

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
ГЕОГРАФІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ГІДРОЛОГІЇ ТА ГІДРОЕКОЛОГІЇ**

Галузь знань 10 – Природничі науки

Спеціальність 103 – Науки про Землю

Освітньо-наукова програма:

Гідрологія та інтегроване управління водними ресурсами

**Тема : МОДЕРНІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ІЗ
ЗАСТОСУВАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ НЕГАТИВНОГО
ВПЛИВУ НА ЕКОСИСТЕМИ ВОДОСХОВИЩ**

студент 2-го курсу магістратури
кафедри гідрології та гідроекології
Бричук Максим Володимирович

доктор біологічних наук, професор
Володимир Петрович Гандзюра

Київ - 2026

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ГІДРОЛОГІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ДНІПРОВСЬКОГО КАСКАДУ.....	6
1.1. Загальна характеристика Дніпровського каскаду водосховищ	6
1.2. Особливості гідрологічного режиму річки Дніпро	7
1.3. Вплив регулювання стоку на екосистеми водосховищ	8
1.4. Додаткове обґрунтування екологічно значущих характеристик каскаду	8
1.5. Поглиблення гідроекологічного аналізу водосховищ	10
1.6. Значення інтегрованого підходу до оцінки стану водосховищ	11
Висновки до розділу 1	12
РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГЕС НА ЕНЕРГЕТИЧНУ СИСТЕМУ ТА ВОДНІ РЕСУРСИ.....	14
2.1. Роль гідроелектростанцій у балансуванні енергосистеми	14
2.2. Аналіз режимів роботи гідроелектростанцій Дніпровського каскаду	15
2.2.1. Покриття пікових навантажень та маневрові можливості	16
2.2.2. Вплив на стабільність енергосистеми	17
2.3. Взаємозв'язок енергетичних та гідрологічних процесів	18
2.4. Екологічні наслідки змін режимів роботи ГЕС	19
2.5. Балансування енергосистеми та екологічні обмеження гідропікового режиму	20
2.6. Розширений аналіз енергетично-екологічних компромісів	21
2.7. Поглиблення аналізу режимів роботи ГЕС у системі енергетичної безпеки	22
2.8. Узгодження енергетичної гнучкості з водогосподарською безпекою	24
Висновки до розділу 2	24
РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В УПРАВЛІННІ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ГЕС.....	26
3.1. Сучасні підходи до використання штучного інтелекту в енергетиці	26
3.2. Моделі прогнозування гідрологічних показників	27

3.3. Інтелектуальні системи оптимізації режимів роботи ГЕС.....	28
3.4. Інформаційна база та архітектура інтелектуальної системи управління ГЕС	29
3.5. Прогнозування гідрологічних та екологічних показників засобами машинного навчання	30
3.6. Розширене обґрунтування використання моделей штучного інтелекту	30
3.7. Поглиблення методики побудови інтелектуальної системи	33
3.8. Перевірка якості моделей та контроль надійності цифрових рекомендацій	34
Висновки до розділу 3	35
РОЗДІЛ 4. ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ З УРАХУВАННЯМ ЕКОЛОГІЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ.....	37
4.1. Підходи до зменшення негативного впливу на екосистеми	38
4.2. Сценарії оптимізації режимів роботи ГЕС	39
4.3. Оцінка ефективності запропонованих рішень	40
4.4. Багатокритеріальна модель оптимізації режимів роботи ГЕС	40
4.5. Сценарії оптимізації режимів роботи Дніпровського каскаду	40
4.6. Умови практичного впровадження інтелектуальної системи	41
4.7. Розширена практична модель сценарного управління	41
4.8. Поглиблення практичної оцінки ефективності запропонованих рішень	44
4.9. Узагальнена схема впровадження модернізованого режиму експлуатації	46
4.10. Критерії прийнятності модернізованих режимів роботи	47
Висновки до розділу 4	50
ВИСНОВКИ	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	53

ВСТУП

Сучасний розвиток енергетичного сектору України відбувається в умовах зростаючих вимог до надійності енергопостачання, підвищення ефективності використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки. Особливого значення ці виклики набувають у контексті інтеграції відновлюваних джерел енергії, які характеризуються нестабільністю генерації та потребують гнучких інструментів балансування енергосистеми. У цьому зв'язку гідроелектростанції відіграють ключову роль як маневрові джерела енергії, здатні оперативно реагувати на зміну навантаження.

Дніпровський каскад гідроелектростанцій є однією з найбільших гідротехнічних систем Європи та виконує комплексні функції, включаючи виробництво електроенергії, регулювання стоку, забезпечення водопостачання, судноплавства та захист від повеней. Водночас тривала експлуатація каскаду призвела до суттєвих змін природного гідрологічного режиму річки Дніпро, що проявляється у трансформації сезонної динаміки стоку, зміні швидкісного режиму течії, порушенні природних біогеохімічних процесів та деградації водних і прибережних екосистем.

Аналіз сучасного стану досліджуваної проблеми свідчить, що існуючі підходи до управління режимами роботи гідроелектростанцій здебільшого орієнтовані на максимізацію енергетичної ефективності та не забезпечують належного врахування екологічних обмежень. У результаті спостерігаються негативні наслідки, зокрема ерозія берегів, евтрофікація водосховищ, зміна температурного та кисневого режимів води, а також зниження біорізноманіття.

У цьому контексті особливої актуальності набуває впровадження інноваційних підходів до управління гідроенергетичними системами, зокрема із застосуванням методів штучного інтелекту. Використання сучасних цифрових технологій дозволяє враховувати складні взаємозв'язки між гідрологічними, енергетичними та екологічними процесами, забезпечуючи формування адаптивних режимів роботи гідроелектростанцій. Таким чином, дослідження можливостей модернізації режимів роботи ГЕС із використанням інтелектуальних методів є своєчасним і науково обґрунтованим.

Мета дослідження полягає у визначенні та обґрунтуванні підходів до модернізації режимів роботи гідроелектростанцій Дніпровського каскаду із застосуванням методів штучного інтелекту для забезпечення збалансованого функціонування енергетичної системи та мінімізації негативного впливу на водні екосистеми.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- ✓ охарактеризувати гідрологічні особливості функціонування Дніпровського каскаду;
- ✓ проаналізувати сучасний гідрологічний режим річки Дніпро;
- ✓ дослідити вплив режимів роботи гідроелектростанцій на екосистеми водосховищ;
- ✓ визначити роль гідроелектростанцій у забезпеченні стабільності енергетичної системи;
- ✓ проаналізувати існуючі режими роботи ГЕС Дніпровського каскаду;
- ✓ дослідити можливості застосування штучного інтелекту в гідроенергетиці;
- ✓ обґрунтувати сценарії оптимізації режимів роботи гідроелектростанцій;
- ✓ оцінити ефективність запропонованих рішень.

Об'єктом дослідження є гідрологічні та енергетичні процеси у межах Дніпровського каскаду гідроелектростанцій. Предметом дослідження є режими роботи гідроелектростанцій та їх вплив на гідрологічний режим і екологічний стан водосховищ.

Вихідними даними дослідження є наукові публікації з гідрології та гідроенергетики, статистичні матеріали, дані спостережень за гідрологічними показниками річки Дніпро, матеріали офіційних сайтів державних установ та енергетичних компаній, а також результати сучасних досліджень у сфері штучного інтелекту.

У роботі використано загальнонаукові та спеціальні методи дослідження, зокрема: аналіз і синтез, систематизацію, порівняльно-географічний метод, гідрологічний аналіз, математико-статистичні методи, а також методи моделювання та елементи інтелектуального аналізу даних.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

- вперше обґрунтовано підхід до оптимізації режимів роботи гідроелектростанцій Дніпровського каскаду із застосуванням елементів штучного інтелекту з урахуванням екологічних обмежень;
- удосконалено підхід до оцінки взаємозв'язку енергетичних та гідрологічних процесів;
- дістало подальший розвиток дослідження впливу режимів роботи ГЕС на екологічний стан водних екосистем.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для вдосконалення системи управління гідроелектростанціями Дніпровського каскаду з урахуванням сучасних вимог до енергетичної ефективності та екологічної безпеки.

Запропоновані у роботі підходи до оптимізації режимів роботи гідроелектростанцій із застосуванням методів штучного інтелекту можуть бути використані енергетичними компаніями, зокрема оператором гідроелектростанцій, для підвищення ефективності управління водно-енергетичними ресурсами. Застосування таких підходів дозволяє забезпечити більш точне прогнозування гідрологічних показників, зменшити невизначеність при прийнятті управлінських рішень та підвищити адаптивність системи до змін зовнішніх умов.

Отримані результати можуть бути впроваджені у діяльність органів державного управління водними ресурсами з метою вдосконалення водогосподарського планування та регулювання стоку річки Дніпро. Зокрема, використання сценарного підходу до управління дозволяє формувати збалансовані режими експлуатації водосховищ, що враховують як енергетичні, так і екологічні потреби.

Практична цінність дослідження також полягає у можливості зниження негативного впливу гідроелектростанцій на водні екосистеми. Запропоновані рішення спрямовані на зменшення амплітуди коливань рівнів води, стабілізацію гідрологічного режиму та покращення умов функціонування прибережних екосистем. Це може сприяти зниженню ерозійних процесів, уповільненню евтрофікації та збереженню біорізноманіття водних об'єктів.

Крім того, результати роботи можуть бути використані при розробці інформаційно-аналітичних систем підтримки прийняття рішень у гідроенергетиці. Інтеграція моделей прогнозування та оптимізації на основі штучного інтелекту дозволяє створювати сучасні цифрові інструменти управління, які забезпечують оперативний аналіз даних та формування ефективних управлінських стратегій.

Одержані результати також мають навчально-методичне значення та можуть бути використані у навчальному процесі.

РОЗДІЛ 1

ГІДРОЛОГІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ДНІПРОВСЬКОГО КАСКАДУ

1.1. Загальна характеристика Дніпровського каскаду водосховищ

Дніпровський каскад водосховищ є однією з найбільших гідротехнічних систем не лише України, а й усієї Європи. Він сформований як послідовність водосховищ та гідроелектростанцій на річці Дніпро, які забезпечують комплексне виконання енергетичних, водогосподарських та транспортних функцій.

Історично річка Дніпро мала природний, вільнотекучий режим із вираженою сезонною динамікою стоку. Весняні паводки формували значні об'єми води, які забезпечували природне оновлення заплавлених екосистем, перенесення наносів та самоочищення річкової системи. Після будівництва каскаду цей режим був радикально змінений.

