, для великих – зброджування з термічною утилізацією та вилученням фосфору. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розрахунок показників для конкретних станцій із фактичними даними про склад осадів і тарифи.

Список використаних джерел

1. Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste-water treatment. Official Journal of the European Communities. 1991. L 135. P. 40–52.

2. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste. Official Journal of the European Union. 2008. L 312. P. 3–30.

3. Про відходи : Закон України від 05.03.1998 № 187/98-ВР. Відомості Верховної Ради України. 1998. № 36–37. Ст. 242.

4. Kelessidis A., Stasinakis A.S. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. Waste Management. 2012. Vol. 32, No. 6. P. 1186–1195.

5. Tchobanoglous G., Stensel H.D., Tsuchihashi R., Burton F. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2014. 2048 p.

6. Council Directive 86/278/EEC of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. Official Journal of the European Communities. 1986. L 181. P. 6–12.

7. Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products. Official Journal of the European Union. 2019. L 170. P. 1–114.

8. Werle S., Wilk R.K. A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective. Renewable Energy. 2010. Vol. 35, No. 9. P. 1914–1919.

9. Egle L., Rechberger H., Krampe J., Zessner M. Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. Science of the Total Environment. 2016. Vol. 571. P. 522–542.

10. ДСТУ 7369:2013. Стічні води. Вимоги до стічних вод і їхніх осадів для зрошування та удобрювання. Київ : Мінекономрозвитку України, 2013.

УДК 621.311.6

Заводянний В.В., Шпилько О.О.

Херсонський державний аграрно-економічний університет, м.Херсон

СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ: ЯК АКУМУЛЯТОРИ ДОПОМАГАЮТЬ ЗАБЕЗПЕЧИТИ СТАБІЛЬНЕ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Вступ. Сучасна енергетика переживає фундаментальну трансформацію, зумовлену зростанням частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), децентралізацією генерації та підвищенням вимог до надійності електропостачання. В умовах повномасштабної війни в Україні ці процеси набувають особливого значення: цілеспрямовані атаки на енергетичну інфраструктуру спричинили втрату значної частини диспетчеризованих потужностей, а удари по мережах підтримують високий рівень ризику для надійності енергопостачання.

Актуальність теми підкріплена тим, що системи накопичення енергії (СНЕ), зокрема батарейні системи (BESS), можуть стати ключовим інструментом підвищення стійкості енергосистем. Сучасні дослідження

гнучкості енергосистем свідчать, що до 2030 року потреба в гнучких ресурсах (накопичувачі, керування попитом, мережеві рішення) може зрости вдвічі, а до 2050 року — наблизитися до трикратного збільшення порівняно з поточним рівнем. У документах ENTSO-E та Європейської комісії підкреслюється, що без суттєвого розгортання технологій гнучкості інтеграція високих часток змінної генерації з ВДЕ без втрати надійності постачання буде вкрай складною.

Роль систем накопичення енергії в підвищенні надійності електропостачання реалізується через три взаємопов'язані виміри. По-перше, BESS підсилюють операційну стійкість і живучість системи: дають змогу підтримувати електроживлення критичних споживачів у разі пошкодження мереж, скорочують тривалість і масштаб відключень, прискорюють відновлення після аварійних та воєнних подій. По-друге, сприяють посиленню енергетичної самодостатності, дозволивши ефективніше задіювати потенціал сонячної та вітрової генерації, зменшувати залежність від імпортного палива.

По-третє, BESS є важливим інструментом для формування децентралізованої низьковуглецевої та економічно стійкої моделі енергопостачання у довгостроковій перспективі.

Основна частина. Системи накопичення енергії – це комплекси обладнання, призначені для акумулювання електричної енергії з метою її подальшого використання для балансування енергосистеми, забезпечення резервного живлення, згладжування пікових навантажень та інтеграції відновлюваних джерел. Основою промислових накопичувачів є акумуляторні батареї, які забезпечують оборотне перетворення хімічної енергії в електричну. Сучасні BESS здатні забезпечувати регулювання частоти, балансування навантаження та аварійне живлення під час порушень постачання.

Порівняльний аналіз основних типів акумуляторів дозволяє виокремити їхні ключові характеристики. Літій-іонні батареї (Li-ion) є найбільш поширеними у промислових накопичувачах завдяки високій питомій енергії (200–1800 Вт·год/кг), високій ефективності (round-trip efficiency 90–95%) та тривалому терміну служби [1]. Вони забезпечують найкращі показники продуктивності, проте мають найвищу вартість і підвищені вимоги до безпеки. Свинцево-кислотні акумулятори залишаються найдешевшими (LCOS нижчий), але поступаються літій-іонним за питомою енергією, циклічністю та ефективністю; вони працюють у діапазоні температур від -20 до +60°C, мають напругу холостого ходу близько 2,1 В [1]. Натрій-іонні батареї є перспективною альтернативою: вони вирізняються нижчим ризиком займання внаслідок перегрівання, вищою термічною стабільністю та здатністю працювати в екстремальних умовах, а також нижчою вартістю сировини [2]. Основним компромісом залишається об'ємна енергетична щільність - натрій-іонні елементи важчі та фізично більші для зберігання еквівалентного заряду [2].

Будова промислових накопичувачів має кілька ключових компонентів. Акумуляторні модулі об'єднуються в стелажі та контейнери. Система керування

батареями (BMS) є функціонально відокремленим компонентом BESS, що виконує активні функції захисту батареї від режимів роботи, які можуть вплинути на її безпеку або довговічність [3]. BMS забезпечує моніторинг напруги, струму та температури кожного елемента, активне балансування комірок, захист від перезаряду та глибокого розряду, а також передачу даних до системи управління енергією (EMS). Сучасні BMS використовують багатоіндукторні методи активного балансування, що дозволяє враховувати різницю напруг між комірками в реальному часі [3].

Перетворювачі електроенергії (PCS) забезпечують двонаправлене перетворення постійного струму від батарей у змінний струм мережі та навпаки. Сучасні рішення використовують модульні багаторівневі перетворювачі (MMC), які інтегрують накопичувачі з мережею та забезпечують стабільність напруги й частоти [4]. Інтегровані системи поєднують BMS, PCS, EMS, системи терморегулювання та пожежогасіння в єдиному компактному корпусі, що забезпечує швидке розгортання та мінімальну площу встановлення.

Застосування накопичувачів охоплює широкий спектр завдань. Для резервного живлення BESS забезпечують безперебійне постачання критичних об’єктів — лікарень, центрів управління, об’єктів зв’язку. Для балансування навантаження накопичувачі згладжують пікові споживання, знижуючи навантаження на генеруючі потужності. Для стабілізації електромереж BESS надають послуги регулювання частоти, віртуальної інерції та відновлення після аварій. Показовим є приклад розгортання компанією DTEK спільно з Fluence портфеля BESS загальною потужністю 200 МВт та ємністю 400 МВт·год, що включає шість об’єктів у Київській та Дніпропетровській областях. Цей проект, реалізований за 125 млн євро, здатен забезпечити електроенергією 600 тисяч домівок упродовж двох годин і включає функції grid-forming, black-start та віртуальної інерції [5].

Інтеграція акумуляторних систем із відновлюваними джерелами енергії є критично важливою для подолання стохастичності сонячної та вітрової генерації. Накопичувачі згладжують нерівномірність виробництва, забезпечують стабільність у точці приєднання та запобігають перенапругам. В Україні триває активне розгортання BESS для балансування енергосистеми: станом на 2026 рік встановлено системи загальною потужністю понад 500 МВт, створено технічні умови для встановлення ще понад 1000 МВт [7]. Уряд відніс системи накопичення енергії до критичної інфраструктури, що дозволяє посилити їхній захист та підвищити стійкість енергосистеми загалом [8].

Аналіз технічних і економічних переваг СНЕ свідчить про їхню високу ефективність. Ключовими показниками є round-trip efficiency, energy density, cycle life та levelized cost of storage (LCOS). Літій-іонні батареї демонструють найвищу ефективність (RTE 90–95%), тоді як LCOS для різних технологій коливається в межах 0,15–0,30 USD/кВт·год [1]. Основними обмеженнями залишаються висока початкова вартість, обмеження ресурсу циклів, а також вимоги до безпеки. Міжнародний стандарт IEC 62933-5-2:2025 встановлює

вимоги безпеки для BESS, включаючи захист від пожеж, виявлення витоку газів та температурний контроль [6]. Літій-іонні батареї особливо чутливі до температури та потребують спеціальних температурних режимів для безпечної експлуатації.

Перспективи застосування накопичувачів для підвищення енергетичної незалежності України є надзвичайно широкими. Схвалено інвестиційний план на 116,2 млн доларів США в рамках програми Renewable Energy Integration, який передбачає підтримку приватних інвестицій у системи накопичення енергії, включаючи автономні BESS, із додаванням 610 МВт потужності [7]. Це дозволить прискорити інтеграцію енергосистеми України до європейської мережі та підтримати трансформацію енергетичного сектору. Розвиток натрій-іонних технологій, які не потребують літію та кобальту, відкриває шлях до зниження залежності від імпортних матеріалів і підвищення економічної доступності накопичувачів [2].

Висновки. Системи накопичення енергії є критично важливим компонентом сучасної енергетики, це створює стабільність, гнучкість та надійність електропостачання. В умовах воєнних викликів та переходу до відновлюваної енергетики роль BESS набуває стратегічного значення для України. З порівняльного аналізу типів акумуляторів робиться висновок, що літій-іонні технології залишаються найбільш зрілими та ефективними для промислового застосування, тоді як натрій-іонні батареї демонструють значний потенціал як економічно доступна та безпечніша альтернатива. Свинцево-кислотні акумулятори зберігають нішу в бюджетних рішеннях, поступаючись за питомими показниками.

Оцінка значення акумуляторних систем для стабільності електропостачання підтверджує їхню здатність забезпечувати резервне живлення критичних споживачів, балансувати навантаження, регулювати частоту та інтегрувати ВДЕ. Досвід DTEK та Fluence з розгортання 200 МВт/400 МВт·год BESS демонструє практичну ефективність таких систем навіть в умовах воєнних ризиків.

Перспективи подальшого розвитку технологій накопичення енергії пов’язані з удосконаленням BMS та перетворювачів, зниженням вартості акумуляторів, розвитком натрій-іонних та твердотільних технологій, а також розширенням регуляторної підтримки. Для України впровадження СНЕ є не лише технологічним, а й стратегічним завданням, вирішення якого сприятиме енергетичній незалежності, децентралізації та інтеграції до європейського енергетичного простору.

Список використаних джерел

1. Холиддинов И. Х., Бегматова М. М. Системы накопления энергии на основе аккумуляторных батарей в фотоэлектрических системах низковольтных сетей. *Al-Farg‘oniy avlodlari*. 2026. Т. 1, № 1. С. 119–124.

2. Натрій-іонні акумулятори: переваги та недоліки. *Digital Today*. 2026.
3. A modular industrial BMS design for energy storage systems with a novel multi inductor-based active cell balancing hardware. *ScienceDirect*. 2026.
4. Converter Topology to Integrate Battery Storage with Modular Multilevel Converter. *IEEE Xplore*. 2025.
5. Battery Storage Supporting Grid Resilience In Ukraine. *TaiyangNews*. 2026.
6. IEC 62933-5-2:2025. Electrical energy storage (EES) systems – Part 5-2: Safety requirements for grid-integrated EES systems – Electrochemical-based systems. Geneva: IEC, 2025.
7. Denys Shmyhal: Working with Partners to Develop Renewable Energy Programmes — Ukraine's USD 116.2 Million Investment Plan Approved. *Міністерство економіки України*. 2026.
8. Кабмін відніс системи накопичення енергії до критичної інфраструктури. *НафтоРинок*. 2026.

УДК 626.8:504.4:338.49

Кузьмич С.А.
Аспірант спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія,
Інститут водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України, м. Київ

ПОВОЄННЕ ВІДНОВЛЕННЯ ІНЖЕНЕРНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ МЕЛІОРАТИВНИХ СИСТЕМ УКРАЇНИ: ПРАКТИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ТА ПРІОРИТИЗАЦІЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ

Вступ

Воєнні пошкодження, фізичне зношення обладнання, порушення експлуатаційних режимів та зміни клімату зумовлюють необхідність комплексного відновлення меліоративної інфраструктури України. Йдеться не лише про ремонт насосних станцій, каналів, трубопроводів і дренажних мереж, а й про відновлення їхньої функціональної взаємодії, надійності та здатності забезпечувати регулювання водного режиму ґрунтів [1].

Масштаб потреб підтверджує звіт RDNA5[2], у якому потреби відновлення та реконструкції сектору зрошення й водних ресурсів України оцінено у 12,5 млрд дол. США на 2026 - 2035 роки. За таких умов особливої актуальності набуває обґрунтований вибір об'єктів, відновлення яких забезпечить найбільший технічний, агровиробничий та екологічний ефект[3-5].

Метою роботи є: запропонувати практичний алгоритм оцінювання технічного стану меліоративної інфраструктури та визначення черговості її відновлення з урахуванням безпеки, функціональної значущості, економічної доцільності й екологічної стійкості.

Основний текст

Для використання у водогосподарській практиці пропонується послідовність із п’яти етапів:

1. Інвентаризація та визначення безпекових обмежень. Формують реєстр об’єктів із зазначенням їхнього розташування, призначення, власника або балансоутримувача, технічних характеристик, року введення в експлуатацію, наявних пошкоджень і доступності для обстеження. Окремо фіксують мінну небезпеку, ризики повторного ураження, обмеження доступу та інші фактори, які можуть унеможливлювати негайні роботи.

2. Технічна діагностика. Оцінюють стан насосних агрегатів, електротехнічного обладнання, каналів, трубопроводів, регулювальних споруд, засобів автоматизації та контролю. За можливості використовують результати інструментальних обстежень, геодезичних вимірювань, дистанційного зондування Землі та геоінформаційного аналізу. Результати діагностики мають містити опис дефектів, оцінку працездатності та орієнтовний обсяг необхідних робіт.

3. Визначення пріоритетності. Для кожного об’єкта встановлюють оцінки за узгодженими критеріями: технічний стан і аварійність; функціональна значущість для системи; потенційний вплив на сільськогосподарське виробництво; екологічні та водогосподарські ризики; економічна доцільність і готовність до реалізації. Критерії та шкали оцінювання слід визначати до початку експертного ранжування.

4. Вибір технічного рішення. Порівнюють альтернативи: аварійний ремонт, капітальне відновлення, заміну обладнання, реконструкцію або модернізацію з автоматизацією. Порівняння має враховувати не лише початкові капітальні витрати, а й енергоспоживання, витрати на обслуговування, очікуваний строк служби, надійність і можливість адаптації до кліматичних змін.

5. Контроль результатів. Після реалізації проєкту перевіряють досягнення запланованих показників: відновлення працездатності, надійність подачі або відведення води, енергоефективність, скорочення аварійності, площу земель, на яких відновлено можливість регулювання водного режиму, а також екологічні результати.

Для формалізації пріоритетів доцільно застосовувати багатокритеріальний аналіз прийняття рішень (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA або Multi-Criteria Decision Making, MCDM). Як один із можливих варіантів пропонується поєднання методу аналізу ієрархій (AHP) для визначення ваг критеріїв із методом зваженої суми (WSM) для розрахунку інтегрального бала кожного об’єкта. Такий підхід є методичною пропозицією й потребує апробації на фактичних даних конкретних меліоративних систем.

Інтегральний показник пріоритетності об’єкта j можна визначити за формулою:

$$P_j = \sum_{i=1}^{n} w_i x_{ij}$$

де P_j - інтегральний показник пріоритетності j-го об’єкта; w_i - ваговий коефіцієнт і-го критерію, причому сума всіх ваг дорівнює 1; x_{ij} - нормована оцінка j-го об’єкта за і-м критерієм; n - кількість критеріїв.

Для критеріїв, де більше значення означає вищий пріоритет, застосовують відповідне пряме нормування; для критеріїв-витрат, наприклад вартості, необхідно використовувати обернене нормування або окремо визначену шкалу.

Ваги критеріїв можуть бути визначені експертним методом AHP із використанням попарних порівнянь. Узгодженість експертних суджень слід перевіряти за індексом/відношенням узгодженості; значення відношення узгодженості до 0,10 часто використовують як орієнтир прийнятної узгодженості. Водночас остаточні рішення не мають ґрунтуватися лише на інтегральному балі: критичний аварійний стан, загроза життю, мінна небезпека або значний екологічний ризик повинні розглядатися як окремі обов’язкові умови чи обмеження.

Практична реалізація алгоритму передбачає створення цифрового реєстру меліоративної інфраструктури з геопросторовою прив’язкою об’єктів, фотографіями, результатами обстежень, оцінками критеріїв, кошторисами та історією ремонтів. Такий реєстр може стати основою для прозорого формування черг відновлення, підготовки інвестиційних заявок і моніторингу використання коштів. Подібна логіка пріоритизації застосовується, зокрема, в інструменті FAO PRISM, призначеному для оцінювання та ранжування іригаційних схем з метою їх модернізації або реабілітації.

Висновки

1. Повоєнне відновлення інженерної інфраструктури меліоративних систем України потребує системного підходу, який поєднує технічну діагностику, оцінювання функціональної значущості, аналіз ризиків і планування інвестицій.

2. Запропонований п’ятиетапний алгоритм охоплює інвентаризацію та безпекові обмеження, технічну діагностику, багатокритеріальне ранжування, вибір технічного рішення й контроль результатів.

3. Поєднання AHP і WSM може забезпечити відтворювану процедуру визначення пріоритетів за умови прозорих критеріїв, обґрунтованих ваг, нормування показників і перевірки узгодженості експертних оцінок. Запропонований підхід потребує практичної апробації на даних конкретних систем.

4. Цифровий геопросторовий реєстр інфраструктури сприятиме обґрунтованому розподілу ресурсів, простежуваності рішень і моніторингу результатів відновлення.

5. Під час визначення черговості робіт безпекові та критичні аварійні фактори необхідно враховувати як обов’язкові обмеження, а не лише як складові інтегрального рейтингу.

Список використаних джерел

1. L. Kuzmych, "System for Diagnostics of Critical Technical Structures as an Element of Risk Monitoring," *2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Athens, Greece, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/DESSERT61349.2023.10416469.
2. World Bank, Government of Ukraine, European Commission, United Nations. Ukraine Fifth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA5): February 2022 – December 2025. 2026. Available at: https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2026/02/23/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). PRISM: Prioritization of Irrigation Schemes for Modernization. Available at: https://www.fao.org/land-water/resources/tools/software/prism/en
4. Saaty T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research. 1990. Vol. 48, Issue 1. P. 9–26. DOI: https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I
5. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Modernizing irrigation water management. Available at: https://www.fao.org/4/y4525e/y4525e09.html

УДК 621.311:620.92:621.039(477.41)

Скрипниченко Д.А.
Зубенко В.О.
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КРИТИЧНИХ СПОЖИВАЧІВ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АЕС ЗА РАХУНОК СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

Вступ. Надійне електропостачання залишається важливою умовою безпечного утримання Чорнобильської атомної електростанції після припинення виробництва електроенергії. На майданчику продовжують функціонувати системи радіаційного моніторингу, вентиляції, контролю параметрів навколишнього середовища та інженерне обладнання, необхідне для підтримання безпечного стану об’єктів. Особливого значення набуває безперервне живлення систем, від яких залежить контроль радіаційної обстановки та безпечне поводження з радіоактивними матеріалами.

В умовах зростання ризиків пошкодження енергетичної інфраструктури актуальним є пошук додаткових джерел електроенергії, здатних підвищити стійкість енергозабезпечення об’єкта. Одним із перспективних напрямів є використання сонячної генерації, яка дає змогу виробляти електроенергію

безпосередньо на місці споживання та частково зменшувати залежність від зовнішньої електричної мережі. Додатковою перевагою є можливість поєднання фотоелектричних установок із системами накопичення енергії, що дозволяє використовувати вироблену електроенергію в періоди зниження сонячної активності або короткочасних перебоїв у мережі.

Основна частина. Після зупинення останнього енергоблока у 2000 році ЧАЕС перейшла до етапу зняття з експлуатації. При цьому потреба в електроенергії не зникла: вона необхідна для роботи допоміжних систем, освітлення, контролю стану споруд та обладнання. Додатковим джерелом живлення може бути сонячна генерація, якщо її підключення виконано з урахуванням чинної схеми електропостачання, режимів навантаження та вимог ядерної і радіаційної безпеки.

Практичні приклади вже існують. У 2018 році на промисловому майданчику ЧАЕС відкрили сонячну електростанцію Solar Chornobyl встановленою потужністю 1 МВт [1]. У вересні 2026 року на майданчику станції введено в роботу ще одну фотоелектричну установку потужністю 2 МВт. За інформацією ЧАЕС, її очікуване річне виробництво перевищує 2 млн кВт·год, що може покрити близько 5 % споживання електроенергії інфраструктурними об’єктами станції [2]. Ці дані свідчать, що сонячна генерація може виконувати допоміжну роль у забезпеченні потреб промислового майданчика.

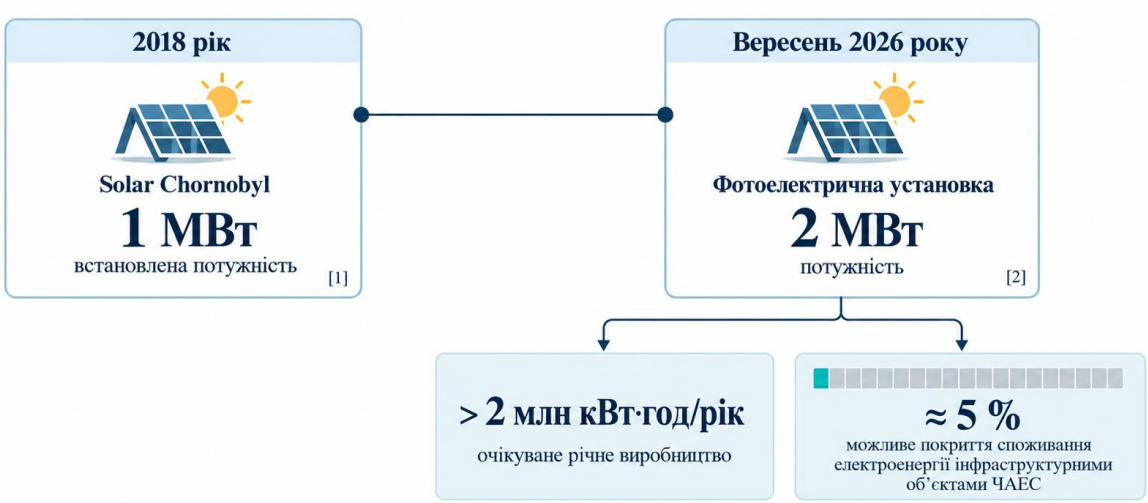


Рисунок 1. Порівняння встановленої потужності двох сонячних установок на промисловому майданчику ЧАЕС.

Для електротехнічної оцінки важливо враховувати, що встановлена потужність не дорівнює фактичному виробітку в кожну годину. Сонячні модулі залежать від освітленості, погодних умов і пори року. Тому фотоелектричну установку доцільно розглядати як додаткове джерело, а не як повну заміну зовнішнього електропостачання чи резервних систем. Перед приєднанням необхідно проаналізувати добові графіки навантаження, пропускну здатність кабельних ліній, параметри трансформаторів, селективність релейного захисту та якість електроенергії.

Одним із можливих напрямів подальшого дослідження є локальна система живлення для визначеної групи критичних споживачів. У такій системі фотоелектричні модулі через інвертор подають електроенергію до розподільного пристрою, а автоматизований захист контролює допустимі режими роботи. За наявності техніко-економічного обґрунтування може розглядатися накопичувач енергії для короткочасного покриття перерв або коливань генерації. Проте конкретна конфігурація має визначатися за результатами обстеження, розрахунків короткого замикання, оцінки автономності й аналізу вимог до безперервності живлення.

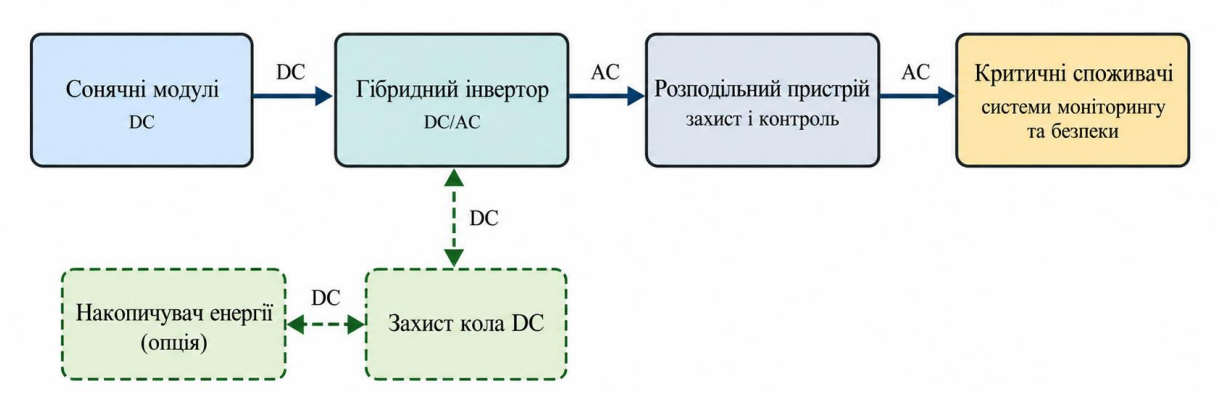


Рисунок 2. Концептуальна схема можливої локальної системи електропостачання критичних споживачів.

Окремою умовою є безпека робіт на території зони відчуження. Розміщення нового обладнання, прокладання кабелів і доступ персоналу мають узгоджуватися з радіаційним контролем, режимом доступу та роботами зі зняття з експлуатації. Сонячна установка не повинна перешкоджати доступу до об’єктів ядерної спадщини, а її електричне приєднання має бути виконане так, щоб відмова одного елемента не створювала додаткової загрози для критичних систем. Отже, ефект від проєкту слід оцінювати комплексно: за надійністю, витратами на електроенергію, ремонтопридатністю та дотриманням безпекових вимог.

Висновки. Досвід Чорнобильської АЕС свідчить про перспективність використання сонячної генерації як додаткового джерела електроенергії для промислового майданчика та критичної інфраструктури. Фотоелектричні установки можуть частково зменшити залежність від зовнішньої електричної мережі та сприяти раціональнішому використанню енергетичних ресурсів. Особливого значення набуває підтримка роботи систем моніторингу, контролю та інженерного забезпечення в умовах перебоїв електропостачання.