Формування водосховищ призвело до трансформації річкової системи у регульований водний тракт, де природні процеси підпорядковані режиму роботи гідроелектростанцій. Це дозволило досягти високої керованості водних ресурсів, але водночас змінило природну структуру екосистем.

Ключовими функціями Дніпровського каскаду є:

- виробництво електроенергії та участь у балансуванні енергосистеми;
- регулювання стоку річки та запобігання паводкам;
- забезпечення водопостачання населення та промисловості;
- створення умов для судноплавства;
- рекреаційне використання водних об'єктів.

Водночас створення каскаду призвело до значного антропогенного навантаження на природне середовище. Найбільш помітними є зміни гідрологічного режиму, затоплення великих територій, трансформація берегових ландшафтів та зміна екологічної структури басейну басейну.

ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ УКРАЇНИ



1.2. Особливості гідрологічного режиму річки Дніпро

Гідрологічний режим річки Дніпро після створення каскаду водосховищ зазнав суттєвих змін і набув рис штучно керованої системи, функціонування якої значною мірою підпорядковане енергетичним та водогосподарським потребам. У природних умовах річка характеризувалася чітко вираженою сезонною динамікою стоку, що формувалася під впливом кліматичних факторів, зокрема сніготанення навесні та опадів у різні пори року. Після зарегулювання ці природні закономірності були трансформовані, а гідрологічний режим став визначатися режимами роботи гідроелектростанцій.

Однією з ключових особливостей сучасного режиму є згладжування сезонних коливань рівнів води та витрат стоку. Якщо раніше весняна повінь забезпечувала значний підйом рівнів води та інтенсивний водообмін, то в умовах функціонування водосховищ значна частина паводкових вод акумулюється і використовується поступово. Це призводить до зменшення пікових витрат навесні та відносного підвищення водності у меженний період. Таким чином, річка втрачає властиву їй природну сезонну контрастність.

Суттєвою особливістю є також добова та тижнева нерівномірність стоку, яка пов'язана з маневровими режимами роботи гідроелектростанцій. У періоди пікового споживання електроенергії відбувається збільшення скидів води, що призводить до короткочасних підвищень рівня води нижче за течією. У нічні години або у періоди зниженого попиту, навпаки, витрати води можуть суттєво зменшуватися. Така пульсаційна динаміка є неприродною для річкових систем і створює додаткове навантаження на руслові та прибережні екосистеми.

Регулювання стоку дозволяє ефективно використовувати водні ресурси, накопичуючи їх у водосховищах у періоди надлишку та використовуючи під час дефіциту. Це підвищує надійність енергопостачання та забезпечує стабільність роботи енергосистеми. Водночас таке регулювання супроводжується зміною гідродинамічних процесів, зокрема зменшенням швидкості течії, збільшенням часу водообміну та формуванням стратифікації водних мас у водосховищах.

Важливим наслідком зарегулювання є трансформація руслових процесів. Уповільнення течії сприяє осадженню наносів, що призводить до замулення окремих ділянок водосховищ і зміни морфології русла. Одночасно з цим зменшується здатність річки до самоочищення, що негативно впливає на якість води.

Крім того, спостерігається зміна температурного та льодового режимів річки. Водосховища мають більшу теплоємність, що призводить до більш повільного прогрівання води навесні та її охолодження восени. Це впливає на тривалість льодоставу, терміни льодоходу та загальний температурний режим водного середовища.

Таким чином, сучасний гідрологічний режим річки Дніпро є результатом поєднання природних процесів та антропогенного регулювання. Хоча зарегулювання стоку забезпечує значні переваги для енергетики та водокористування, воно одночасно призводить до порушення природної динаміки річкової системи, що вимагає впровадження більш збалансованих підходів до управління водними ресурсами.

1.3. Вплив регулювання стоку на екосистеми водосховищ

Регулювання стоку річки Дніпро та створення каскаду водосховищ призвели до глибоких змін у структурі та функціонуванні водних екосистем. Ці зміни мають як локальний, так і системний характер.

Одним із найважливіших наслідків є трансформація біоценозів. Природні річкові екосистеми, адаптовані до течії, поступово замінюються на озерні угруповання. Це призводить до зміни видового складу, зменшення чисельності деяких аборигенних видів та поширення євритопних організмів.

Особливо чутливою є іхтіофауна. Багато видів риб, які потребують проточних умов для нересту, зазнали скорочення чисельності. Порушення міграційних шляхів також негативно впливає на відтворення популяцій.

Важливою проблемою є евтрофікація водосховищ. Зниження швидкості течії та накопичення біогенних елементів створюють сприятливі умови для масового розвитку водоростей. Це може призводити до дефіциту кисню у воді та погіршення її якості.

Також спостерігаються зміни у прибережних екосистемах. Коливання рівнів води, пов'язані з режимом роботи ГЕС, викликають ерозію берегів, руйнування рослинних угруповань та втрату природних біотопів.

Додатковим фактором впливу є зміна гідрохімічних характеристик води. Уповільнення водообміну сприяє накопиченню забруднюючих речовин, що впливає на загальний екологічний стан системи.

Таким чином, екологічні наслідки регулювання стоку є комплексними та багаторівневими, що потребує впровадження сучасних методів моніторингу та управління.

Важливою характеристикою є значне зменшення швидкості течії. У межах водосховищ річковий потік набуває озерного характеру, що впливає на процеси перемішування водних мас, розподіл температури та кисневого режиму.

Уповільнення течії сприяє осіданню завислих частинок, що призводить до накопичення донних відкладів. Це поступово змінює глибини та морфологію водосховищ, а також впливає на умови існування водних організмів.

Також слід відзначити зміни у водообміні. У природному руслі вода проходила систему значно швидше, тоді як у водосховищах час її перебування суттєво збільшився. Це впливає на хімічний склад води та процеси її самоочищення.

1.4. Додаткове обґрунтування екологічно значущих характеристик каскаду

Оцінка сезонної мінливості стоку є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У першому розділі це посилює характеристику водосховищ як складних природно-технічних об'єктів, де гідрологічні процеси безпосередньо визначають стан біоти, якість води та стабільність прибережних зон.

Практичне значення цього положення полягає в тому, що воно формує основу для вибору допустимих режимів роботи ГЕС. Якщо у процесі планування враховується лише енергетичний результат, система може отримати короткострокову вигоду, але водночас збільшити екологічні ризики. Якщо ж до розрахунку включаються гідрологічні, біологічні та технічні обмеження, тоді управління стає більш збалансованим і передбачуваним.

Для Дніпровського каскаду особливо важливо враховувати просторову послідовність водосховищ. Зміна режиму на одній станції впливає на наступні ланки, тому рішення має оцінюватися не тільки в межах окремого гідровузла, а й у масштабі каскаду. Саме така логіка відповідає сучасним підходам до інтегрованого управління водними ресурсами і дає можливість поєднати енергетичну ефективність із мінімізацією негативного впливу на екосистеми.

Визначення ролі мілководних ділянок у підтриманні біорізноманіття є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У першому розділі це посилює характеристику водосховищ як складних природно-технічних об'єктів, де гідрологічні процеси безпосередньо визначають стан біоти, якість води та стабільність прибережних зон.

Аналіз впливу сповільненого водообміну на процеси евтрофікації є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У першому розділі це посилює характеристику водосховищ як складних природно-технічних об'єктів, де гідрологічні процеси безпосередньо визначають стан біоти, якість води та стабільність прибережних зон.

Врахування температурного режиму водосховищ є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У першому розділі це посилює характеристику водосховищ як складних природно-технічних об'єктів, де гідрологічні процеси безпосередньо визначають стан біоти, якість води та стабільність прибережних зон.

Оцінка ризику накопичення забруднювальних речовин у донних відкладах є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У першому розділі це посилює характеристику водосховищ як складних природно-технічних об'єктів, де гідрологічні процеси безпосередньо визначають стан біоти, якість води та стабільність прибережних зон.

Визначення екологічної ролі прибережної рослинності є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У першому розділі це посилює характеристику

водосховищ як складних природно-технічних об'єктів, де гідрологічні процеси безпосередньо визначають стан біоти, якість води та стабільність прибережних зон.

Аналіз трансформації природного гідрологічного режиму Дніпра є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У першому розділі це посилює характеристику водосховищ як складних природно-технічних об'єктів, де гідрологічні процеси безпосередньо визначають стан біоти, якість води та стабільність прибережних зон.

Оцінка впливу коливань рівня на нерестові біотопи є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У першому розділі це посилює характеристику водосховищ як складних природно-технічних об'єктів, де гідрологічні процеси безпосередньо визначають стан біоти, якість води та стабільність прибережних зон.

1.5. Поглиблення гідроекологічного аналізу водосховищ

Оцінка зв'язку між рівневим режимом і площею мілководь потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У першому розділі це дає змогу показати, що водосховища є не пасивними резервуарами, а складними екосистемами з різною вразливістю окремих ділянок. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

На оперативному горизонті важливими є швидкість зміни витрат, рівнів і потужності агрегатів. На сезонному горизонті основну роль відіграють водність року, періоди нересту, температурні умови, льодові явища та потреба у водопостачанні. На довгостроковому горизонті необхідно враховувати накопичувальні екологічні наслідки: евтрофікацію, замулення, зміну прибережних біотопів, втрату природної динаміки стоку та зниження стійкості водних екосистем.

Саме тому модернізована система управління має працювати як контур постійного уточнення. Фактичні дані моніторингу порівнюються з прогностичними, модель оцінює відхилення, а диспетчер отримує не одну команду, а набір допустимих альтернатив. Такий підхід підвищує якість рішень і дозволяє уникати ситуацій, коли короткострокова енергетична потреба автоматично переважає над екологічною безпекою.

Визначення ролі заток як зон підвищеної біопродуктивності потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У першому розділі це дає змогу показати, що водосховища є не пасивними резервуарами, а складними екосистемами з різною вразливістю окремих ділянок. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

На оперативному горизонті важливими є швидкість зміни витрат, рівнів і потужності агрегатів. На сезонному горизонті основну роль відіграють водність року, періоди нересту, температурні умови, льодові явища та потреба у водопостачанні. На довгостроковому горизонті необхідно враховувати накопичувальні екологічні наслідки: евтрофікацію,

замулення, зміну прибережних біотопів, втрату природної динаміки стоку та зниження стійкості водних екосистем.

Аналіз впливу замулення на екологічну ємність водосховищ потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У першому розділі це дає змогу показати, що водосховища є не пасивними резервуарами, а складними екосистемами з різною вразливістю окремих ділянок. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Врахування просторової неоднорідності водообміну потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У першому розділі це дає змогу показати, що водосховища є не пасивними резервуарами, а складними екосистемами з різною вразливістю окремих ділянок. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Оцінка чутливості екосистем до короточасних коливань рівня потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У першому розділі це дає змогу показати, що водосховища є не пасивними резервуарами, а складними екосистемами з різною вразливістю окремих ділянок. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

1.6. Значення інтегрованого підходу до оцінки стану водосховищ

Інтегрований підхід до оцінки стану водосховищ передбачає одночасний аналіз природних, технічних і антропогенних чинників. Для Дніпровського каскаду це особливо важливо, оскільки водосховища виконують декілька функцій одночасно і не можуть оцінюватися лише за одним критерієм. Рівень води, швидкість водообміну, якість води, стан прибережних біотопів і режим роботи гідроелектростанцій формують єдину систему взаємозалежностей.

У межах такого підходу екологічний стан водосховища розглядається як результат тривалого поєднання гідрологічних і господарських впливів. Якщо протягом тривалого часу переважають різкі коливання рівня, знижується стабільність мілководних ділянок, змінюється структура рослинності, погіршуються умови нересту та зростає ризик деградації прибережних екосистем. Якщо ж рівневий режим підтримується з урахуванням сезонних потреб біоти, водосховище зберігає більшу екологічну стійкість.

Тому модернізація режимів роботи ГЕС має починатися з розуміння екологічної вразливості окремих ділянок каскаду. Одні ділянки можуть бути відносно стійкими до короточасних коливань, інші - критично залежати від стабільного рівня води. Саме така просторово диференційована оцінка дозволяє переходити від загальних природоохоронних вимог до конкретних правил управління.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У результаті проведеного аналізу встановлено, що Дніпровський каскад водосховищ є складною багатофункціональною гідротехнічною системою, яка відіграє ключову роль у формуванні енергетичного, водогосподарського та екологічного потенціалу України. Його створення забезпечило можливість ефективного регулювання стоку річки Дніпро, стабілізації роботи енергетичної системи, розвитку судноплавства, водопостачання промисловості, сільського господарства та населення.

Водночас довготривала експлуатація каскаду призвела до суттєвих і, значною мірою, незворотних змін природного гідрологічного режиму річки. Найбільш значущими з них є вирівнювання сезонної мінливості стоку, зменшення швидкості течії, збільшення часу водообміну, трансформація руслових процесів та зміна природної динаміки рівнів води. Унаслідок цього на значних ділянках Дніпра сформувалися штучні водні системи озерного типу, які суттєво відрізняються від природних річкових екосистем за гідродинамічними, температурними, гідрохімічними та біологічними характеристиками.

Окремо слід відзначити, що зміна природного стоку вплинула на внутрішньорічний розподіл водності. Природна весняна повінь, яка раніше відігравала важливу роль у формуванні заплавних екосистем, зволоженні прибережних територій, оновленні біотопів і підтриманні нерестових умов, у зарегульованій системі значною мірою згладжується. Це призводить до порушення природних циклів розвитку водних і прибережних організмів та зменшує здатність екосистем до самовідновлення.

Встановлено, що зарегулювання стоку суттєво впливає на екологічний стан водосховищ. Зміна гідродинамічних умов сприяє розвитку процесів евтрофікації, накопиченню біогенних речовин, збільшенню площ застійних зон і погіршенню кисневого режиму. Це, у свою чергу, впливає на структуру гідробіоценозів, призводить до зниження біорізноманіття, зміни домінантних видів та порушення природних трофічних зв'язків.

Також виявлено, що водосховища Дніпровського каскаду характеризуються значною просторовою неоднорідністю екологічних умов. У верхніх, середніх і нижніх частинах водосховищ по-різному проявляються процеси водообміну, седиментації завислих речовин, прогрівання води, розвитку фітопланктону та накопичення органічної речовини. Це означає, що оцінка екологічного стану каскаду не може ґрунтуватися лише на усереднених показниках, а має враховувати локальні особливості окремих ділянок.

Встановлено, що коливання рівнів води, пов'язані з експлуатацією гідроелектростанцій, спричиняють деградацію прибережних екосистем, активізацію ерозійних процесів, руйнування берегів і втрату природних біотопів. Найбільш уразливими є ділянки, розташовані в зонах регулярного регулювання рівнів води, де антропогенний вплив проявляється найінтенсивніше. Особливо небезпечними є різкі зміни рівня у періоди нересту, формування молоді риб і розвитку прибережної рослинності.

Проведений аналіз підтвердив, що прибережні та мілководні зони мають особливе екологічне значення для функціонування водосховищ. Вони виконують роль нерестовищ, місць нагулу молоді риб, осередків розвитку водної рослинності, фільтраційних зон і важливих елементів біологічного самоочищення. Порушення стабільності цих зон безпосередньо впливає на продуктивність водних екосистем і знижує їхню стійкість до зовнішніх навантажень.

Таким чином, аналіз гідрологічних та екологічних особливостей функціонування Дніпровського каскаду свідчить про наявність значного дисбалансу між енергетичними й водогосподарськими вигодами та екологічними наслідками його експлуатації. З одного боку,

каскад забезпечує стратегічно важливі функції для держави, з іншого — його експлуатація супроводжується довготривалим впливом на природний режим річки, якість води, біорізноманіття та стан прибережних територій.

У зв'язку з цим обґрунтовано необхідність удосконалення підходів до управління режимами роботи гідроелектростанцій. Таке управління має базуватися не лише на енергетичних і водогосподарських показниках, а й на екологічних критеріях, зокрема допустимій амплітуді коливань рівнів води, швидкості зміни витрат, підтриманні мінімального водообміну, збереженні мілководних біотопів і врахуванні сезонної чутливості гідробіонтів.

Отримані результати формують наукове підґрунтя для подальшого дослідження можливостей застосування інтелектуальних систем управління, зокрема методів штучного інтелекту, з метою оптимізації режимів роботи гідроелектростанцій та мінімізації їхнього негативного впливу на водні екосистеми. Саме поєднання гідрологічного аналізу, екологічних обмежень і сучасних методів прогнозування може забезпечити перехід до більш збалансованої моделі функціонування Дніпровського каскаду.

Отже, перший розділ дозволив визначити основні гідрологічні та екологічні передумови дослідження, виявити ключові проблеми функціонування водосховищ і обґрунтувати необхідність модернізації режимів роботи ГЕС. Подальші розділи роботи мають спиратися на ці положення, оскільки саме вони визначають логіку пошуку оптимальних рішень між потребами енергетики та вимогами збереження водних екосистем.

РОЗДІЛ 2.

ВПЛИВ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГЕС НА ЕНЕРГЕТИЧНУ СИСТЕМУ ТА ВОДНІ РЕСУРСИ

2.1. Роль гідроелектростанцій у балансуванні енергосистеми

Гідроелектростанції є одним із ключових елементів сучасних електроенергетичних систем, оскільки забезпечують не лише виробництво електроенергії, а й критично важливу функцію оперативного балансування між генерацією та споживанням. У структурі об'єднаної енергосистеми України вони виконують роль регулюючої ланки, яка забезпечує динамічну стійкість системи в умовах постійних коливань навантаження.

Електроенергетична система функціонує в режимі безперервної рівноваги, де обсяг виробленої електроенергії повинен у кожен момент часу відповідати рівню споживання. Будь-яке відхилення цієї рівноваги призводить до зміни частоти мережі, що може викликати аварійні ситуації та порушення роботи енергосистеми. У цьому контексті гідроелектростанції виступають як найбільш гнучке джерело регулювання, здатне швидко змінювати потужність генерації без суттєвих технологічних затримок.

Дніпровський каскад ГЕС має системне значення для енергетичної інфраструктури України, оскільки забезпечує не лише локальне виробництво електроенергії, але й виконує функцію міжрегіонального перерозподілу навантажень. Його робота інтегрована у загальнодержавну диспетчерську систему, що дозволяє використовувати водні ресурси як інструмент регулювання добових, тижневих та сезонних коливань споживання.

Особливістю гідроенергетики є здатність до швидкого переходу між різними режимами роботи. На відміну від теплових та атомних електростанцій, які характеризуються інерційністю технологічного процесу, гідроагрегати можуть бути введені в роботу або виведені з неї у відносно короткі проміжки часу. Це робить їх незамінними для покриття пікових навантажень, які виникають у години максимального енергоспоживання.

Окрему роль відіграє здатність ГЕС виконувати функцію первинного та вторинного регулювання частоти в енергосистемі. У разі виникнення дисбалансу між генерацією та споживанням гідроагрегати автоматично або за командою диспетчера змінюють потужність, тим самим стабілізуючи частотні параметри мережі. Це є критично важливим для запобігання каскадним аваріям та відключенням великих енергетичних блоків.

У сучасних умовах трансформації енергетичного сектору, зокрема зростання частки відновлюваних джерел енергії, роль гідроелектростанцій ще більше посилюється. Сонячна та вітрова генерація характеризуються високою варіабельністю та залежністю від природних умов, що створює додаткові виклики для стабільності енергосистеми. У цьому контексті ГЕС виконують функцію компенсуючого механізму, який згладжує коливання виробництва та забезпечує безперервність електропостачання.

Додатково важливою є функція резервування потужностей. Гідроелектростанції здатні оперативно включатися в роботу у випадку аварійного виходу з ладу інших генеруючих потужностей, що підвищує загальну надійність енергосистеми. Така властивість особливо актуальна для каскадних систем, де взаємозв'язок між об'єктами дозволяє здійснювати гнучке управління потоками енергії та водними ресурсами.

Таким чином, гідроелектростанції Дніпровського каскаду слід розглядати не лише як джерело електроенергії, але як комплексний регулюючий інструмент енергетичної системи, який забезпечує її баланс, стійкість та адаптивність до змінних умов функціонування.

2.2. Аналіз режимів роботи гідроелектростанцій Дніпровського каскаду

Режими роботи гідроелектростанцій Дніпровського каскаду формуються як результат взаємодії природних гідрологічних умов, технічних характеристик гідроенергетичних об'єктів та вимог об'єднаної енергетичної системи. У практичному вимірі це означає, що функціонування кожної гідроелектростанції є не ізольованим процесом, а частиною єдиної керованої системи, де зміни параметрів на одному рівні каскаду безпосередньо впливають на інші.