Подальший розвиток сонячної генерації потребує технічного обстеження наявних електричних мереж, аналізу структури енергоспоживання та визначення пріоритетних споживачів. Це дасть змогу обґрунтувати потужність фотоелектричних установок, визначити можливості їх підключення до внутрішніх мереж та оцінити внесок у покриття навантаження. Важливим етапом є моделювання режимів електропостачання з урахуванням сезонних коливань генерації, зміни навантаження й аварійних ситуацій.

Перспективним напрямом досліджень є оцінювання доцільності застосування накопичувачів електроенергії та локальних мікромереж для балансування навантаження і підтримки окремих споживачів під час короткочасних порушень зовнішнього живлення. Їх упровадження потребує техніко-економічного обґрунтування, оцінювання надійності обладнання та сумісності з наявними системами електропостачання.

Список використаних джерел

1. Solar Power Plant was officially opened at Chornobyl NPP. ДСП «Чорнобильська АЕС». 08.10.2018.
2. A new photovoltaic power plant has been commissioned at the Chornobyl NPP with the support of UNDP and the Governments of Lithuania and Japan. ДСП «Чорнобильська АЕС». 09.09.2026.
3. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України від 08.02.1995 № 39/95-ВР.
4. Про затвердження Вимог до систем електропостачання, важливих для безпеки атомних станцій : нормативний документ Державної інспекції ядерного регулювання України.

УДК 556.166

Коваленко Р.Ю.,
к.т.н., доцент кафедри гідротехнічного будівництва,
водної та електричної інженерії
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон
kovalenko_r@ksaeu.kherson.ua
Басс Р.Д.,
здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
Херсонський державний аграрно-економічний університет, Херсон

ЗНИЖЕННЯ РИЗИКІВ КАТАСТРОФІЧНИХ ГІРСЬКИХ ПАВОДКІВ ТА ЇХ НАСЛІДКІВ З УРАХУВАННЯМ МІЖНАРОДНОГО ДОСВІДУ

Вступ. Катастрофічні гірські паводки можуть виникати не лише внаслідок інтенсивних опадів, а й через каскадні процеси, коли зсув або обвал спричиняє переміщення великих мас уламкового матеріалу та води. Такі події становлять загрозу населенню, мостам, дорогам, гідроенергетичним і водогосподарським спорудам. Показовим прикладом стала катастрофа 26 серпня 2026 року в прикордонному районі Непалу та Китаю [1, 2]. Метою роботи є аналіз передумов і наслідків цієї події, оцінювання можливостей раннього виявлення небезпеки та обґрунтування превентивних заходів для гірських басейнів України.

Основна частина. Дослідження ґрунтується на аналізі оперативних і науково-аналітичних матеріалів Міжнародного центру комплексного розвитку гірських регіонів (ICIMOD), документів швейцарських органів влади,

Укргідрометцентру, Держводагентства, ДСНС та матеріалів ООН [1–7]. Застосовано аналіз причинно-наслідкових зв'язків у розвитку каскадної катастрофи, порівняльний метод та якісне обґрунтування інженерно-організаційних заходів. Самостійного моделювання паводкової хвилі або інструментальних вимірювань у роботі не виконувалося.

За попереднім науковим узагальненням ICIMOD від 13 жовтня 2026 року, 26 серпня на північному схилі масиву Лангтанг-Лірунг обвалилася льодово-скельна маса орієнтовним об'ємом 132 млн м³. Її падіння у долину Лхенде-Кхола супроводжувалося захопленням води й уламкового матеріалу та формуванням швидкого водно-уламкового потоку, який пройшов системою Бхоте-Коші–Трішулі. За результатами проведеного аналізу встановлено, що катастрофа не була спричинена класичним проривом льодовикового озера. Основним пусковим процесом стало руйнування скельного схилу з льодовиковим покривом, що спричинило подальший розвиток каскадних небезпечних явищ [1]. Станом на 13 жовтня 2026 року в Непалі повідомлялося щонайменше про 1451 загиблого та 5745 зниклих безвісти [1]. Постраждали населені пункти, шляхи сполучення та енергетична інфраструктура. За оцінкою ICIMOD, внаслідок стихійного лиха постраждали 12 діючих і 15 гідроенергетичних проєктів, що перебували на стадії будівництва, загальною встановленою потужністю 901,1 МВт. Водночас це не означає, що всі зазначені об'єкти були повністю зруйновані або втратили свою генерувальну потужність [2].

Важливе значення для оцінювання можливостей завчасного виявлення небезпеки мають результати ретроспективного аналізу супутникових спостережень. За даними радарної інтерферометрії Sentinel-1, у період 7 липня – 24 серпня 2026 року зміщення схилу в напрямку променя радара досягало 40 см [1]. Отже, передаварійні ознаки існували, проте точний час обвалу визначити не вдалося. Серед можливих чинників виникнення обвалу розглядають геологічну нестійкість схилу, деградацію багаторічної мерзлоти та зміни стану льодовика. Водночас остаточний механізм виникнення катастрофи залишається невстановленим [1].

Швидкість розвитку небезпечного процесу суттєво обмежила можливості реагування. За оцінкою ICIMOD, обвал стався близько 08:37 за місцевим часом, а потік досяг прикордонної ділянки приблизно за сім хвилин. SMS-попередження надсилали близько 09:15–09:16, тобто вже після проходження небезпечного потоку [1]. Отже, навіть удосконалення сповіщення після початку обвалу не гарантує достатнього часу для евакуації найближчих поселень. Пріоритетним є виявлення небезпечних схилів до катастрофи, обмеження експозиції населення та заздалегідь визначені маршрути евакуації.

Можливість зменшення людських втрат ілюструє подія у швейцарському селі Блаттен. Після виявлення ознак небезпечних обвальних процесів місцева влада 19 травня 2025 року організувала евакуацію близько 300 жителів. Завдяки завчасно вжитим заходам вдалося суттєво зменшити ризик людських втрат, хоча 28 травня значна частина населеного пункту була зруйнована внаслідок обвалу льодовика Бірх [3]. Приклад підтверджує значення моніторингу, оперативного рішення та евакуації, але не доводить передбачуваності непальського обвалу.

На основі узагальнення міжнародного досвіду та аналізу природних умов Українських Карпат визначено основні напрями запобігання небезпечним гідрологічним процесам і зменшення їхніх наслідків (табл. 1). Запропоновані превентивні заходи потребують подальшого обґрунтування з урахуванням місцевих інженерно-геологічних і гідрологічних умов.

Таблиця 1. Превентивні заходи для гірських басейнів України за результатами порівняльного аналізу

Етап	Виявлений ризик	Запропоновані заходи
До події	Деформації схилів, потенційне перекриття русел	ГІС-інвентаризація небезпечних схилів; супутниковий InSAR та вибірковий геотехнічний контроль
Розвиток процесу	Раптовий сель, підпір і швидке підвищення рівня води	Датчики опадів і рівнів води; контроль мостових звужень; сценарії каскадних паводків
Зменшення втрат	Малий час на евакуацію, ураження мостів і поселень	Зонування забудови; маршрути й тренування евакуації; резервні канали оповіщення

Джерело: розроблено автороми за матеріалами [1, 3–6].

Для України пряме перенесення гімалайського льодовикового сценарію є некоректним. Водночас Українським Карпатам властиві селеві потоки, обвали, зсуви та затори в руслах гірських річок. Укргідрометцентр документує перекриття русел селевими відкладами й підпір води поблизу мостів [4]. Під час паводку 2020 року в західних областях було зруйновано 95 мостів і пошкоджено 213 [5]. Верхів’я Пруту, Черемошу й Тиси доцільно розглядати як території для аналізу цих загроз, але не як місця з доведеною небезпекою катастрофи гімалайського масштабу.

Для зниження ризиків катастрофічних паводків у гірських басейнах України запропоновано комплексну систему превентивних заходів, яка охоплює три взаємопов'язані напрями.

Перший - басейновий скринінг за супутниковими даними, цифровими моделями рельєфу, історією зсувів і розташуванням населених пунктів та об’єктів критичної інфраструктури. Його результатом має бути перелік ділянок для пріоритетного польового обстеження, а не автоматичне оголошення їх небезпечними.

Другий - локальний інструментальний контроль на підтверджених ділянках, передусім поблизу мостових переходів, вузьких долин і водозаборів. Для них необхідно перевіряти не тільки ймовірність паводка, а й сценарій раптового утворення та руйнування природної загати.

Третій - організаційна готовність громад, що передбачає завчасне визначення безпечних зон, розроблення процедур тимчасового обмеження доступу до небезпечних територій та використання альтернативних способів оповіщення населення за відсутності мобільного зв’язку. Комплексне застосування зазначених заходів дає змогу підвищити оперативність реагування та зменшити ризики для населення в умовах стрімкого розвитку селевих потоків.

Результативність таких заходів у подальших роботах доцільно оцінювати за вимірюваними критеріями:

- кількістю та часткою потенційно небезпечних ділянок, на яких здійснюється регулярний моніторинг стану схилів і русел річок;
- часом від виявлення критичного сигналу до рішення про оповіщення;
- часом передачі повідомлення населенню;
- готовністю маршрутів евакуації та доступністю резервних шляхів сполучення.

Без отримання локальних інженерно-геологічних і демографічних даних визначати конкретні порогові значення цих критеріїв передчасно.

Для басейну Тиси практичною основою вже є автоматизована інформаційно-вимірювальна система АІВС «Тиса», що забезпечує спостереження та прогнозування дощових і тало-дощових паводків [6]. Пропонується розглянути можливість її поетапного доповнення геоінформаційним обліком нестійких схилів, моніторингом селевих осередків та окремими сценаріями утворення природних загат. Вибір ділянок для встановлення нових датчиків потребує попереднього інженерно-геологічного обстеження та оцінювання місцевих природних умов. Запропоновані заходи мають рекомендаційний характер і не передбачають визначення конкретних територій як аварійно небезпечних без проведення спеціалізованих досліджень.

Досвід руйнування Каховської ГЕС у 2023 році, попри принципово інше походження катастрофи, додатково засвідчує необхідність завчасного прогнозування зон ураження, резервування критичних систем та організації оповіщення [7]. Порівнювати причини цих подій безпосередньо недоцільно.

Висновки. Аналіз показав, що катастрофа в Непалі стала наслідком каскадного розвитку льодово-скельного обвалу та водно-уламкового потоку. Виявлені після події супутникові ознаки деформації схилу підтверджують потенціал дистанційного моніторингу для раннього визначення небезпечних зон, але не забезпечують точного прогнозу моменту руйнування. Зіставлення з евакуацією у Блаттені свідчить, що зменшення людських втрат насамперед залежить від завчасного виявлення небезпеки, готовності ухвалювати рішення та організованого оповіщення. Для Українських Карпат пріоритетними запропоновано інвентаризацію схилових небезпек, моніторинг можливого перекриття русел, удосконалення АІВС «Тиса» та перевірку евакуаційних планів населених пунктів. Запропоновані заходи сформульовано за результатами якісного порівняльного аналізу. Для визначення їхньої ефективності необхідно провести додаткове моделювання, техніко-економічне оцінювання та перевірку можливості практичного застосування в умовах конкретних водозборів.

Список використаних джерел

1. International Centre for Integrated Mountain Development. Second major Himalayan flood in seven weeks raises alarm over compounding mountain hazards. 13.10.2026. URL: https://www.icimod.org/press-releases/second-major-himalayan-flood-in-seven-weeks-raises-new-questions-about-mountain-risk/ (дата звернення: 13.10.2026).

2. Shrestha A. B., Vaidya R. A. Why climate change is a threat to Nepal's hydropower sector. ICIMOD. 08.09.2026. URL: https://www.icimod.org/article/opinion-why-climate-change-is-a-threat-to-nepals-hydropower-sector/ (дата звернення: 13.10.2026).

3. Conseil fédéral suisse. En signe de solidarité, le Conseil fédéral demande de débloquer une aide d'urgence pour la commune de Blatten. 06.06.2025. URL: https://www.skb.admin.ch/fr/newnsb/wdAvTXcfYkNbjX1zGthj9 (дата звернення: 13.10.2026).

4. Український гідрометеорологічний центр. Селі — що це таке і як утворюються. 02.10.2026. URL: https://www.meteo.gov.ua/ua/news/Seli-shcho-ce-take-i-yak-utvoruutsya (дата звернення: 13.10.2026).

5. Кабінет Міністрів України. Оперативна інформація щодо ліквідації наслідків негоди в Україні. 12.07.2020. URL: https://www.kmu.gov.ua/news/operativna-informaciya-shchodo-likvidaciyi-naslidkiv-negodi-v-ukrayini-12072020 (дата звернення: 13.10.2026).

6. Басейнове управління водних ресурсів річки Тиса. Сучасний стан та перспективи розвитку автоматизованої інформаційно-вимірювальної системи АІВС «Тиса». URL: https://buvrtysa.gov.ua/newsite/?page_id=107 (дата звернення: 13.10.2026).

7. United Nations Environment Programme. Rapid Environmental Assessment of Kakhovka Dam Breach Ukraine, 2023. 2023. URL: https://ukraine.un.org/en/250667-rapid-environmental-assessment-kakhovka-dam-breach-ukraine-2023 (дата звернення: 13.10.2026).

УДК 681.518.5

Рагулін С.В.

Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЦИФРОВИХ БЛИЗНЮКІВ (DIGITAL TWINS) ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД

Вступ. Гідротехнічні споруди (ГТС) великих гідровузлів, судноплавних каналів та захисних комплексів належать до об'єктів критичної інфраструктури з найвищим рівнем техногенно-екологічного ризику. Значна частина масштабних ГТС в Україні експлуатується вже понад пів століття, що в умовах постійного зростання гідродинамічних навантажень та агресивного впливу навколишнього середовища зумовлює прогресуюче зношення їхніх конструктивних елементів [1]. Ситуація суттєво ускладнюється сучасними глобальними кліматичними змінами, які викликають непередбачувані пікові паводки та критичні коливання рівнів води у б'єфах. Традиційні методи натурних інженерно-геодезичних та гідрологічних вишукувань, які проводяться дискретно (періодичними комісіями), не здатні забезпечити безперервний

контроль напружено-деформованого стану (НДС) масивів споруд та процесів фільтрації у їхніх основах [2]. На сучасному етапі розвитку будівельної інженерії виникає гостра потреба у впровадженні інноваційних рішень, головним серед яких є концепція цифрових близнюків (Digital Twins). Метою цього дослідження є обґрунтування методології створення динамічних віртуальних аналогів ГТС на основі інтеграції технологій інформаційного моделювання (BIM) та автоматизованих сенсорних мереж для прогнозування експлуатаційної надійності об'єктів у режимі реального часу.

Основна частина. На відміну від класичних статичних тривимірних моделей, що використовуються виключно на етапі проектування, цифровий близнюк гідротехнічної споруди є складною кіберфізичною системою, яка безперервно еволюціонує та обмінюється даними з реальним об'єктів протягом усього циклу його життєдіяльності. Процес побудови та функціонування такої системи має чітку трирівневу архітектуру, що поєднує інженерні вишукування, інформаційні технології та математичне моделювання.

Перший рівень - геометрично-параметричний - базується на інтеграції технологій BIM (Building Information Modeling) та GIS (Geographic Information Systems). За допомогою комплексних цифрових вишукувань, які включають повітряне лазерне сканування (LiDAR) прилеглої території, повітряне ортофотопланування з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та батиметричну зйомку дна за допомогою багатопроменевих ехолотів, формується надточна хмара точок. Цей масив геометричних даних трансформується в єдину інформаційну модель споруди. Модель містить вичерпну інформацію не лише про зовнішні контури об'єкта, а й про його внутрішню структуру: схеми армування бетонних блоків, розташування дренажних галерей, фізико-механічні характеристики бетону, а також літологічну та стратиграфічну будову ґрунтової основи греблі.

Другий рівень архітектури цифрового близнюка є інформаційно-вимірювальним і складається з розгалуженої мережі автоматизованої контрольно-вимірювальної апаратури (КВП) нового покоління, що працює на принципах промислового інтернет-речей (IoT). Тіло гідротехнічної споруди та зони її контакту з основою насичуються спеціалізованими датчиками. До їхнього складу входять волоконно-оптичні та струнні тензометри, які фіксують найменші внутрішні напруження та деформації у залізобетоні. Також використовуються автоматизовані п'єзометричні системи з цифровими датчиками тиску, які безперервно вимірюють положення кривої депресії, фільтраційні витрати та градієнти напору води в основі й обходах споруди. Для моніторингу просторових зміщень гребеня та секцій греблі щодо скельної основи впроваджуються високоточні інклінометри та роботизовані лазерні тахеометри, які реєструють лінійні та кутові деформації з точністю до десятих часток міліметра.

Третій рівень - аналітичний - є інтелектуальним ядром системи. Отриманий із датчиків масив телеметричної інформації через захищені бездротові канали зв'язку безперервно транслюється на хмарну платформу цифрового близнюка. Тут функціонує динамічна математична модель споруди,

реалізована методом скінченних елементів (МСЕ). Алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання (Machine Learning) здійснюють миттєве порівняння фактичних відгуків конструкції під дією поточного гідростатичного й термічного навантаження з теоретично розрахованими еталонними сценаріями [3].

Головна перевага впровадження цієї технології полягає у можливості виявлення латентних (прихованих) деструктивних процесів на мікрорівні, задовго до того, як вони стануть помітними під час стандартного візуального огляду об'єкта людиною. Наприклад, якщо алгоритм ШІ фіксує локальне аномальне зростання фільтраційного тиску у поєднанні з незначним термічним розширенням бетону, система автоматично ідентифікує ризик зародження підземної суфозії (винесення часток ґрунту водою) або утворення мікротріщин у підошві греблі. Крім того, цифровий близнюк володіє функцією прогностичного моделювання за принципом «що, якщо?». Це дозволяє операторам віртуально імітувати критичні позаштатні ситуації, такі як катастрофічний паводок забезпеченістю 0,01% або сейсмічний поштовх інтенсивністю до 7–8 балів за шкалою MSK-64, та заздалегідь оцінювати стійкість конструкції до таких впливів.

Висновки. Дослідження підтверджує, що застосування технологій Digital Twins у практиці експлуатації та вишукувань гідротехнічних споруд забезпечує фундаментальний перехід від реактивного управління (ліквідації наслідків руйнувань або аварій) до проактивного управління ризиками. Завдяки безперервному автоматизованому аналізу напружено-деформованого стану та фільтраційних процесів, інтеграція цифрових близнюків дозволяє знизити ймовірність раптових гідродинамічних аварій на 30–35%. Разом із цим досягається висока економічна ефективність: витрати на проведення капітальних ремонтів та реконструкцій ГТС оптимізуються щонайменше на 20% за рахунок точного локального виявлення дефектних ділянок та проведення точкових превентивних відновлювальних робіт ще на ранніх стадіях деградації матеріалів конструкції. Впровадження таких рішень є стратегічно важливим кроком для створення єдиної цифрової системи безпеки водогосподарського комплексу.

Список використаної літератури

1. ДБН В.2.4-5:2012. Гідротехнічні споруди. Основні положення проектування. Київ: Мінрегіон України, 2012. 94 с.
2. Громов В. О., Коваленко О. М. Застосування BIM-технологій при проектуванні та експлуатації об'єктів гідроенергетики. Гідротехнічне будівництво. 2021. № 4. С. 12–18.
3. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Risk in the Science of Science. Digital Twin Technologies. Springer, Cham, 2017. P. 85–113.

621.382.2/.3

Литвиненко В.М., Гаркуша В.О.
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

РОЗРОБКА АНАЛОГОВОГО СЛУХОВОГО АПАРАТА

Вступ. Слухові апарати – прилади, які сміливо можна назвати чудом сучасної техніки та технології. Вони являють собою невеликі витончені пристрої, які виконують завдання, яке дає їм свою назву. Слухові апарати допомагають людині почути, але вони не відновлюють слух. Якщо у людини втрата слуху в обох вухах, фахівець із слухопротезування, швидше за все, порекомендує носити два слухові апарати, по одному на кожне вухо. Це забезпечить кращу подачу звукових сигналів до вашого мозку.[1]

На ринку представлені два ключові напрями в технологіях слухових апаратів - аналогові та цифрові. Різниця між ними полягає у способі обробки звукового сигналу. Аналогові апарати посилюють усі звуки однаково, не поділяючи мову та шум. Основні переваги аналогових слухових апаратів полягають у їхній надійності та стабільній роботі. Вони не вимагають складного налаштування, що робить їх зручними для людей похилого віку. Особливо часто такі апарати рекомендують при початковій або помірній приглухуватості, коли немає потреби у складній фільтрації звуку. Цифрові слухові апарати, своєю чергою, використовують процесор для аналізу вхідного звуку. Пристрій не просто посилює звук, а вибирає, які частоти посилювати, які приглушувати, як обробляти мову. Це особливо важливо в шумній обстановці - цифрова модель здатна «зрозуміти», де голос, а де шум фону, і адаптувати звучання в реальному часі.

Основна частина. На рис. 1 наведено принципову схему конструкції слухового апарату.

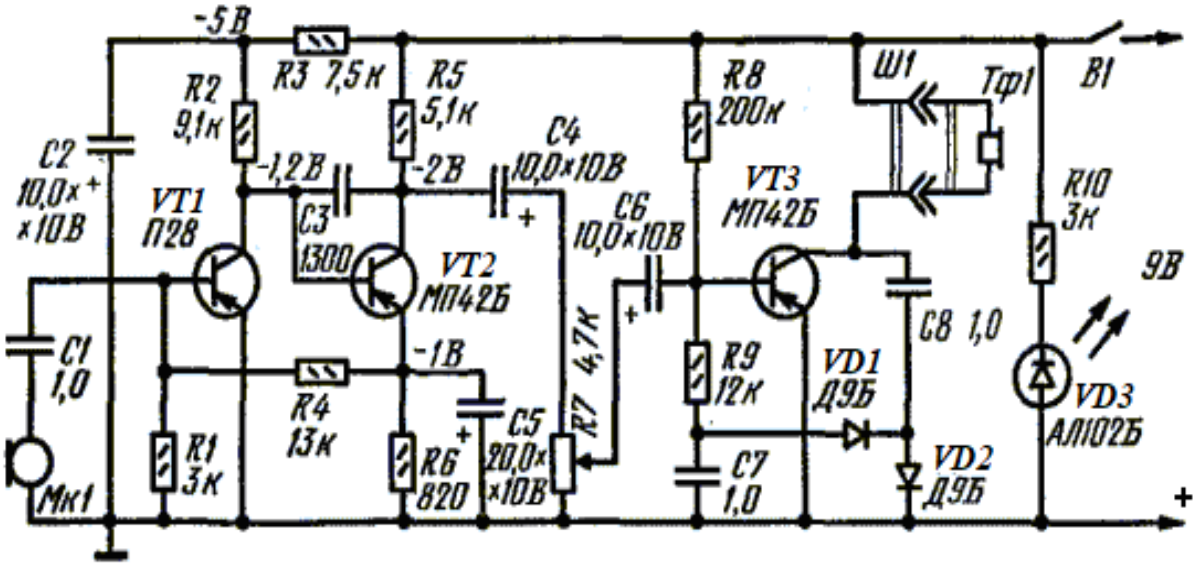


Рис.1. Принципова схема слухового апарата

Підсилювач слухового апарату трикаскадний. Перші два каскади охоплені негативним зворотним зв'язком по постійному струму з метою стабілізації коефіцієнта посилення [2, 3]. Частотна характеристика області верхніх частот має завал, що здійснюється включенням конденсатора С3 між колектором і базою транзистора VT2. З колектора транзистора VT2 сигнал надходить на потенціометр R7, що виконує роль регулятора посилення. Кінцевий каскад зібраний за схемою підсилювача з робочою точкою, що плаває, що дозволяє різко зменшити струм, споживаний каскадом в режимі мовчання. Світлодіод VД3 є індикатором включення. Слуховий апарат зібраний у пластмасовому корпусі з внутрішнім розміром 82 х 56 х 22 мм. Підсилювач змонтований на друкованій платі із фольгованого гетинаксу або склотекстоліту. На платі кріплять також регулятор посилення та мікрофон. Мікрофон обгортають поролоном і на тонкій гумці підвішують у вікні, вирізаному в платі. Стінки мікрофона не повинні торкатися плати та корпусу слухового апарату. Усі застосовані в схемі резистори - МЛТ - 0,125. Як регулятор посилення використаний резистор типу СП3-3а (наприклад, регулятор гучності транзисторного приймача). Електролітичні конденсатори С2, С4, С5, С6 типу К50-6. Конденсатор С3 типу КЛС або КМ-4а. Конденсатори С1, С7, С8 типу КМ-6а, вони можуть бути замінені на електролітичні конденсатори того ж номіналу К50-6 або інші, причому, щоправда, доведеться змінити рисунок друкованих провідників. Діоди VD1-VD3 – серії Д9 або Д2 з будь-яким буквеним індексом. У слуховому апараті застосований електромагнітний мікрофон від серійного апарату БК-2 (601). Телефон – типу ТМ-3 або ТМ-4. Живиться слуховий апарат від батареї "Крона" напругою 9 В. Налагодження підсилювача слухового апарату починають з установки режимів роботи транзисторів VT1 і VT2 по постійному струму резисторами R4 і R6, потім резистором R8 при відключеному мікрофоні встановлюють струм спокою кінцевого каскаду, що дорівнює 2-2,5 мА. На базу транзистора VT3 з генератора подають сигнал частотою 1000 Гц та амплітудою, що відповідає максимальній амплітуді сигналу на колекторі транзистора VT3. Резистором R9 домагаються неспотвореного посилення сигналу. При цьому струм колектора транзистора повинен мати величину 15-17 мА. Налагодження перших двох каскадів змінного струму зводиться до підбору ємності конденсатора С3 за найбільш приємним звучанням та відсутністю різких "металевих" звуків.

Висновки. Розроблено аналоговий слуховий апарат. Пристрій має високу надійність, простий в обслуговуванні, має порівняно невисоку вартість.

Список використаних джерел

1. Боярчук О. Д. Анатомія, фізіологія и патологія органів слуху та мови. Навчальний посібник. Луганськ: «Альма-матер», 2008. 175 с.
2. Гамола О.Є., Коруд В.І., Стахів П.Г. Основи електроніки з основами мікроелектроніки. Підручник. Львів: «Магнолія 2006», 2026. 225с.
3. Матвієнко М.П. Основи електроніки. Підручник. Київ: Ліра, 2017. 364с.