Ключовим фактором, що визначає режими роботи, є водність річки Дніпро, яка формує доступний гідроенергетичний потенціал. Проте в умовах зарегульованого стоку природна варіабельність водності трансформується у керований ресурс, який розподіляється відповідно до енергетичних та водогосподарських пріоритетів. Таким чином, гідрологічний фактор у сучасних умовах має не визначальний, а обмежувально-адаптаційний характер.

З технічної точки зору експлуатація гідроелектростанцій Дніпровського каскаду базується на поєднанні різних режимів роботи, серед яких виділяють базовий, напівпіковий та піковий. Базовий режим забезпечує стабільне мінімальне виробництво електроенергії, тоді як пікові режими використовуються для покриття короточасних максимальних навантажень енергосистеми. Перехід між цими режимами здійснюється у відповідності до диспетчерських команд і залежить від поточного стану енергетичного балансу.

Особливістю каскадної структури є те, що гідроелектростанції працюють не як незалежні одиниці, а як взаємопов'язана система послідовного регулювання стоку. Вода, яка скидається на верхніх ступенях каскаду, формує вихідні умови для роботи нижніх гідроелектростанцій. Це створює ефект гідравлічної залежності, коли зміна режиму роботи одного об'єкта неминуче трансформує гідрологічні умови на всій ділянці нижче за течією.

У таких умовах система управління режимами роботи ГЕС набуває багаторівневого характеру. На верхньому рівні здійснюється стратегічне планування водокористування з урахуванням сезонних коливань стоку та енергетичних прогнозів. На оперативному рівні реалізується диспетчерське регулювання, яке враховує поточний баланс навантаження та технічний стан обладнання. На локальному рівні відбувається безпосереднє керування гідроагрегатами, що визначає миттєві зміни витрат води.

Важливою особливістю режимів роботи є їх висока динамічність. Гідроелектростанції Дніпровського каскаду змушені постійно адаптуватися до змін попиту на електроенергію, що призводить до частих змін витрат води та рівнів водосховищ. Така експлуатаційна модель забезпечує енергетичну гнучкість, але водночас формує додаткові гідродинамічні навантаження на водну систему.

Окремого значення набуває проблема узгодження енергетичних та водогосподарських пріоритетів. У багатьох випадках режим роботи ГЕС визначається не лише гідрологічними умовами, а й потребами енергосистеми, що може призводити до відхилень від природного режиму стоку. Це створює системну напругу між вимогами енергетичної ефективності та необхідністю підтримання екологічної рівноваги річкової системи.

Таким чином, режими роботи гідроелектростанцій Дніпровського каскаду слід розглядати як результат складної багатофакторної взаємодії, де гідрологічні, технічні та енергетичні

компоненти утворюють єдину керовану систему з високим рівнем взаємозалежності та динамічної змінності.

2.2.1. Покриття пікових навантажень та маневрові можливості

Гідроелектростанції Дніпровського каскаду виконують критично важливу функцію в системі оперативного балансування електроенергетичного навантаження, забезпечуючи компенсацію короткострокових та добових піків споживання електроенергії. Їх роль у цьому процесі визначається унікальною здатністю швидко змінювати активну потужність у широкому діапазоні без суттєвих технологічних затримок, що принципово відрізняє їх від теплових та атомних генеруючих потужностей.

У пікові періоди навантаження енергосистеми, які формуються внаслідок одночасного зростання побутового та промислового споживання, виникає необхідність швидкого залучення додаткових генеруючих ресурсів. У таких умовах гідроелектростанції виступають як найбільш гнучкий інструмент регулювання, оскільки можуть оперативно збільшувати витрати води через турбіни та відповідно нарощувати виробництво електроенергії. Це дозволяє уникати перевантаження базових генеруючих потужностей і зменшувати ризики порушення стабільності енергосистеми.

Дніпровський каскад у цьому контексті виконує функцію системного демпфера навантаження, згладжуючи добові коливання графіка споживання електроенергії. Завдяки цьому забезпечується більш рівномірне завантаження теплових електростанцій, що підвищує загальну паливну ефективність енергосистеми та знижує витрати на регулювання. Таким чином, гідроенергетика виступає не лише як джерело генерації, а й як елемент оптимізації роботи всієї енергетичної інфраструктури.

Маневрові можливості гідроелектростанцій визначаються технічними характеристиками гідроагрегатів, об'ємом водосховищ та гідравлічними умовами роботи каскаду. Швидкість виходу на номінальну потужність дозволяє використовувати ГЕС для первинного та вторинного регулювання частоти в енергосистемі, що є ключовим параметром її динамічної стійкості. У разі виникнення дисбалансу між генерацією та споживанням електроенергії гідроелектростанції здатні оперативно змінювати режим роботи, стабілізуючи параметри мережі в режимі реального часу.

Окремо слід відзначити роль ГЕС у забезпеченні аварійного резерву потужності. У випадках раптового відключення великих генеруючих блоків або виникнення дефіциту потужності в окремих вузлах енергосистеми гідроелектростанції можуть бути швидко залучені до роботи, компенсуючи втрату генерації. Це підвищує загальну надійність енергосистеми та зменшує ймовірність каскадних відключень.

Разом із тим, інтенсивне використання маневрових режимів має системні гідрологічні наслідки. Часті та різкі зміни витрат води призводять до коливань рівнів водосховищ, що створює додаткове навантаження на прибережні екосистеми. Зокрема, відбувається періодичне затоплення та осушення прибережних зон, що сприяє деградації рослинного покриву, посиленню берегової ерозії та порушенню умов існування гідробіонтів.

Таким чином, маневрові можливості гідроелектростанцій Дніпровського каскаду забезпечують високу адаптивність енергосистеми України до змін навантаження, проте одночасно формують значний екологічний та гідрологічний тиск на водні екосистеми, що потребує врахування при плануванні режимів їх експлуатації.

2.2.2. Вплив на стабільність енергосистеми

Гідроелектростанції відіграють фундаментальну роль у забезпеченні динамічної та статичної стабільності об'єднаної енергетичної системи України. Їх значення визначається здатністю забезпечувати безперервний баланс між генерацією та споживанням електроенергії в умовах постійно змінного навантаження. На відміну від базових типів генерації, гідроелектростанції мають високу швидкодію, що дозволяє використовувати їх як основний інструмент оперативного регулювання енергетичного балансу.

Одним із ключових параметрів стабільності енергосистеми є частота електричної мережі, яка безпосередньо залежить від відповідності між виробленою та спожитою потужністю. Навіть незначні відхилення частоти можуть призводити до порушення синхронної роботи генераторів, спрацювання захистів та, у крайніх випадках, до каскадних аварійних відключень. У цьому контексті гідроелектростанції Дніпровського каскаду виконують функцію первинного стабілізуючого елемента, який забезпечує швидке реагування на зміни навантаження та відхилення частоти.

Завдяки високій маневровості гідроагрегатів ГЕС здатні виконувати як первинне, так і вторинне регулювання частоти. Це означає, що вони беруть участь як у миттєвій компенсації дисбалансу потужності, так і в більш довгостроковому відновленні нормального режиму роботи енергосистеми. Така властивість є критично важливою для підтримання стійкості всієї енергетичної інфраструктури.

Дніпровський каскад має особливе значення у структурі регулюючих потужностей, оскільки поєднує в собі кілька послідовно розташованих гідроелектростанцій, які можуть працювати узгоджено або автономно залежно від системних потреб. Це створює ефект розподіленого регулювання, коли стабілізація енергосистеми здійснюється не одним об'єктом, а цілим комплексом взаємопов'язаних станцій.

У сучасних умовах трансформації енергетичного сектору роль гідроелектростанцій додатково посилюється через зростання частки відновлюваних джерел енергії. Вітрова та сонячна генерація характеризуються високою залежністю від погодних умов і, відповідно, нестабільністю виробництва. Це створює значні коливання в енергосистемі, які потребують швидкої компенсації. Гідроелектростанції виступають у цьому випадку як балансуєчий ресурс, що забезпечує вирівнювання генерації та підтримання стабільності мережі.

Важливим аспектом є також здатність ГЕС до участі в аварійному резервуванні потужності. У випадку раптових відмов великих генеруючих блоків або виникнення дефіциту потужності в окремих частинах енергосистеми гідроелектростанції можуть бути оперативно залучені до роботи, що дозволяє уникати розвитку системних збоїв.

Водночас інтенсивне використання гідроелектростанцій у режимах регулювання та резервування супроводжується підвищенням навантаженням на обладнання та гідротехнічні споруди. Часті зміни режимів роботи призводять до циклічних навантажень на гідроагрегати та коливань рівнів води у водосховищах, що в довгостроковій перспективі потребує врахування як технічних, так і екологічних обмежень при плануванні експлуатації.

Таким чином, гідроелектростанції Дніпровського каскаду є ключовим елементом забезпечення стабільності енергосистеми України, виконуючи функції частотного регулювання, балансування потужності та аварійного резервування, що робить їх незамінною складовою сучасної енергетичної інфраструктури.

2.3. Взаємозв'язок енергетичних та гідрологічних процесів

Функціонування гідроелектростанцій Дніпровського каскаду є невід'ємно пов'язаним із природними та антропогенними гідрологічними процесами річки Дніпро. У даній системі водний ресурс виконує одночасно роль природного середовища та енергетичного носія, що визначає специфіку взаємодії між гідрологічними умовами та режимами виробництва електроенергії.

Енергетичні показники роботи гідроелектростанцій безпосередньо залежать від водності річки, яка визначає доступний обсяг стоку, що може бути використаний для генерації електроенергії. Водночас у зарегульованій системі каскаду природний стік трансформується у керований ресурс, параметри якого змінюються відповідно до потреб енергосистеми. Таким чином, відбувається поступовий перехід від природного гідрологічного режиму до антропогенно модифікованого водного режиму.

Ключовим елементом взаємозв'язку є режим скидів води через гідроелектростанції, який визначає не лише обсяги виробництва електроенергії, але й формує гідродинамічні умови у водосховищах та нижче розташованих ділянках річки. Зміна витрат води призводить до перебудови швидкісних характеристик течії, зміни рівневого режиму та перерозподілу енергії водного потоку.

У каскадній системі Дніпровських водосховищ особливого значення набуває ефект кумулятивного впливу, коли зміни режиму роботи верхніх гідроелектростанцій послідовно транслиуються до нижніх ступенів каскаду. Це формує багаторівневу систему гідрологічних збурень, у якій кожен елемент впливає на наступний, створюючи складну динаміку водного режиму на всій довжині річки.

Зміни енергетичних режимів роботи ГЕС також впливають на процеси перенесення та осадження наносів. Зменшення швидкості течії у водосховищах сприяє акумуляції твердого стоку, тоді як різкі коливання витрат води можуть активізувати ерозійні процеси у прибережних зонах. Це призводить до поступової трансформації морфології русла та зміни гідрологічної структури водних об'єктів.

Важливим аспектом є також вплив на термічний та гідрохімічний режими водосховищ. Зміна часу водообміну та швидкості течії впливає на процеси перемішування водних мас, концентрацію розчиненого кисню та інтенсивність біогеохімічних процесів. У результаті формується новий екологічний стан водної системи, який суттєво відрізняється від природного річкового режиму.

Таким чином, енергетичні та гідрологічні процеси в межах Дніпровського каскаду утворюють єдину взаємопов'язану систему, в якій зміна будь-якого енергетичного параметра неминує призводити до трансформації гідрологічних характеристик. Це обумовлює необхідність розглядати управління гідроелектростанціями як комплексну задачу, що потребує одночасного врахування енергетичних, гідрологічних та екологічних факторів.

2.4. Екологічні наслідки змін режимів роботи гідроелектростанцій

Зміна режимів роботи гідроелектростанцій Дніпровського каскаду формує комплексний багаторівневий вплив на водні екосистеми, який проявляється як у фізико-гідрологічних, так і в гідрохімічних та біологічних характеристиках водних об'єктів. Ці зміни мають кумулятивний характер і поступово трансформують природні екосистеми річки Дніпро у штучно регульовані водні системи.

Одним із найбільш значущих екологічних факторів є коливання рівнів води у водосховищах, що виникають унаслідок маневрових режимів роботи ГЕС. Такі коливання порушують природну стабільність прибережних зон, які є одними з найбільш продуктивних і екологічно чутливих ділянок водної екосистеми. У результаті відбувається активізація берегової ерозії, руйнування ґрунтово-рослинного покриву та поступова деградація прибережних біотопів, що виконують роль нерестових і кормових територій для багатьох видів гідробіонтів.

Зміна гідродинамічного режиму водосховищ безпосередньо впливає на гідрохімічні процеси. Зокрема, зменшення швидкості течії та збільшення часу водообміну сприяють стратифікації водних мас і погіршенню умов кисневого режиму. У окремі періоди спостерігається зниження концентрації розчиненого кисню у придонних шарах, що створює гіпоксичні умови для водних організмів і негативно впливає на їхтіофауну.

Важливим наслідком зарегулювання стоку є інтенсифікація процесів евтрофікації. Надмірне накопичення біогенних елементів, зокрема сполук азоту та фосфору, у поєднанні зі сповільненим водообміном створює сприятливі умови для масового розвитку фітопланктону. Це проявляється у явищі «цвітіння» води, яке супроводжується зниженням прозорості, погіршенням якості води та додатковим дефіцитом кисню внаслідок розкладання органічної маси.

Окремого значення набувають зміни у структурі біоценозів. Трансформація природного річкового середовища у водосховищний тип призводить до зміни видової структури гідробіонтів, витіснення течійних видів та домінування організмів, пристосованих до стоячих вод. Це супроводжується зниженням загального біорізноманіття та порушенням трофічних зв'язків у водних екосистемах.

Додатково слід відзначити вплив коливань рівнів води на репродуктивні процеси риб. Порушення стабільності гідрологічних умов у період нересту негативно впливає на успішність відтворення популяцій, що має довгострокові наслідки для стану їхтіофауни Дніпровського каскаду.

Таким чином, екологічні наслідки змін режимів роботи гідроелектростанцій є системними та багатокомпонентними, охоплюючи фізичні, хімічні та біологічні аспекти функціонування водних екосистем. Це підтверджує необхідність впровадження адаптивних підходів до управління режимами ГЕС, спрямованих на мінімізацію антропогенного навантаження на річкові системи.

2.5. Балансування енергосистеми та екологічні обмеження гідропікового режиму

Гідроелектростанції мають високу цінність для енергосистеми завдяки здатності швидко збільшувати або зменшувати генерацію. У періоди пікового навантаження вони можуть оперативно покривати дефіцит потужності, підтримувати частоту та забезпечувати резерви. Водночас часте маневрування створює гідропіковий режим, за якого витрати води і рівні нижче гребель змінюються протягом доби значно швидше, ніж це властиво природному режиму річки.

Негативний вплив гідропіків проявляється у ризику осушення мілководь, винесенні молоді риб, руйнуванні нерестових субстратів, зміні доступності кормової бази та посиленні берегової ерозії. Особливо чутливими є весняний період нересту, літній період високих температур і зимовий період, коли зниження водообміну може погіршувати кисневий режим. Тому оцінка режимів роботи ГЕС має включати не лише виробіток електроенергії, а й показники екологічної допустимості.

Екологічно орієнтоване управління не означає відмову від маневрових можливостей ГЕС. Йдеться про встановлення таких меж, у яких енергетична гнучкість зберігається, але не призводить до критичних порушень водного середовища. До таких меж належать мінімально допустимий пропуск води, максимальна швидкість підвищення та зниження рівня, допустима амплітуда добових коливань, сезонні обмеження у періоди нересту та вимоги до підтримання водообміну в затоках і мілководних зонах.

Для практичного управління доцільно порівнювати три типи режимів: фактичний диспетчерський режим, енергетично оптимізований режим без екологічних обмежень і збалансований режим із включенням екологічних порогів. Таке порівняння дозволяє визначити, яку частину енергетичної гнучкості можна зберегти без значного погіршення стану екосистем. У багатьох випадках втрати генерації можуть бути меншими, ніж очікується, якщо графік роботи агрегатів формується з урахуванням прогнозу притоку, попиту та часових запізнь у каскаді.

Таблиця 2.1. Енергетичні та екологічні наслідки різних режимів роботи ГЕС

Режим роботи	Енергетичний ефект	Можливий екологічний ризик	Управлінський висновок
Рівномірний режим	Стабільна генерація	Недостатня гнучкість для покриття піків	Доцільний у періоди екологічної чутливості
Піковий режим	Швидке покриття дефіциту потужності	Різкі коливання рівнів і витрат	Потребує обмеження амплітуди та швидкості зміни рівня
Сезонно адаптивний режим	Узгодження генерації з водністю	Потребує якісного прогнозу	Найбільш збалансований для каскадної системи
Аварійний режим	Підтримка надійності енергосистеми	Тимчасове зростання екологічного навантаження	Має супроводжуватися подальшим компенсаційним режимом

2.6. Розширений аналіз енергетично-екологічних компромісів

Узгодження добового графіка генерації з допустимими змінами рівня є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У другому розділі цей аспект показує, що балансування енергосистеми має оцінюватися разом із водогосподарськими та екологічними наслідками, а не лише через виробіток електроенергії.

Практичне значення цього положення полягає в тому, що воно формує основу для вибору допустимих режимів роботи ГЕС. Якщо у процесі планування враховується лише енергетичний результат, система може отримати короткострокову вигоду, але водночас збільшити екологічні ризики. Якщо ж до розрахунку включаються гідрологічні, біологічні та технічні обмеження, тоді управління стає більш збалансованим і передбачуваним.

Для Дніпровського каскаду особливо важливо враховувати просторову послідовність водосховищ. Зміна режиму на одній станції впливає на наступні ланки, тому рішення має оцінюватися не тільки в межах окремого гідровузла, а й у масштабі каскаду. Саме така логіка відповідає сучасним підходам до інтегрованого управління водними ресурсами і дає можливість поєднати енергетичну ефективність із мінімізацією негативного впливу на екосистеми.

Оцінка впливу покриття пікових навантажень на нижні б'єфи є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У другому розділі цей аспект показує, що балансування енергосистеми має оцінюватися разом із водогосподарськими та екологічними наслідками, а не лише через виробіток електроенергії.

Визначення меж безпечного маневрування агрегатів є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У другому розділі цей аспект показує, що балансування енергосистеми має оцінюватися разом із водогосподарськими та екологічними наслідками, а не лише через виробіток електроенергії.

Порівняння енергетичних вигод і екологічних втрат є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У другому розділі цей аспект показує, що балансування енергосистеми має оцінюватися разом із водогосподарськими та екологічними наслідками, а не лише через виробіток електроенергії.

Врахування аварійних потреб об'єднаної енергосистеми є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У другому розділі цей аспект показує, що

балансування енергосистеми має оцінюватися разом із водогосподарськими та екологічними наслідками, а не лише через виробіток електроенергії.

Оцінка ролі ГЕС у компенсації нестабільної генерації ВДЕ є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У другому розділі цей аспект показує, що балансування енергосистеми має оцінюватися разом із водогосподарськими та екологічними наслідками, а не лише через виробіток електроенергії.

Аналіз взаємозв'язку між витратами через турбіни та береговою ерозією є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У другому розділі цей аспект показує, що балансування енергосистеми має оцінюватися разом із водогосподарськими та екологічними наслідками, а не лише через виробіток електроенергії.

Формування екологічно допустимих графіків роботи у період нересту є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У другому розділі цей аспект показує, що балансування енергосистеми має оцінюватися разом із водогосподарськими та екологічними наслідками, а не лише через виробіток електроенергії.

Розроблення компенсаційних режимів після аварійного маневрування є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У другому розділі цей аспект показує, що балансування енергосистеми має оцінюватися разом із водогосподарськими та екологічними наслідками, а не лише через виробіток електроенергії.

2.7. Поглиблення аналізу режимів роботи ГЕС у системі енергетичної безпеки

Оцінка ролі маневрової потужності в умовах дефіциту генерації потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У другому розділі це дозволяє розкрити зв'язок між енергетичною надійністю та водно-екологічною стійкістю. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

На оперативному горизонті важливими є швидкість зміни витрат, рівнів і потужності агрегатів. На сезонному горизонті основну роль відіграють водність року, періоди нересту, температурні умови, льодові явища та потреба у водопостачанні. На довгостроковому горизонті необхідно враховувати накопичувальні екологічні наслідки: евтрофікацію, замулення, зміну прибережних біотопів, втрату природної динаміки стоку та зниження стійкості водних екосистем.