УДК 621.314

Байдак Ю.В., Гаврилов В.О., Шкроб Д.В.
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНК ФАЗИ РОЗПОДІЛЬЧОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Вступ. Розподільчі трансформатори є невід'ємною складовою систем електропостачання, що забезпечують перетворення електричної енергії з одного рівня напруги на інший. Незважаючи на високі значення коефіцієнта корисної дії, навіть незначні втрати потужності в окремому трансформаторі за тривалого періоду експлуатації формують суттєві втрати електроенергії в масштабах електричної мережі. Тому підвищення енергоефективності трансформаторного обладнання потребує вдосконалення конструктивних рішень, методів проєктування та розрахунку його робочих режимів.

Під час роботи трансформатора електричні втрати в обмотках і магнітні втрати в осерді спричиняють нагрівання активної частини. Відведення теплоти від обмоток і магнітопроводу здійснюється через теплопровідність конструктивних елементів і конвекцію охолоджувального середовища. У трансформаторах із природною масляною системою охолодження інтенсивність тепловідведення значною мірою визначається рухом масла, його фізичними властивостями та геометрією каналів між обмотками, магнітопроводом і стінками бака.

Особливої уваги потребує тепловий режим ізоляції обмоток, оскільки тривале перевищення допустимої температури прискорює її старіння та скорочує строк служби трансформатора. З метою запобігання перегріванню на етапі проєктування передбачають певні конструктивні резерви, що можуть збільшувати матеріаломісткість і вартість обладнання. Водночас фактичний графік навантаження нерідко характеризується тривалими періодами недовантаження, за яких теплова потужність, що виділяється в активній частині, є нижчою за розрахункову для номінального режиму.

Відтак, актуальним завданням є вдосконалення методів теплового розрахунку розподільчих трансформаторів з урахуванням реальних процесів теплообміну конвекцією. Застосування математичного моделювання та числових методів дає змогу визначати розподіл температури в конструктивних елементах, оцінювати ефективність охолодження й обґрунтовувати вибір електромагнітних і теплових навантажень трансформатора.

Основна частина. Під час проєктування трансформатора необхідно враховувати взаємозв'язок між електромагнітними процесами та тепловим станом активної частини. Основними джерелами тепловиділення є втрати холостого ходу в магнітопроводі та втрати навантаження в обмотках. Перші зумовлені процесами перемагнічування осердя, а другі переважно пов'язані з активним опором обмоток і зростають зі збільшенням струму навантаження. У результаті формується неоднорідне температурне поле, яке залежить від

розподілу втрат, конструкції обмоток, властивостей ізоляції та умов охолодження.

Традиційні інженерні методи визначення температурного стану трансформатора значною мірою ґрунтуються на емпіричних залежністях і спрощених теплових схемах. Такі підходи зручні для попередніх розрахунків, проте не завжди дають змогу відтворити локальні температурні максимуми в каналах обмоток і ділянках, де рух охолоджувального середовища ускладнений конструктивними елементами. Саме тому перспективним напрямом є використання числового моделювання процесів теплопровідності та конвекції. На рис.1 наведено розрахункову модель фази трансформатора.

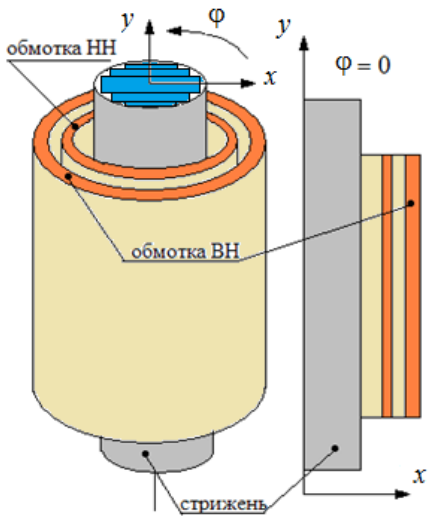


Рис.1. Ескіз фази трансформатора у полярних координатах

Як зазначено в наданому дослідженні, для адекватного визначення температурного поля трансформатора необхідно попередньо розрахувати поле швидкостей охолоджувального масла. Це пояснюється тим, що теплообмін конвекцією залежить не лише від температури, а й від характеру руху рідини, її густини, теплоємності, теплопровідності та в'язкості. У разі природної циркуляції нагріте масло переміщується вгору, а охолоджене опускається, утворюючи циркуляційний потік, який забезпечує відведення теплоти від обмоток і магнітопроводу.

Математична модель теплообміну має враховувати рівняння збереження маси, кількості руху та енергії. Для опису руху масла використовують рівняння гідродинаміки, зокрема рівняння Нав'є—Стокса, а для визначення температурного поля — рівняння енергії з урахуванням перенесення теплоти конвекцією та теплопровідністю. У загальному вигляді рівняння перенесення теплоти для рухомого середовища у прямокутній системі координат можна записати так:

$$u\frac{\partial\theta}{\partial x}+\nu\frac{\partial\theta}{\partial y}=\frac{\lambda}{\rho c_p}\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}\right)-\frac{\bar{\bar{\gamma}}}{\rho c_p}:(\nabla\cdot\bar{v}),$$

де ρ — густина охолоджувального середовища, кг/м³; c_p— питома теплоємність

за сталого тиску, Дж/(кг·К); θ — температура, К; (t) — час, с; u,ν — вектори швидкості руху масла по горизонталі та вертикалі, відповідно, м/с; λ — коефіцієнт теплопровідності середовища переносу теплоти, Вт/(м·К).

Наведене рівняння відображає основні механізми перенесення теплоти: зміну температури в часі, перенесення енергії потоком охолоджуючого масла

конвекцією, теплопровідність і внутрішні джерела витоку тепла. Для реального трансформатора необхідно також задавати геометрію активної частини, властивості матеріалів, граничні та початкові умови. У разі моделювання природної конвекції, рівняння тепло перенесення розв'язують у взаємозв'язку з рівняннями руху масла, оскільки температурні зміни впливають на густину рідини та інтенсивність циркуляції. На рис.2 наведено дані розрахунку теплообміну у фазі трансформатора з радіальною симетрією і з урахуванням руху охолоджуючого масла.

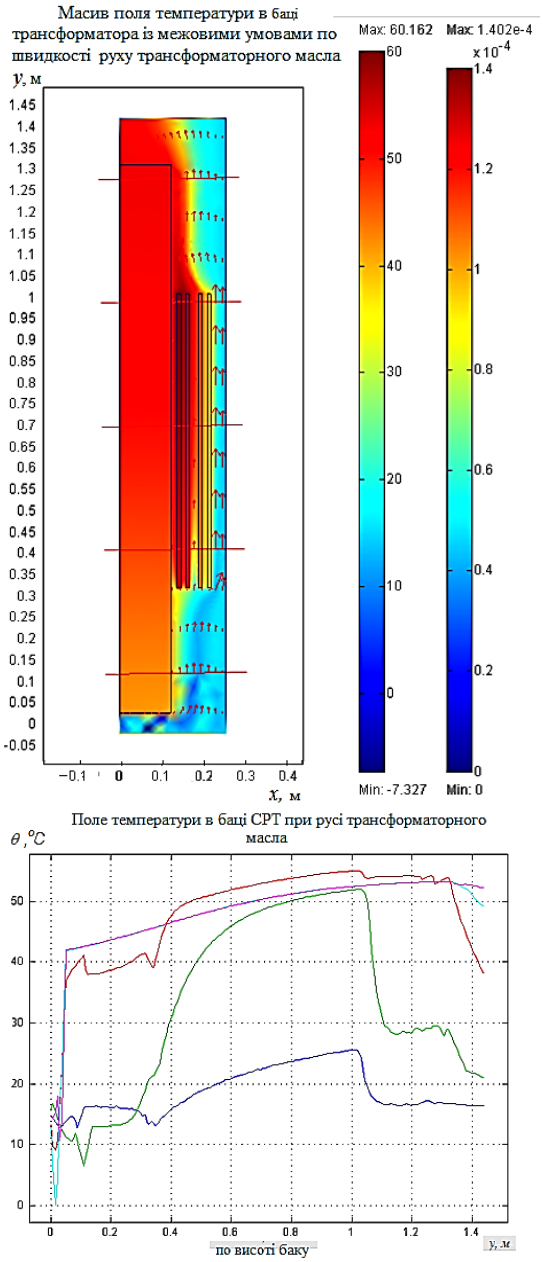


Рис.2. Результати розрахунку розподілу поля температури стрижня магнітної системи, обмоток фази і трансформаторного масла в СРТ типу ТМ 1000/10 із урахуванням швидкості руху масла і п'ять ліній екструзії по горизонталі

У наданій статті розглянуто застосування числового моделювання для трансформатора з масляним охолодженням, зокрема дослідження температурного поля обмоток, магнітопроводу й масла в каналах охолодження. Розрахункова модель враховує геометричні особливості активної частини та природну циркуляцію масла. Порівняння результатів різних підходів, наведених авторами дослідження, демонструє важливість урахування руху охолоджувального середовища та неоднорідності температурного поля. За результатами розглянутого прикладу розбіжність між окремими методами оцінювання температури обмоток могла перевищувати 20 %, тоді як порівняння польового методу з розрахунком за рівняннями теплового балансу давало кращу збіжність.

Отже, нехтування гідродинамічними процесами може призвести до неправильної оцінки температурного стану трансформатора, а відповідно — до необґрунтованого вибору густини струму в обмотках, магнітної індукції в осерді та параметрів системи охолодження. Це особливо важливо під час оптимізації конструкції, коли

потрібно забезпечити необхідний тепловий запас без надмірного збільшення габаритів, маси й вартості обладнання.

Практичне значення вдосконаленого теплового розрахунку полягає також у можливості врахування фактичних графіків навантаження. За змінного електроспоживання втрати в обмотках змінюються відповідно до струму, тоді як втрати холостого ходу за незмінних умов живлення залишаються відносно сталими. Тому для трансформаторів, що працюють із тривалим недовантаженням, важливо оцінювати не лише максимальну температуру за номінального режиму, а й тепловий стан упродовж характерних інтервалів експлуатації.

Використання результатів теплового моделювання разом із даними про навантаження дає змогу обґрунтовано визначати доцільність застосування трансформатора іншої номінальної потужності, оптимізувати систему охолодження та оцінювати можливість зниження матеріаломісткості конструкції. При цьому зменшення потужності обладнання не повинно порушувати вимоги до надійності електропостачання, допустимого нагрівання ізоляції, перевантажувальної здатності й перспективного зростання споживання.

Таким чином, поєднання математичного моделювання теплових процесів із аналізом режимів навантаження є важливою передумовою підвищення енергоефективності трансформаторного обладнання. Такий підхід сприяє точнішому визначенню температурних максимумів, раціональному вибору конструктивних параметрів і зменшенню ризику передчасного старіння ізоляції.

Висновки

Підвищення енергоефективності розподільчих трансформаторів потребує вдосконалення методів теплового розрахунку з урахуванням реальних процесів теплообміну в активній частині. Визначення температурного поля лише за спрощеними емпіричними залежностями не завжди дає змогу врахувати неоднорідність нагрівання та особливості руху охолоджувального масла.

Застосування числового моделювання на основі рівнянь гідродинаміки й тепло перенесення дає змогу досліджувати взаємозв’язок між швидкістю циркуляції масла, розподілом втрат потужності та температурою обмоток і магнітопроводу. Урахування цих чинників створює передумови для підвищення точності теплових розрахунків, оптимізації конструкції трансформатора й обґрунтованого вибору параметрів системи охолодження.

Перспективним напрямом подальших досліджень є поєднання теплового моделювання з аналізом фактичних графіків електроспоживання. Це дасть змогу підвищити обґрунтованість вибору номінальної потужності трансформаторів, скоротити експлуатаційні втрати та забезпечити належну надійність електропостачання.

УДК 621.311.245:631.674

Зубенко В.О., Шолух К.В.
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ ЗРОШУВАЛЬНИХ СИСТЕМ ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК У РОЗПОДІЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ

Вступ. Насосні станції зрошувальних систем належать до найбільш енергоємних об'єктів гідротехнічного будівництва та агропромислового комплексу півдня України. Відновлення зрошення в регіоні після руйнування Каховського гідровузла у 2023 р. потребуватиме не лише відбудови гідротехнічних споруд, а й надійного та економічного електропостачання насосного обладнання. Енергетична стратегія України передбачає збільшення частки відновлюваних джерел енергії в енергобалансі держави [1], а південні області мають один із найвищих в Україні вітроенергетичних потенціалів [2]. Це робить доцільним розміщення вітроенергетичних установок (ВЕУ) безпосередньо поблизу насосних станцій.

Водночас розподільні мережі 6–35 кВ проєктувалися для однонаправленого потоку потужності від центру живлення до споживачів. Приєднання до них ВЕУ змінює потокорозподіл, спричиняє підвищення напруги в точці приєднання, реверсивні перетоки потужності та зміну втрат електроенергії [3, 4]. Вимоги до приєднання генерувальних установок встановлено Кодексом систем розподілу [5], а показники якості напруги – ДСТУ EN 50160 [6].

Метою роботи є оцінка впливу ВЕУ, приєднаної до шин насосної станції зрошувальної системи, на режим розподільної мережі 10 кВ та обґрунтування заходів щодо підвищення ефективності такої інтеграції.

Основна частина. Для аналізу прийнято розрахункову модель (рис. 1): насосна станція потужністю 1,6 МВт ($\cos\varphi = 0{,}88$) отримує живлення від шин 10 кВ підстанції 35/10 кВ по повітряній лінії АС-95 довжиною 10 км ($r_0 = 0{,}306$ Ом/км, $x_0 = 0{,}38$ Ом/км). До шин насосної станції приєднано ВЕУ номінальною потужністю 1,5 МВт.