Саме тому модернізована система управління має працювати як контур постійного уточнення. Фактичні дані моніторингу порівнюються з прогнозними, модель оцінює відхилення, а

диспетчер отримує не одну команду, а набір допустимих альтернатив. Такий підхід підвищує якість рішень і дозволяє уникати ситуацій, коли короткострокова енергетична потреба автоматично переважає над екологічною безпекою.

Визначення допустимих меж добового регулювання потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У другому розділі це дозволяє розкрити зв'язок між енергетичною надійністю та водно-екологічною стійкістю. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Аналіз впливу частих пусків агрегатів на технічну та екологічну стабільність потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У другому розділі це дозволяє розкрити зв'язок між енергетичною надійністю та водно-екологічною стійкістю. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Урахування потреб балансування сонячної та вітрової генерації потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У другому розділі це дозволяє розкрити зв'язок між енергетичною надійністю та водно-екологічною стійкістю. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Порівняння нормального, напруженого та аварійного диспетчерського режиму потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У другому розділі це дозволяє розкрити зв'язок між енергетичною надійністю та водно-екологічною стійкістю. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Розроблення принципів екологічної компенсації після вимушеного маневрування потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У другому розділі це дозволяє розкрити зв'язок між енергетичною надійністю та водно-екологічною стійкістю. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Оцінка впливу енергетичного графіка на водокористувачів нижче за течією потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У другому розділі це дозволяє розкрити зв'язок між енергетичною надійністю та водно-екологічною стійкістю. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами:

Формування правил пріоритетності у періоди одночасного енергетичного й водного дефіциту потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У другому розділі це дозволяє розкрити зв'язок між енергетичною надійністю та водно-екологічною стійкістю. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

2.8. Узгодження енергетичної гнучкості з водогосподарською безпекою

Енергетична гнучкість ГЕС є важливою перевагою для об'єднаної енергосистеми, однак вона має реалізовуватися в межах водогосподарської безпеки. Це означає, що графік генерації повинен враховувати не лише потребу у потужності, а й допустимий стан водного об'єкта після виконання такого графіка. Для каскаду водосховищ це питання є принциповим, оскільки наслідки маневрування можуть поширюватися нижче за течією.

У практичному управлінні доцільно встановлювати коридори маневрування. У межах такого коридору ГЕС може змінювати потужність, але не перевищує допустимих швидкостей зміни рівня і не порушує мінімальних екологічних витрат. Якщо енергосистема потребує виходу за ці межі, рішення має розглядатися як виняткове і супроводжуватися фіксацією ризику та подальшим компенсаційним режимом.

Такий підхід дозволяє поєднати надійність енергопостачання з відповідальним використанням водних ресурсів. Він також створює основу для більш прозорого діалогу між енергетичними, водогосподарськими та природоохоронними структурами, оскільки кожне рішення може бути оцінене за спільним набором критеріїв.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

Проведений комплексний аналіз показав, що гідроелектростанції Дніпровського каскаду є одним із ключових системоутворюючих елементів об'єднаної енергетичної системи України. Їх функціональна роль виходить за межі простого виробництва електроенергії та охоплює критично важливі завдання оперативного балансування потужності, підтримання частотної стабільності, покриття пікових навантажень і забезпечення резервування енергосистеми в умовах змінного попиту.

Встановлено, що маневрові можливості гідроелектростанцій визначають їх унікальну здатність швидко реагувати на коливання попиту на електроенергію, що особливо важливо у пікові періоди споживання та в умовах нестабільної роботи інших типів генерації. Завдяки цьому Дніпровський каскад виконує функцію системного регулятора, який забезпечує вирівнювання добових і короткострокових дисбалансів між виробництвом та споживанням електроенергії.

Дослідження також показало, що режими роботи гідроелектростанцій формуються під впливом багатофакторної взаємодії, яка включає гідрологічні умови річки Дніпро, технічні можливості гідроагрегатів, диспетчерські вимоги енергосистеми, водогосподарські потреби та екологічні обмеження. У результаті формується складна ієрархічна система управління, в якій енергетичні та водні ресурси виступають взаємопов'язаними компонентами єдиного технологічного процесу.

Окремо встановлено, що режими роботи ГЕС безпосередньо впливають на водний режим водосховищ і нижніх б'єфів. Зміна витрат через турбіни, добові коливання рівнів води, періодичне спрацювання та наповнення водосховищ формують специфічний гідрологічний режим, який істотно відрізняється від природного. Такий режим забезпечує енергетичну гнучкість, проте водночас створює додаткове навантаження на водні та прибережні екосистеми.

Виявлено, що інтенсивна експлуатація маневрових режимів роботи ГЕС супроводжується значним антропогенним навантаженням на водні екосистеми. Це проявляється у коливаннях рівнів води, порушенні природної динаміки гідрологічного режиму, деградації прибережних екосистем та зниженні стабільності біологічних угруповань. Додатково спостерігається

активізація процесів евтрофікації, погіршення кисневого режиму, зміна температурних умов і трансформація середовищ існування гідробіонтів.

Особливо чутливими до змін режимів роботи гідроелектростанцій є мілководні ділянки, нерестові зони, прибережна рослинність і донні біоценози. Різкі коливання рівня води можуть призводити до осушення нерестовищ, порушення умов розвитку молоді риб, зменшення площі продуктивних біотопів і погіршення кормової бази. Це свідчить про необхідність урахування сезонної екологічної чутливості під час планування графіків роботи ГЕС.

Таким чином, встановлено, що існує об'єктивний конфлікт між енергетичною ефективністю функціонування гідроелектростанцій та екологічною стабільністю річкових систем. З одного боку, ГЕС є необхідними для забезпечення надійності енергопостачання та балансування енергосистеми. З іншого боку, надмірно інтенсивне маневрування може погіршувати стан водних екосистем і знижувати їхню здатність до самовідновлення.

У зв'язку з цим обґрунтовано необхідність переходу до більш збалансованих моделей управління, які враховують не лише енергетичні показники, але й довгострокові екологічні наслідки експлуатації водних ресурсів. Такий підхід має передбачати встановлення допустимих меж коливання рівнів, контроль швидкості зміни витрат, підтримання мінімально необхідного водообміну, а також урахування біологічно важливих періодів, зокрема нересту та зимівлі гідробіонтів.

Отримані результати підтверджують доцільність впровадження сучасних підходів до управління режимами роботи гідроелектростанцій, зокрема із використанням інтелектуальних систем аналізу, прогнозування та оптимізації. Такі підходи дозволять точніше оцінювати наслідки різних сценаріїв роботи ГЕС, узгоджувати енергетичні потреби з екологічними обмеженнями та формувати більш адаптивні графіки експлуатації водосховищ.

Отже, подальша модернізація режимів роботи гідроелектростанцій Дніпровського каскаду має базуватися на принципах інтегрованого еколого-енергетичного управління. Це дасть змогу забезпечити оптимізацію енергетичних процесів при одночасному зниженні негативного впливу на природні екосистеми, що є ключовим завданням сталого розвитку гідроенергетики України.

РОЗДІЛ 3.

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В УПРАВЛІННІ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ГЕС

3.1. Сучасні підходи до використання штучного інтелекту в енергетиці

Сучасний етап розвитку енергетичних систем характеризується глибокою цифровою трансформацією, яка охоплює всі рівні управління — від генерації електроенергії до диспетчеризації та прогнозування енергетичних потоків. У цьому контексті методи штучного інтелекту (ШІ) набувають системоутворюючого значення, оскільки дозволяють перейти від класичних детермінованих і статичних моделей до адаптивних, самооновлюваних та навчальних систем управління.

Традиційні підходи в енергетиці базуються на заздалегідь визначених математичних моделях, які описують поведінку енергосистеми за фіксованих умов. Однак сучасні енергетичні мережі характеризуються високим рівнем невизначеності, що пов'язано зі зростанням частки відновлюваних джерел енергії, коливаннями попиту, кліматичними змінами та складною структурою генерації. У таких умовах класичні моделі втрачають точність і гнучкість, що зумовлює необхідність використання інтелектуальних алгоритмів.

Штучний інтелект у енергетиці виконує функцію інструменту обробки великих масивів даних (Big Data), які формуються в реальному часі. До таких даних належать показники навантаження енергосистеми, параметри роботи генеруючих потужностей, гідрологічні характеристики водних об'єктів, а також метеорологічні умови. Інтеграція цих різномірних джерел інформації дозволяє формувати комплексне уявлення про стан енергетичної системи та прогнозувати її поведінку.

У сучасній енергетиці штучний інтелект застосовується у кількох ключових напрямках. Першим є прогнозування електричного навантаження, що дозволяє оптимізувати режим роботи генеруючих потужностей та зменшувати витрати на резервування. Другим напрямком є оптимізація режимів генерації, де алгоритми ШІ визначають найбільш ефективні сценарії розподілу навантаження між різними типами електростанцій. Третім напрямком є моніторинг технічного стану обладнання, який базується на аналізі аномалій та передбаченні можливих відмов.

Особливе значення штучний інтелект має для гідроенергетики, зокрема для управління складними каскадними системами, такими як Дніпровський каскад гідроелектростанцій. У цьому випадку ШІ дозволяє інтегрувати гідрологічні, енергетичні та екологічні параметри в єдину модель управління. Це забезпечує можливість одночасного врахування рівнів водосховищ, притоку води, режимів роботи гідроагрегатів та потреб енергосистеми.

Сучасні підходи до використання штучного інтелекту базуються на різних класах алгоритмів. Методи машинного навчання дозволяють виявляти приховані закономірності у великих масивах історичних даних. Нейронні мережі використовуються для моделювання складних нелінійних залежностей між параметрами енергетичної системи. Глибоке навчання (Deep Learning) забезпечує високу точність прогнозування за рахунок багаторівневої обробки даних. Окреме місце займають алгоритми підкріплювального навчання, які дозволяють системам самостійно формувати оптимальні стратегії управління шляхом взаємодії з середовищем.

Важливою тенденцією є також розвиток гібридних моделей, які поєднують фізичні (гідродинамічні) моделі з методами штучного інтелекту. Такий підхід дозволяє поєднати

переваги теоретичного опису процесів із високою адаптивністю даних моделей. Це особливо актуально для гідроенергетичних систем, де важливим є врахування як фізичних законів руху води, так і динамічних змін у роботі енергосистеми.

Таким чином, сучасні підходи до використання штучного інтелекту в енергетиці формують нову парадигму управління енергетичними системами, яка базується на принципах адаптивності, прогнозованості та інтегрованого аналізу даних. Це створює передумови для підвищення ефективності роботи енергетичних об'єктів, зокрема гідроелектростанцій, та забезпечення їх узгодженої взаємодії з природними екосистемами.

3.2. Моделі прогнозування гідрологічних показників

Ефективне управління режимами роботи гідроелектростанцій Дніпровського каскаду безпосередньо залежить від якості та оперативності прогнозування гідрологічних процесів. Гідрологічні показники виступають базовою вхідною інформацією для прийняття диспетчерських рішень, оскільки визначають доступний водно-енергетичний потенціал та обмеження щодо режимів роботи гідроагрегатів. До основних прогнозованих параметрів належать водність річки Дніпро, рівні водосховищ, обсяги притоку, швидкість трансформації стоку в межах каскаду, а також сезонна та короткострокова мінливість гідрологічного режиму.

Умови функціонування Дніпровського каскаду характеризуються високим рівнем антропогенного регулювання, що суттєво ускладнює класичне моделювання гідрологічних процесів. Природний річковий режим у значній мірі трансформований у керований водний режим, де значення витрат води та рівнів визначаються не лише природними факторами, а й енергетичними потребами системи. Це призводить до формування складних нелінійних залежностей між вхідними та вихідними параметрами, що обмежує ефективність традиційних методів прогнозування.

Класичні підходи до гідрологічного прогнозування базуються на статистичних моделях, методах екстраполяції часових рядів та фізично обґрунтованих гідродинамічних рівняннях. Вони враховують багаторічні спостереження, метеорологічні дані та сезонні закономірності. Однак у складних системах із високим рівнем регулювання ці методи часто не забезпечують достатньої точності, оскільки не здатні повною мірою врахувати багатofакторні взаємодії та змінність умов у часі.

Застосування методів штучного інтелекту дозволяє суттєво розширити можливості гідрологічного прогнозування. Алгоритми машинного навчання здатні працювати з великими масивами різномірних даних, включаючи гідрологічні, метеорологічні, географічні та експлуатаційні параметри гідроелектростанцій. Це забезпечує формування багатовимірних моделей, які враховують складні взаємозв'язки між природними та антропогенними факторами.

Нейронні мережі, зокрема рекурентні та глибокі архітектури, є особливо ефективними для аналізу часових рядів гідрологічних даних. Вони дозволяють виявляти приховані закономірності у динаміці стоку, прогнозувати зміни рівнів водосховищ та оцінювати ймовірні сценарії розвитку гідрологічної ситуації. Важливою перевагою таких моделей є їх здатність адаптуватися до нових даних без необхідності повного переналаштування.

У контексті Дніпровського каскаду особливого значення набуває врахування каскадного ефекту, коли зміни гідрологічного режиму на верхніх ділянках річки впливають на умови роботи нижче розташованих гідроелектростанцій. Інтелектуальні моделі прогнозування дозволяють інтегрувати цей фактор у загальну систему аналізу, що забезпечує більш точне відображення реальних умов функціонування каскаду.

Додатковим напрямом розвитку є використання гібридних моделей, які поєднують фізично обґрунтовані гідрологічні підходи з алгоритмами штучного інтелекту. Такий підхід дозволяє компенсувати недоліки кожного з методів окремо, забезпечуючи одночасно фізичну коректність і високу прогностичну здатність моделі.

Особливу роль відіграють адаптивні моделі прогнозування, які здатні оновлювати свої параметри в режимі реального часу на основі нових спостережень. Це дозволяє враховувати швидкі зміни гідрологічної ситуації, зумовлені як природними явищами (опади, танення снігу, посухи), так і регулюванням стоку через роботу гідроелектростанцій.

Таким чином, сучасні моделі прогнозування гідрологічних показників на основі штучного інтелекту забезпечують значне підвищення точності та оперативності оцінки водних ресурсів, що є критично важливим для ефективного управління Дніпровським каскадом та оптимізації його енергетичних і екологічних режимів.

3.3. Інтелектуальні системи оптимізації режимів роботи ГЕС

Інтелектуальні системи управління гідроелектростанціями представляють собою сучасний етап розвитку автоматизованих технологій диспетчеризації, що базується на поєднанні методів штучного інтелекту, теорії оптимізації та цифрового моделювання складних енергетичних систем. Їх ключова функція полягає у забезпеченні багатокритеріальної оптимізації режимів роботи гідроелектростанцій, де одночасно враховуються енергетична ефективність, надійність енергосистеми та екологічні обмеження функціонування водних об'єктів.

На відміну від традиційних систем управління, які базуються на жорстко заданих правилах і регламентованих диспетчерських командах, інтелектуальні системи здатні адаптуватися до змінних умов у режимі реального часу. Це досягається за рахунок інтеграції потоків даних із різних джерел, включаючи гідрологічні спостереження, енергетичне навантаження, метеорологічні прогнози та технічні параметри роботи обладнання. У результаті формується єдина інформаційно-аналітична платформа, яка забезпечує підтримку прийняття рішень на всіх рівнях управління гідроенергетичною системою.

Основою функціонування таких систем є поєднання прогнозних моделей та алгоритмів оптимізації. Прогнозні моделі дозволяють оцінювати майбутній стан гідрологічної та енергетичної системи, тоді як оптимізаційні алгоритми визначають найбільш ефективні сценарії роботи гідроелектростанцій з урахуванням встановлених критеріїв. До таких критеріїв належать мінімізація пікових навантажень на обладнання, стабілізація рівнів водосховищ, зменшення втрат енергії та обмеження негативного впливу на екосистеми.

У контексті Дніпровського каскаду інтелектуальні системи набувають особливого значення, оскільки каскадна структура передбачає тісний гідравлічний та енергетичний зв'язок між окремими гідроелектростанціями. Зміна режиму роботи одного об'єкта автоматично впливає на умови функціонування інших, що створює складну багаторівневу систему взаємозалежностей. Інтелектуальне управління дозволяє координувати роботу всіх станцій як єдиного комплексу, забезпечуючи оптимальний розподіл водних ресурсів і рівномірне регулювання стоку.

Однією з найбільш перспективних технологій у цій сфері є методи підкріплювального навчання, які дозволяють системі самостійно формувати стратегії управління шляхом взаємодії з модельованим середовищем. У процесі навчання система отримує «винагороду» за ефективні управлінські рішення, що сприяє поступовому вдосконаленню її поведінки. У

результаті формується адаптивний механізм управління, здатний мінімізувати енергетичні втрати та одночасно знижувати екологічне навантаження на водні екосистеми.

Важливим елементом сучасних інтелектуальних систем є концепція цифрових двійників гідроенергетичних об'єктів. Цифровий двійник являє собою віртуальну модель реальної гідроелектростанції або каскаду, яка відтворює його фізичні, гідрологічні та енергетичні процеси. Така модель дозволяє проводити багатосценарне моделювання режимів роботи, аналізувати наслідки управлінських рішень та тестувати оптимізаційні стратегії без впливу на реальну екосистему. Це суттєво підвищує безпеку та ефективність процесу управління.

Окремо слід відзначити роль інтелектуальних систем у зменшенні екологічного навантаження. Завдяки можливості врахування екологічних обмежень у процесі оптимізації, такі системи дозволяють обмежувати різкі коливання рівнів води, зменшувати негативний вплив на прибережні екосистеми та підтримувати більш природний гідрологічний режим у межах технічно можливого.

Таким чином, впровадження інтелектуальних систем оптимізації режимів роботи гідроелектростанцій відкриває принципово новий рівень управління гідроенергетичними комплексами. Воно забезпечує перехід до адаптивної, прогнозованої та екологічно орієнтованої моделі експлуатації, що є особливо актуальним для складних каскадних систем, таких як Дніпровський каскад. Це створює передумови для підвищення загальної ефективності енергетичної системи України при одночасному зниженні антропогенного впливу на водні ресурси та екосистеми.

3.4. Інформаційна база та архітектура інтелектуальної системи управління ГЕС

Застосування штучного інтелекту в управлінні режимами роботи ГЕС потребує якісної інформаційної бази. До неї мають входити гідрологічні дані про притік, рівні води, витрати через турбіни та водообмін; метеорологічні дані про опади, температуру повітря, випаровування і льодові явища; енергетичні дані про графік навантаження, потребу в резервах і стан енергосистеми; екологічні дані про температуру води, розчинений кисень, біогенні речовини, прозорість і біологічні індикатори.

Окремі набори даних не забезпечують якісного рішення, якщо вони не синхронізовані за часом, простором і одиницями вимірювання. Наприклад, добовий прогноз попиту на електроенергію має бути зіставлений із прогнозом притоку, станом водосховища та сезонною чутливістю біотопів. Лише після такого узгодження можна оцінювати, чи є певне підвищення генерації прийнятним з погляду водного режиму.

Архітектура інтелектуальної системи може включати п'ять рівнів: збір даних, перевірку якості, прогнозування, оптимізацію та пояснення рекомендацій. Блок перевірки якості є особливо важливим, оскільки пропуски, затримки або аномальні значення у гідрологічних рядах можуть призвести до хибного рішення. Для зменшення такого ризику доцільно застосовувати автоматичне виявлення викидів, порівняння сусідніх постів, перевірку водного балансу та маркування даних за ступенем надійності.

Моделі штучного інтелекту мають працювати не як закритий алгоритм, а як частина прозорої інформаційної системи. Для кожного запропонованого режиму повинні зберігатися вхідні дані, версія моделі, прогнозні значення, активні обмеження та пояснення причин вибору.

Такий підхід підвищує довіру до цифрового управління і дає змогу після фактичної реалізації режиму порівнювати прогноз із результатом.

Таблиця 3.1. Структура даних для інтелектуальної системи управління

Група даних	Приклади показників	Роль у моделі
Гідрологічні дані	Притік, рівень, витрата, водообмін	Прогноз запасів води та допустимих режимів
Метеорологічні дані	Опади, температура, випаровування	Уточнення притоку та ризику маловоддя
Енергетичні дані	Навантаження, резерв, потреба в маневруванні	Визначення часу і величини генерації
Екологічні дані	Кисень, температура води, біогенні речовини	Формування природоохоронних обмежень
Технічні дані	ККД агрегатів, допустимі навантаження	Перевірка реалістичності графіків роботи

3.5. Прогнозування гідрологічних та екологічних показників засобами машинного навчання

Одним із ключових завдань є короткостроковий прогноз притоку до водосховищ на горизонті від кількох годин до трьох діб. Для цього можуть застосовуватися регресійні алгоритми, ансамблеві методи, рекурентні нейронні мережі та LSTM-моделі. Вибір конкретного методу залежить від довжини історичного ряду, частоти спостережень, наявності пропусків і вимог до пояснюваності результатів.