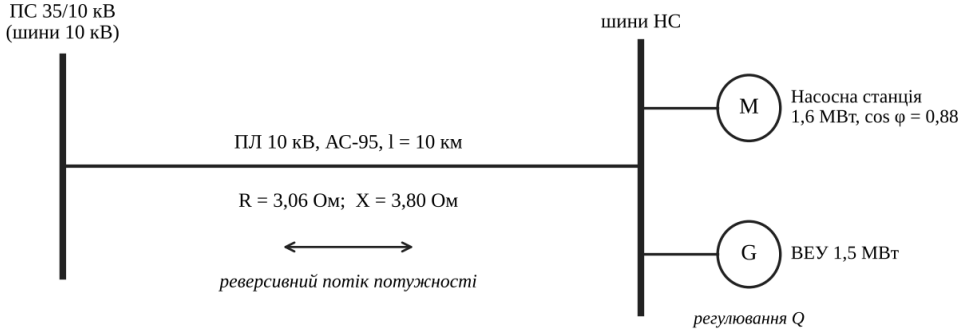


Рис. 1. Розрахункова схема приєднання ВЕУ до розподільної мережі 10 кВ

Відхилення напруги на шинах насосної станції та втрати активної потужності в лінії визначено за відомими співвідношеннями $\Delta U = (P \cdot R + Q \cdot X)/U_{ном}$ та $\Delta P = (P^2 + Q^2) \cdot R/U_{ном}^2$, де P і Q – активна та реактивна потужності, що передаються лінією [4]. Розглянуто п’ять характерних режимів роботи; результати розрахунку наведено в табл. 1 та на рис. 2 (додатне значення ΔU відповідає зниженню напруги, від’ємне – її підвищенню відносно шин центру живлення).

Таблиця 1

Результати розрахунку режимів розподільної мережі

Режим	Характеристика режиму	ΔU, %	ΔP, кВт
1	Насосна станція працює, ВЕУ відсутня	8,2	101,2
2	Насосна станція працює, ВЕУ 1,5 МВт, cos φ = 1	3,6	23,1
3	Режим 2 + видача ВЕУ реактивної потужності 0,6 Мвар	1,3	2,4
4	Насоси вимкнено, ВЕУ видає 1,5 МВт у мережу, cos φ = 1	−4,6	68,9
5	Режим 4 + споживання ВЕУ реактивної потужності 0,45 Мвар	−2,9	75,1

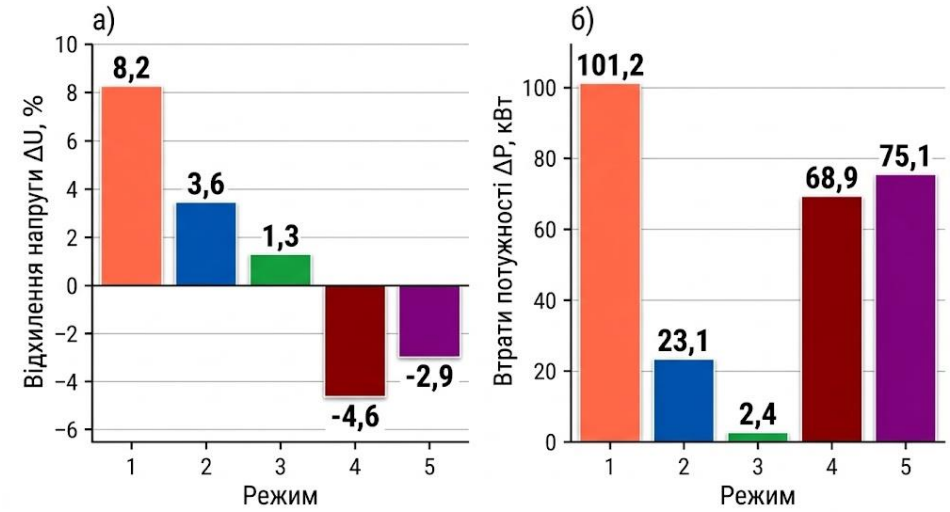


Рис. 2. Відхилення напруги на шинах насосної станції (а) та втрати потужності в лінії 10 кВ (б) для режимів 1–5

Аналіз результатів показує, що за відсутності ВЕУ (режим 1) втрата напруги в лінії становить 8,2 %, а втрати потужності – понад 100 кВт, тобто близько 6 % потужності навантаження. Покриття потреб насосної станції генерацією ВЕУ в місці споживання (режим 2) зменшує втрати потужності у 4,4 раза, а втрату напруги – до 3,6 %. Якщо додатково використати здатність інвертора ВЕУ видавати реактивну потужність (режим 3), лінія практично розвантажується: втрати знижуються до 2,4 кВт, а відхилення напруги – до 1,3 %.

Інша ситуація виникає, коли насоси не працюють, а ВЕУ видає всю потужність у мережу (режим 4). Напрямок потоку змінюється на протилежний, і напруга на шинах насосної станції підвищується на 4,6 %. Споживання ВЕУ реактивної потужності (режим 5) зменшує це підвищення до 2,9 %, але дещо

збільшує втрати. Тому регулювання реактивної потужності за характеристикою Q(U) доцільно застосовувати саме для обмеження підвищення напруги, а не як постійний режим.

За середньорічної швидкості вітру на висоті осі вітроколеса 6,5 м/с (розподіл Релея) та типової характеристики потужності орієнтовне річне вироблення ВЕУ 1,5 МВт становить близько 3,3 млн кВт·год (коефіцієнт використання встановленої потужності ≈ 25 %) [3]. Проте поливний сезон (квітень – вересень) припадає на період зі зниженою вітровою активністю, тому значна частина енергії видаватиметься в мережу в міжполивний період (режими 4–5) і може реалізовуватися відповідно до Закону України «Про альтернативні джерела енергії» [7].

Ефективність інтеграції ВЕУ можна підвищити за рахунок узгодження роботи насосної станції з генерацією. Регулюючі ємності зрошувальної системи (басейни добового регулювання, водосховища, канали) дозволяють запасати воду в години високої генерації ВЕУ й таким чином виконують функцію накопичувача енергії. Застосування частотно-регульованих електроприводів насосів дає змогу плавно змінювати споживану потужність відповідно до вироблення ВЕУ, а автоматизоване керування насосними агрегатами – збільшити частку енергії, що споживається в місці виробництва.

Висновки. Приєднання ВЕУ до шин насосної станції зрошувальної системи є ефективним енергозберігаючим рішенням: у розглянутому прикладі втрати потужності в розподільній лінії 10 кВ знижуються з 101 до 23 кВт, а з регулюванням реактивної потужності – до 2,4 кВт. Основним обмеженням є підвищення напруги в режимах видачі потужності в мережу, яке ефективно компенсується регулюванням реактивної потужності інвертора ВЕУ. Узгодження роботи насосів із генерацією ВЕУ за рахунок регулюючих ємностей зрошувальної системи та частотного регулювання електроприводів дозволяє збільшити власне споживання виробленої енергії та зменшити навантаження на розподільну мережу.

Список використаних джерел

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» : схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 № 605-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-р (дата звернення: 14.10.2026).

2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С. О. Кудрі. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020.

3. Manwell J. F., McGowan J. G., Rogers A. L. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2009.

4. Masters G. M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2013. 712 p.

5. Про затвердження Кодексу систем розподілу : Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 310. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18 (дата звернення: 14.10.2026).

6. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014.

7. Про альтернативні джерела енергії : Закон України від 20.02.2003 № 555-IV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15 (дата звернення: 14.10.2026).

УДК 628.35:628.5

Коршманюк К.А., Кравченко В.І.

Херсонський державний аграрно-економічний університет

УТИЛІЗАЦІЯ ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД КОМУНАЛЬНИХ ОЧИСНИХ СПОРУД ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

Вступ. Наразі в Україні для очищення стічних вод використовуються каналізаційні очисні споруди (КОС), зокрема у м. Кропивницькому, експлуатація яких не передбачає використання осадів стічних вод (ОСВ). Поводження з такими відходами є однією з найбільш серйозних проблем у сфері управління стічними водами.

Сьогодні основним способом утилізації ОСВ є захоронення на мулових майданчиках. Використання таких майданчиків для їх захоронення є традиційним, але застарілим та нераціональним способом поводження з осадом. Такі об’єкти є серйозною екологічною проблемою в Україні і світі, оскільки виводять з обороту значні площі земель та створюють екологічну небезпеку навколишньому середовищу, виділяючи такі забруднюючі речовини як метан, сірководень, оксид азоту, аміак тощо [1].

Відповідно до закону України “Про водовідведення та очищення стічних вод” 2887-IX, підприємства, що здійснюють водовідведення зобов’язані вживати заходи до повторного використання очищених стічних вод та ОСВ за умови мінімізації їх негативного впливу на навколишнє середовище та дотримання нормативів якості очищених стічних вод та ОСВ, що спрямовуються на повторне використання.

Основна частина. Одним із найбільш радикальних методів утилізації мулових осадів є термічний, технологічна реалізація якого дозволяє не тільки забезпечити вимоги до охорони природного середовища, а і використовувати енергетичну складову ОСВ [2].

Перспективним та рентабельним способом переробки осадів може стати використання ОСВ у суміші з іншими біовідходами (наприклад, опалого листя) для виготовлення біопаливних композитних пелет або брикетів з покращеними фізичними та енергетичними характеристиками [3].

Для проведення експериментальних досліджень по виготовленню композитного палива на основі ОСВ, обласним комунальним виробничим підприємством «Дніпро-Кіровоград» в м. Кропивницький було надано осади з

мулових майданчиків. Через високу вологість матеріалу, перед їх виготовленням здійснювалась підготовка сировини шляхом термічної та механічної обробки. Для досліджень використовувалося опале листя з порід дерев, зібране в парковій зони міста.

При експериментальних дослідженнях виготовлення пелет з ОСВ та їх суміщі з опалим листям, застосовувалася наступна технологічна послідовність:

- збирання ОСВ та опалого листя, відокремлення від них металевих та сторонніх предметів;
- підсушування ОСВ та опалого листя;
- здрібнення ОСВ та опалого листя;
- підготовка суміші компонентів ;
- пресування у закриту матрицю;
- дослідження поверхні пелет;
- визначення зольності виготовлених пелет.

Для виготовлення пелет з опалого листя та ОСВ використовували експериментальну пресову установку, загальний вигляд якої показано на рисунку 1*а*. Обладнання експериментальної установки дозволяє виконувати випробування на стиск при максимальному навантаженні 50 кН.





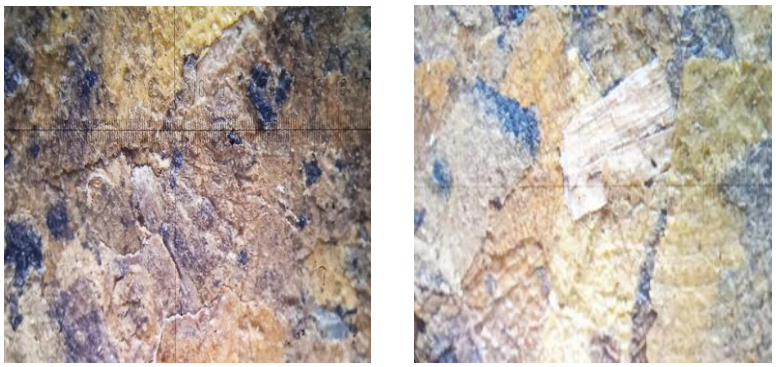
а *б*

Рисунок 1 *а* – Загальний вигляд пресового обладнання з прес-формою і пуансоном d = 16 мм; *б* - Загальний вигляд зразка гранули, виготовленого з мулових ОСВ та опалого листя

За результатами експериментів по виготовленню композитного палива із суміші опалого листя і мулових осадів в різних пропорціях утворювалися зразки пелет з достатньо гладкою поверхнею **(**рис. 1*б*)**,** що мали щільність більше 1,0 г/см^3 .

Результати фрактографічних досліджень показали, що з підвищенням щільності пелет (при кінцевих тисках 130 і 217 МПа) відстань між часточками на поверхні зменшується у напрямку від 0,08 мм (рис. 2*а*) до 0,02 мм (рис. 2 б). Зменшення кількості наявних меж між часточками свідчить про підвищення щільності і міцності зразків, виготовлених з більш високим тиском.

Зольність композитних пелет зростає при збільшенні в них вмісту осаду і, наприклад, при зміні концентрацій опалого листя клену і ОСВ-1 від 90/10% до 50/50% зольність збільшується від 16,7% до 18%. Зольні залишки після згоряння композитних пелет з мулових осадів та опалого листя (при температурі $\leq 800\ ^0$ С) мали крихку структуру і при незначних зусиллях легко руйнувалися з переходом у гетеродисперсний стан.



а *б*

Рисунок 9 – Фото структури поверхні зразків композитних пелет:
а – зовнішня поверхня зразка, виготовленого з листя клену на ситі №1 і ОСВ-3 з кінцевим тиском 130,5 МПа; б – те ж з кінцевим тиском 217,5 МПа

Висновки. Виготовлені зразки композитних пелет із сумішей опалого листя та мулових осадів зі складом в межах відношень концентрацій 90/10-50/50 при кінцевих тисках пресування 130,5 і 217,5 МПа мали якісну фактуру та високу щільність: відповідно 1050 і 1170 кг/м^3.

Зольність композитних пелет з сумішей опалого листя клену та мулових осадів в межах відношень їх концентрацій 90/10-50/50 збільшувалася зі збільшенням вмісту осадів і складала відповідно 15,7-29,2% .

Теплота згоряння пелет розраховувалася за відомими методиками та з урахуванням отриманих експериментально величин зольності і для пелет з : опалого листя клена, тополі; мулових осадів, сумішей опалого листя клену та мулових осадів в межах відношень їх концентрацій 90/10-50/50 складала відповідно 16,4; 19,9; 19,54; 16,7-18,0 МДж/кг.

Результати проведених експериментальних досліджень можна розглядати як оціночні, зважаючи на широкий спектр вихідних характеристик опалого листя, мулового осаду стічних вод, способів їх підготовки до пресового виготовлення біопаливних пелет, зокрема композитних.

Виготовлення композитних пелет з комунальних відходів в частині мулових осадів стічних вод та опалого листя пропонується розглядати як перший етапу для наступної їх термічної утилізації.

Список використаних джерел

1. Зоріна О.В., Маврикін Є.О. Сучасні підходи до обробки та утилізації вторинних осадів господарсько-побутових стічних вод //Водні ресурси. Меліорація і водне господарство. 2021. № 2. С. 55-68.

2. Бабаєв В.М., Панов В.В., Хайло Я.М., Волков В.М., Горох М.П. Альтернативні технологічні рішення проблеми повної утилізації мулового осаду стічних вод // Комунальне господарство міст. 2018. № 144. С. 32-42.

3. Tsze L., Sinchzhun Y., Khuei L., Chanchzhu L., Zhykhua S., Khuatsziun K.,Khou V., Huanmin T. Spilne hranuliuvannia osadu stichnykh vod i biomasy: shchilnist i tverdist hranul. *Tekhnolohiia bioresursiv*.2014. Vol. 166, pp. 435-443. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852414007433

УДК 620.9:69

Борисенко К. І.
к.т.н., доцент кафедри гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії
borysenko_k@ksaeu.kherson.ua
Бюргер О.С.
студент групи 194-2-Д
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ У ЦИВІЛЬНОМУ ТА ГІДРОТЕХНІЧНОМУ БУДІВНИЦТВІ: НОРМАТИВНІ ВИМОГИ ТА ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ

Вступ. Підвищення енергетичної ефективності об'єктів цивільного та гідротехнічного будівництва є важливим завданням в умовах зростання вартості енергоресурсів, пошкодження інженерної інфраструктури та перебоїв електропостачання. Особливого значення енергозберігаючі технології набувають для об'єктів водопостачання та водовідведення, функціонування яких безпосередньо залежить від надійності електропостачання. Зокрема, досвід експлуатації систем водопостачання м. Херсона в умовах воєнного стану свідчить про необхідність використання резервних джерел живлення та впровадження заходів зі зменшення енергоспоживання [1].

У межах цієї роботи розглянуто два напрями підвищення енергетичної ефективності: зменшення тепловтрат через огороджувальні конструкції будівель та оптимізацію режимів роботи насосного обладнання. Застосування цих заходів потребує врахування чинних нормативних вимог, технічних характеристик обладнання та фактичних умов експлуатації.

Метою роботи є аналіз нормативних вимог до енергетичної ефективності будівель та оцінювання потенціалу енергозбереження шляхом утеплення огороджувальних конструкцій і регулювання режимів роботи насосного обладнання на основі розрахункових прикладів.

Основна частина. *Нормативно-правова база.* Правові засади енергетичної ефективності будівель в Україні визначає Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» [3]. Технічні вимоги до теплової ізоляції та енергоефективності будівель встановлюють державні будівельні норми (ДБН)

В.2.6-31:2021, затверджені наказом Мінрегіону від 30.12.2021 № 366 [4]. Зовнішні мережі й споруди водопостачання проєктують за ДБН В.2.5-74:2013 [5]. Основні нормативно-правові документи України та європейські нормативні орієнтири у сфері енергетичної ефективності будівель узагальнено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні документи з енергетичної ефективності будівель

Документ	**Що встановлює**	**Примітка**
Закон України № 2118-VIII від 22.06.2017 [3]	Правові засади забезпечення енергетичної ефективності будівель, вимоги до їх енергетичної ефективності та проведення енергетичної сертифікації	Сфера застосування та випадки обов'язкової сертифікації визначаються положеннями Закону
ДБН В.2.6-31:2021 [4]	Вимоги до теплотехнічних характеристик огороджувальних конструкцій та енергетичної ефективності будівель	Мінімально допустимий приведений опір теплопередачі зовнішніх стін житлових і громадських будівель: 4,00 м²·К/Вт — I температурна зона; 3,50 м²·К/Вт — II температурна зона (п. 5.2, табл. 1)
Наказ Мінрозвитку № 168 від 06.02.2025 [6]	Вимоги до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії (НЗЕБ): клас енергетичної ефективності, частка відновлюваної енергії, теплотехнічні характеристики огороджувальних конструкцій, повітропроникність та інженерні системи	Набрав чинності 01.04.2025; передбачає спеціальні вимоги для набуття статусу НЗЕБ
Розпорядження КМУ № 1228-р від 29.12.2023 [8]	Стратегічні напрями термомодернізації будівель до 2050 року та заходи їх реалізації на 2024–2026 роки	Схвалено концепцію державної цільової програми підтримки термомодернізації будівель до 2030 року
Директива (ЄС) 2024/1275 [9]	Вимоги до енергетичної ефективності будівель, зокрема перехід до будівель з нульовими викидами (ZEB): з 01.01.2028 — нові будівлі у власності публічних органів; з 01.01.2030 — усі нові будівлі, з передбаченими винятками	Нормативний акт ЄС; не встановлює безпосередніх обов'язків для України, але є орієнтиром для наближення національного законодавства до європейських вимог

Оцінювання ефективності теплоізоляції зовнішніх стін. Одним із технічних заходів підвищення енергетичної ефективності будівель є зменшення тепловтрат через зовнішні огороджувальні конструкції шляхом улаштування додаткового теплоізоляційного шару. Ефективність такого заходу залежить від початкового опору теплопередачі конструкції, товщини утеплювача та його коефіцієнта теплопровідності.

Для оцінювання впливу додаткової теплоізоляції на тепловтрати через зовнішню стіну використано спрощену модель стаціонарного одновимірного теплопередавання. Коефіцієнт теплопередачі утепленої конструкції визначають за залежністю U:

$$U = 1 / (R_0 + d / \lambda), \quad (1)$$

де R_0 – опір теплопередачі наявної стіни з урахуванням поверхневих опорів, м²·К/Вт; d – товщина утеплювача, м; λ – теплопровідність утеплювача, Вт/(м·К);

Тепловий потік через огороджувальну конструкцію за заданої різниці температур визначають за формулою:

$$Ф = U \cdot A \cdot \Delta T, \quad (2)$$

де Ф – тепловий потік, Вт; А – площа, м²; ΔТ – різниця температур, К.

Для оцінювання впливу додаткової теплоізоляції на тепловтрати через зовнішню стіну розглянуто умовний розрахунковий приклад. Прийнято такі вихідні дані: R_0 = 0,5 м²·К/Вт, d = 0,20 м, λ = 0,04 Вт/(м·К), А = 100 м², ΔТ = 20 К; Низьке початкове значення опору теплопередачі прийнято для ілюстрації ефективності утеплення огороджувальної конструкції з недостатніми теплозахисними характеристиками. Прийнята товщина теплоізоляційного шару 200 мм відповідає загальній вимозі до мінімальної товщини утеплення зовнішніх стін будівель НЗЕБ, установленій наказом № 168, з урахуванням передбачених ним винятків [6].

До утеплення коефіцієнт теплопередачі становитьU = 2,00 Вт/(м²·К), Ф = 4000 Вт. Після утеплення U = 1 / (0,5 + 0,20 / 0,04) = 1 / 5,5 ≈ 0,1818 Вт/(м²·К) і Ф ≈ 0,1818 · 100 · 20 ≈ 364 Вт. Отже, за прийнятих умов тепловий потік через зовнішню стіну зменшується приблизно на 91 %. Значний відносний ефект зумовлений низьким початковим опором теплопередачі конструкції. Відповідність теплозахисних характеристик зовнішньої стіни нормативним вимогам необхідно оцінювати відповідно до ДБН В.2.6-31:2021 [4].

Підвищення енергоефективності насосних установок шляхом частотного регулювання. Одним із технічних заходів зменшення енергоспоживання насосних установок систем водопостачання та гідромеліорації є регулювання частоти обертання робочого колеса насоса відповідно до змінної потреби у воді. Для насосних установок, у яких втрати напору на тертя переважають над статичною складовою напору, зміну енергетичних характеристик за регулювання частоти обертання можна наближено оцінити на основі законів подібності відцентрових насосів. За умови геометричної незмінності робочого колеса, подібності режимів роботи та

приблизно сталого коефіцієнта корисної дії відносна потужність на валу насоса й питома механічна енергія на одиницю об'єму перекачуваної води визначаються залежностями::

$$P / P_0 = (n / n_0)^3, \quad e / e_0 = (n / n_0)^2, \qquad (3)$$

де P – потужність на валу, кВт; e – питома механічна енергія на 1 м³ води, кВт•год/м³; n – частота обертання, об/хв; індекс 0 позначає номінальний режим. Відповідно до законів подібності відцентрових насосів, за прийнятих припущень подача насоса змінюється пропорційно частоті обертання робочого колеса. При зниженні частоти обертання до 80 % початкового значення відносна потужність на валу становить $0{,}8^3 = 0{,}512$, а питома механічна енергія на одиницю об'єму перекачуваної води $0{,}8^2 = 0{,}64$ від відповідних початкових значень.

Таким чином, у розглянутій ідеалізованій моделі потужність на валу насоса зменшується на 48,8 %, а питома механічна енергія — на 36 % (рис. 1, табл. 2). За наявності значної статичної складової напору наведені залежності не забезпечують достовірної оцінки енергозбереження без урахування характеристики насосної системи. Для визначення фактичного споживання електричної енергії додатково необхідно враховувати ККД електродвигуна та перетворювача частоти..

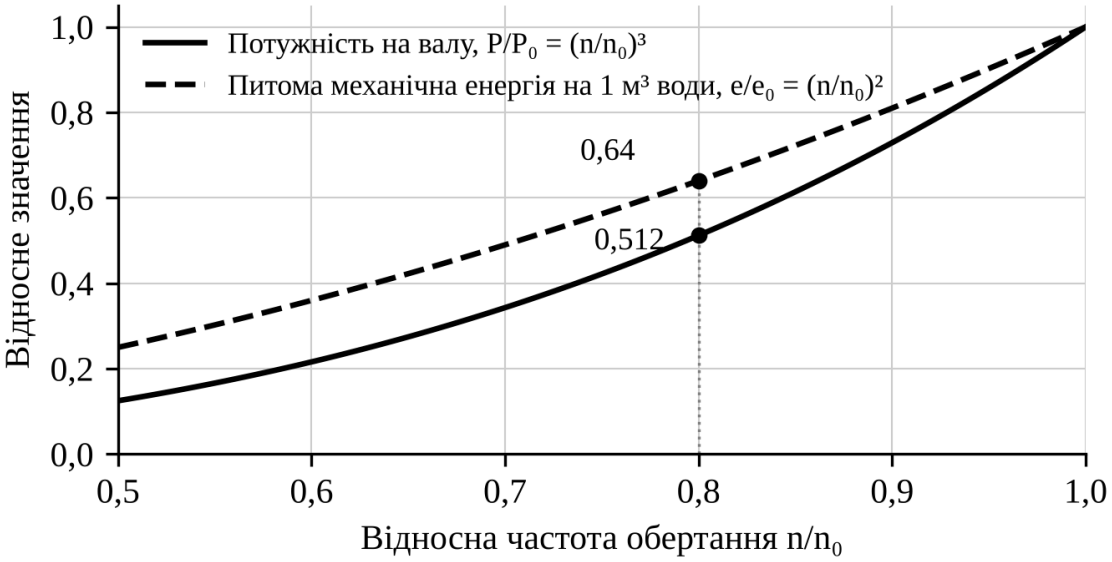


Рисунок 1 – Залежність відносної потужності й питомої механічної енергії від частоти обертання насоса

Для оцінювання потенціалу енергозбереження за частотного регулювання розглянуто умовний річний режим роботи насосної установки з номінальною потужністю на валу 30 кВт працює 8760 год на рік, з них половину часу на 80 % номінальної частоти обертання.

За відсутності регулювання річні витрати механічної енергії становлять: $E_0 = 30 \cdot 8760 = 262\,800$ кВт•год.

За частотного регулювання, відповідно до прийнятої моделі:

$E = 30 \cdot 8760 \cdot (0{,}5 + 0{,}5 \cdot 0{,}512) \approx 198\,677$ кВт·год

Економія 64 123 кВт•год, або 24,4 % за меншого обсягу поданої води. Водночас через зниження подачі насоса сумарний обсяг перекачаної води становить: 0,5 · 1 + 0,5 · 0,8 = 0,9 від базової, тож відносна питома механічна енергія на одиницю об'єму води дорівнює: 0,756 / 0,9 = 0,84

Отже, за прийнятих умов питома механічна енергія на перекачування 1 м³ води зменшується приблизно на 16 %. Наведені результати характеризують потенціал енергозбереження в межах спрощеної розрахункової моделі без урахування зміни ККД насоса, електродвигуна та перетворювача частоти.

За результатами моделювання добових режимів роботи насосних агрегатів у дослідженні [10] повідомляється про можливість зменшення енергоспоживання до 60 % за комбінованого регулювання порівняно з нерегульованими схемами. Безпосереднє зіставлення цього показника з результатами наведеного розрахункового прикладу є некоректним через відмінності умов і бази порівняння.

Практичне застосування енергоефективних технічних рішень наведено в роботі [1, с. 26–27], де зазначено впровадження частотних перетворювачів та енергоефективніших занурювальних насосів на підвищувальних насосних станціях МКП «ВУВКГ м. Херсона».

Окрім регулювання частоти, потужність насоса залежить від ККД; для насосної станції гідромеліоративної системи (зрошення, осушення) потужність на валу визначають за гідравлічною залежністю:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H / \eta, \qquad (3)$$

де ρ – густина води, кг/м³; g = 9,81 м/с²; Q – подача, м³/с; H – напір, м; η – ККД насоса.

Для умовного розрахункового прикладу прийнято: Q = 1 м³/с, H = 20 м, ρ = 1000 кг/м³ і η = 0,75. За цих умов потужність на валу насоса становить: P = (1000 · 9,81 · 1 · 20) /(1000 · 0,75) ≈ 262 кВт. За підвищення ККД насоса до η = 0,82 за тих самих Q і H потребує ≈ 239 кВт, тобто економія становить близько 8,5 %.

Отже, підвищення енергоефективності насосних установок може забезпечуватися як частотним регулюванням, так і застосуванням насосів із вищим ККД. При цьому повний напір насоса включає статичну складову та втрати напору в системі, співвідношення яких визначає можливість застосування спрощених залежностей (3) для оцінювання ефекту частотного регулювання.

Висновки. Аналіз нормативно-правових документів України та положень Директиви ЄС 2024/1275 засвідчив, що підвищення енергетичної ефективності будівель передбачає комплексне застосування теплозахисних заходів і сучасних інженерних рішень. Водночас вимоги до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії необхідно розглядати з урахуванням установлених нормативних критеріїв та умов їх застосування.

За результатами умовного теплотехнічного розрахунку встановлено, що застосування додаткового теплоізоляційного шару завтовшки 200 мм із коефіцієнтом теплопровідності 0,04 Вт/(м·К) забезпечує зменшення теплового потоку через розглянуту зовнішню стіну приблизно на 91 %. Отриманий

результат зумовлений низьким початковим опором теплопередачі конструкції та характеризує ефективність утеплення лише за прийнятих розрахункових умов.

На основі законів подібності відцентрових насосів показано, що за зменшення частоти обертання до 80 % початкового значення потужність на валу насоса знижується на 48,8 %, а питома механічна енергія — на 36 % за умови переважання втрат напору на тертя та приблизно незмінного ККД. Для умовного річного режиму роботи насосної установки розрахункове зменшення витрат механічної енергії становить 24,4 %, а питомої енергії на одиницю перекачаної води — близько 16 %.

Встановлено, що підвищення ККД насоса з 0,75 до 0,82 за незмінних подачі та напору забезпечує зменшення необхідної потужності на валу приблизно на 8,5 %. Це підтверджує доцільність комплексного підходу до підвищення енергоефективності насосних установок, який поєднує регулювання режимів роботи та застосування обладнання з вищим ККД.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на техніко-економічне оцінювання енергозберігаючих рішень з урахуванням фактичних режимів експлуатації, характеристик насосного обладнання та гідравлічних параметрів систем водопостачання і гідромеліорації.

Список використаної літератури:

1. Волошин М.М., Клименко І.В. Модернізація та забезпечення життєдіяльності систем водопостачання та водовідведення в умовах екстремальних викликів (на прикладі МКП «ВУВКГ м. Херсона»). Сучасні технології та досягнення інженерних наук в галузі гідротехнічного будівництва та водної інженерії : зб. наук. праць. 8-й вип. Кропивницький ; Херсон : ХДАЕУ, 2026. С. 24–27.

2. Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA5): February 2022 – December 2025 / World Bank, Government of Ukraine, European Union, United Nations. Washington, DC : World Bank, 2026. 76 p. URL: https://www.undp.org/ukraine/publications/ukraine-fifth-rapid-damage-and-needs-assessment-rdna5-february-2022-december-2025 (дата звернення: 17.10.2026).

3. Про енергетичну ефективність будівель : Закон України від 22.06.2017 № 2118-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19 (поточна редакція; дата звернення: 17.10.2026).

4. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ : Мінрегіон України, 2021. (Наказ Мінрегіону від 30.12.2021 № 366).

5. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Київ : Мінрегіон України, 2013. (Накази Мінрегіонбуду від 08.04.2013 № 133 та від 28.08.2013 № 410; чинний з 01.01.2014).

6. Деякі питання запровадження вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії : наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 06.02.2025 № 168 (зареєстровано в Мін’юсті 21.02.2025 за № 284/43690; зі змінами, внесеними наказом від 26.02.2025 № 353). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0284-25 (дата звернення: 14.10.2026).

7. Енергоефективність: набрали чинності вимоги до будівель за стандартом НЗЕБ. Міністерство розвитку громад та територій України. 02.04.2025. URL: https://mininfra.gov.ua/news/enerhoefektyvnist-nabraly-chynnosti-vymohy-do-budivel-za-standartom-nzeb (дата звернення: 14.10.2026).

8. Деякі питання стратегічного розвитку енергетичної ефективності будівель : розпорядження Кабінету Міністрів України від 29.12.2023 № 1228-р. URL: https://mininfra.gov.ua/npas/deiaki-pitannia-strategicnogo-rozvitku-energeticnoyi-efektivnosti-budivel (дата звернення: 14.10.2026).

9. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union. L, 8.5.2024. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275 (дата звернення: 14.10.2026).

10. Семенов А. О., Скрипник В. О., Сахно Т. В., Бут А. Г. Оптимізація електроприводів насосних агрегатів систем водопостачання на основі частотного регулювання. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2025. № 2 (11). С. 91–95. DOI: 10.20998/EREE.2025.2(11).336220.

УДК 681.513.5

Рагулін С.В., Стась В.С.

Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Вступ. Сучасні електромеханічні комплекси насосних станцій водопостачання, водовідведення та іригації є одними з найважливіших елементів інфраструктури житлово-комунального господарства та промисловості. Водночас вони належать до найбільш енергомістких об'єктів, споживаючи значну частку загального обсягу виробленої електроенергії. Традиційні підходи до керування продуктивністю насосних агрегатів, такі як дроселювання засувками або байпасування, призводять до колосальних втрат енергії через штучне створення гідравлічного опору в системі . Крім того, пуск потужних асинхронних двигунів безпосередньо від мережі супроводжується значними пусковими струмами (що перевищують номінальні в 5–7 разів) та виникненням гідродинамічних ударів у трубопроводах [1]. Це спричиняє прискорений знос запірної арматури, пошкодження ізоляції обмоток та часті аварії на лініях. У зв'язку з цим оптимізація роботи насосних станцій шляхом впровадження частотно-регульованих електроприводів (ЧРП) є актуальною науково-техничною задачею, що дозволяє комплексно вирішити проблеми енергозбереження та підвищення експлуатаційного ресурсу обладнання.

Основна частина. Переведення насосних комплексів на частотно-регульоване керування базується на застосуванні сучасних статичних перетворювачів частоти на базі біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT). Математичною основою високої енергетичної ефективності ЧРП у відцентрових машинах є закони пропорційності (подібності), згідно з якими продуктивність насоса змінюється лінійно від частоти обертання робочого колеса, напір — пропорційно квадрату частоти, а споживана потужність — пропорційно кубу частоти обертання [2]. Отже, навіть незначне зниження частоти обертання двигуна у періоди мінімального водоспоживання дозволяє досягти колосального енергоощадного ефекту. Наприклад, зменшення швидкості обертання всього на 20% від номінальної знижує споживання електричної енергії агрегатом майже вдвічі (на 48.8%).

Для наочності процесів замкнутого автоматичного керування параметрами тиску в магістралі нижче наведено структурно-функціональну схему інтеграції обладнання.

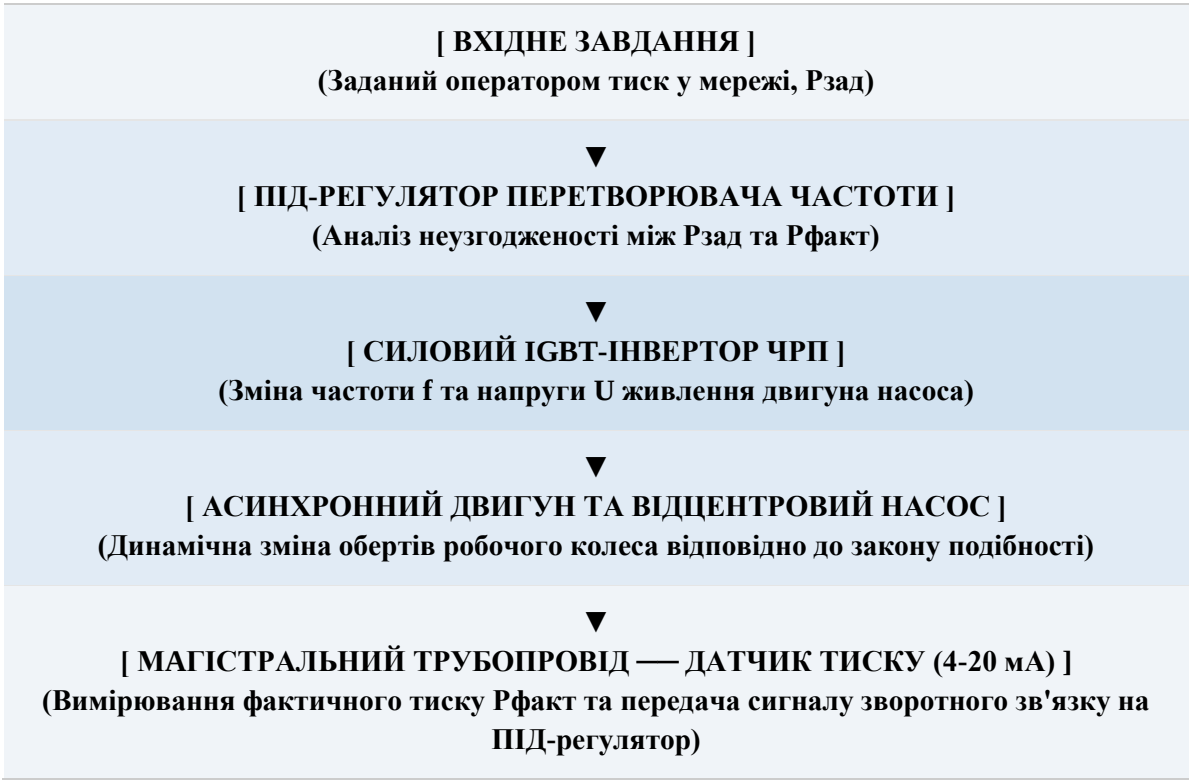


Рис. 1. Структурно-функциональна схема замкнутого контуру автоматичного регулювання тиску на базі ЧРП

Упровадження ЧРП дозволяє замінити дискретне регулювання параметрів мережі на безперервне автоматичне підтримання заданого тиску на виході станції або диференційованого напору у диктуючих точках водопровідної мережі. Система автоматичного керування отримує зворотний зв'язок від аналогових датчиків тиску та витрати, передаючи сигнал на ПІД-регулятор перетворювача частоти. Це повністю нівелює проблему надлишкового тиску в

нічні години, що, за статистикою, знижує обсяги прихованих витоків води через нещільності трубопроводів на 15–20% [1].

Окремим важливим аспектом є електромеханічна інтеграція ЧРП. Сучасні інвертори забезпечують контрольований плавний пуск і зупинку електродвигуна за заданою часовою рампою (інтегральним законом). Це повністю виключає динамічні ударні навантаження на вали та підшипникові вузли, запобігає виникненню руйнівних гідроударів у магістральних мережах та знімає теплові й електромагнітні перевантаження обмоток статора під час пуску. Додатково цифрові підсистеми захисту перетворювачів частоти здійснюють моніторинг параметрів мережі, запобігаючи роботі насоса в режимі «сухого ходу», захищаючи від асиметрії фаз, заклинювання робочого колеса та коротких замикань.

Висновки. Результати дослідження підтверджують високу техніко-економічну доцільність модернізації насосних комплексів із використанням частотно-регульованих електроприводів. Впровадження ЧРП забезпечує пряму економію електричної енергії у розмірі від 30% до 50% залежно від добового графіка нерівномірності водоспоживання. За рахунок усунення пускових струмів і гідроударів термін служби електромеханічного обладнання та запірної арматури збільшується в 1.5–2 рази, що суттєво знижує витрати на аварійні та планово-попереджувальні ремонти. Середній термін окупності капітальних інвестицій у встановлення частотних регуляторів для потужних насосних агрегатів становить від 12 до 18 місяців, що робить цю технологію пріоритетною у програмах модернізації водогосподарського комплексу.

Список використаної літератури

1. Ковальчук О. П., Федоренко В. М. Автоматизація електромеханічних систем водопостачання. Київ: Техніка, 2022. 210 с.

2. Bose B. K. Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 716 p.

Наукове видання

Гідротехнічне будівництво: минуле, сьогодення, майбутнє: зб. наук. пр.: Вип.9. – Херсон: ХДАЕУ, 2026. – 123 с.

Збірка наукових праць видається за підсумками щорічної IX Всеукраїнської науково – практичної конференції молодих вчених «Гідротехнічне будівництво: минуле, сьогодення, майбутнє», 23 жовтня 2026 р.