Для Дніпровського каскаду прогноз повинен враховувати інерційність великих водосховищ і водночас швидко реакцію енергетичного режиму на диспетчерські команди. Водосховище згладжує природні коливання стоку, але оперативні скиди через турбіни можуть створювати короточасні зміни нижче за течією. Саме тому модель має працювати з різними масштабами часу: погодинні дані потрібні для оцінки гідропіків, добові - для планування роботи агрегатів, місячні - для сезонної оцінки водності та екологічних ризиків.

Якість прогнозування не можна оцінювати лише за статистичною похибкою. Для водогосподарських рішень важливо, чи правильно модель відтворює екстремальні ситуації, чи не занижує ризик маловоддя, чи не пропонує надмірно різкі зміни витрат і чи зберігає фізичну узгодженість між притоком, запасом води та скидами. Тому до набору метрик доцільно включати середню абсолютну похибку, коефіцієнт ефективності Неша-Саткліффа, частку правильних попереджень про ризикові події та кількість порушень водного балансу.

3.6. Розширене обґрунтування використання моделей штучного інтелекту

Побудова прогнозу притоку на короткостроковому горизонті є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У третьому розділі це

обґрунтовує необхідність застосування штучного інтелекту як інструмента прогнозування, класифікації ризиків і підготовки рекомендацій для диспетчерського управління.

Практичне значення цього положення полягає в тому, що воно формує основу для вибору допустимих режимів роботи ГЕС. Якщо у процесі планування враховується лише енергетичний результат, система може отримати короткострокову вигоду, але водночас збільшити екологічні ризики. Якщо ж до розрахунку включаються гідрологічні, біологічні та технічні обмеження, тоді управління стає більш збалансованим і передбачуваним.

Для Дніпровського каскаду особливо важливо враховувати просторову послідовність водосховищ. Зміна режиму на одній станції впливає на наступні ланки, тому рішення має оцінюватися не тільки в межах окремого гідровузла, а й у масштабі каскаду. Саме така логіка відповідає сучасним підходам до інтегрованого управління водними ресурсами і дає можливість поєднати енергетичну ефективність із мінімізацією негативного впливу на екосистеми.

Використання LSTM-моделей для аналізу часових рядів є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У третьому розділі це обґрунтовує необхідність застосування штучного інтелекту як інструмента прогнозування, класифікації ризиків і підготовки рекомендацій для диспетчерського управління.

Застосування ансамблевих методів машинного навчання є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У третьому розділі це обґрунтовує необхідність застосування штучного інтелекту як інструмента прогнозування, класифікації ризиків і підготовки рекомендацій для диспетчерського управління.

Поєднання фізично обґрунтованих моделей із алгоритмами ШІ є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У третьому розділі це обґрунтовує необхідність застосування штучного інтелекту як інструмента прогнозування, класифікації ризиків і підготовки рекомендацій для диспетчерського управління.

Контроль якості вхідних гідрологічних даних є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У третьому розділі це обґрунтовує необхідність застосування штучного інтелекту як інструмента прогнозування, класифікації ризиків і підготовки рекомендацій для диспетчерського управління.

Оцінка невизначеності прогнозу і довірчих інтервалів є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У третьому розділі це обґрунтовує

необхідність застосування штучного інтелекту як інструмента прогнозування, класифікації ризиків і підготовки рекомендацій для диспетчерського управління.

Пояснюваність рекомендацій інтелектуальної системи є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У третьому розділі це обґрунтовує необхідність застосування штучного інтелекту як інструмента прогнозування, класифікації ризиків і підготовки рекомендацій для диспетчерського управління.

Побудова цифрового контуру диспетчерського супроводу є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У третьому розділі це обґрунтовує необхідність застосування штучного інтелекту як інструмента прогнозування, класифікації ризиків і підготовки рекомендацій для диспетчерського управління.

Використання даних дистанційного зондування для моніторингу водосховищ є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У третьому розділі це обґрунтовує необхідність застосування штучного інтелекту як інструмента прогнозування, класифікації ризиків і підготовки рекомендацій для диспетчерського управління.

Формування бази історичних сценаріїв роботи каскаду є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У третьому розділі це обґрунтовує необхідність застосування штучного інтелекту як інструмента прогнозування, класифікації ризиків і підготовки рекомендацій для диспетчерського управління.

Валідація моделей на ретроспективних режимах є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У третьому розділі це обґрунтовує необхідність застосування штучного інтелекту як інструмента прогнозування, класифікації ризиків і підготовки рекомендацій для диспетчерського управління.

Врахування кібербезпеки під час цифровізації критичної інфраструктури є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У третьому розділі це обґрунтовує необхідність застосування штучного інтелекту як інструмента прогнозування, класифікації ризиків і підготовки рекомендацій для диспетчерського управління.

3.7. Поглиблення методики побудови інтелектуальної системи

Формування навчальної вибірки для моделей прогнозування потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У третьому розділі це посилює практичну частину дослідження, оскільки показує повний шлях від даних до рекомендації. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

На оперативному горизонті важливими є швидкість зміни витрат, рівнів і потужності агрегатів. На сезонному горизонті основну роль відіграють водність року, періоди нересту, температурні умови, льодові явища та потреба у водопостачанні. На довгостроковому горизонті необхідно враховувати накопичувальні екологічні наслідки: евтрофікацію, замулення, зміну прибережних біотопів, втрату природної динаміки стоку та зниження стійкості водних екосистем.

Саме тому модернізована система управління має працювати як контур постійного уточнення. Фактичні дані моніторингу порівнюються з прогнозними, модель оцінює відхилення, а диспетчер отримує не одну команду, а набір допустимих альтернатив. Такий підхід підвищує якість рішень і дозволяє уникати ситуацій, коли короткострокова енергетична потреба автоматично переважає над екологічною безпекою.

Нормалізація та перевірка гідрологічних часових рядів потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У третьому розділі це посилює практичну частину дослідження, оскільки показує повний шлях від даних до рекомендації. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Виявлення аномальних спостережень у даних моніторингу потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У третьому розділі це посилює практичну частину дослідження, оскільки показує повний шлях від даних до рекомендації. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Такий підхід підвищує якість рішень і дозволяє уникати ситуацій, коли короткострокова енергетична потреба автоматично переважає над екологічною безпекою.

Оцінка якості прогнозу за кількома статистичними метриками потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У третьому розділі це посилює практичну частину дослідження, оскільки показує повний шлях від даних до рекомендації. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Побудова сценарного модуля для порівняння альтернативних режимів потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У третьому розділі це посилює практичну частину дослідження, оскільки показує повний шлях від даних до рекомендації. Це означає,

що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Використання інтерпретованих моделей для пояснення рекомендацій потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У третьому розділі це посилює практичну частину дослідження, оскільки показує повний шлях від даних до рекомендації. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Застосування гібридних моделей із фізичними обмеженнями потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У третьому розділі це посилює практичну частину дослідження, оскільки показує повний шлях від даних до рекомендації. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Визначення меж автоматизації диспетчерських рішень потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У третьому розділі це посилює практичну частину дослідження, оскільки показує повний шлях від даних до рекомендації. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Створення журналу рішень для подальшої перевірки моделі потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У третьому розділі це посилює практичну частину дослідження, оскільки показує повний шлях від даних до рекомендації. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Організація зворотного зв'язку між фактичним режимом і навчанням моделі потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У третьому розділі це посилює практичну частину дослідження, оскільки показує повний шлях від даних до рекомендації. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

3.8. Перевірка якості моделей та контроль надійності цифрових рекомендацій

Окремим елементом застосування штучного інтелекту в управлінні ГЕС має бути перевірка якості моделей. Для гідроенергетичної системи недостатньо отримати модель, яка добре відтворює середні значення притоку або рівня води. Значно важливіше, щоб вона коректно працювала у ситуаціях, які є управлінськи критичними: під час маловоддя, різкого збільшення притоку, аварійної потреби у маневровій потужності, весняного нересту або літнього погіршення кисневого режиму. Саме в таких умовах похибка прогнозу може мати найбільші наслідки.

Перевірка моделі має включати кілька рівнів. Перший рівень - статистичний, де оцінюються середня абсолютна похибка, середньоквадратична похибка, коефіцієнт детермінації та інші показники точності. Другий рівень - гідрологічний, де перевіряється відповідність прогнозу фізичним обмеженням: водному балансу, допустимим межах рівнів, реалістичним

швидкостям зміни витрат. Третій рівень - екологічний, де оцінюється, чи не призводить запропонований режим до перевищення природоохоронних порогів.

Важливо також оцінювати не лише точність, а й стабільність моделі. Якщо за незначної зміни вхідних даних алгоритм пропонує різко інший режим роботи ГЕС, така модель є недостатньо надійною для практичного використання. Для зменшення цього ризику доцільно застосовувати сценарне тестування, коли один і той самий алгоритм перевіряється на декількох варіантах притоку, попиту на електроенергію та екологічних обмежень.

Контроль цифрових рекомендацій повинен передбачати обов'язкову фіксацію причин вибору певного режиму. У рекомендації має зазначатися, які дані були використані, який прогноз сформовано, які обмеження були активними, які альтернативні сценарії відхилено і чому. Така прозорість є необхідною для довіри до системи, особливо тоді, коли йдеться про критичну інфраструктуру та природні ресурси загальнодержавного значення.

Для Дніпровського каскаду доцільним є принцип поступового розширення ролі ШІ. На початковому етапі модель може виконувати функцію аналітичної підтримки: попереджати про ризики, порівнювати сценарії та показувати очікувані наслідки. Надалі, після накопичення статистики точності, система може використовуватися для автоматичного формування попередніх графіків, які потім перевіряються диспетчером. Повна автоматизація без людського контролю для такої системи є недоцільною, оскільки рішення мають високі екологічні, технічні та соціальні наслідки.

Таким чином, якість інтелектуальної системи визначається не тільки складністю алгоритму, а й наявністю механізмів перевірки, пояснення, аудиту та коригування. У магістерському дослідженні це має принципове значення, оскільки демонструє реалістичне бачення штучного інтелекту: не як універсального заміника управлінця, а як інструмента, що підсилює професійне рішення і робить його більш обґрунтованим.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

Проведений аналіз засвідчив, що застосування технологій штучного інтелекту в гідроенергетиці є одним із найбільш перспективних напрямів модернізації сучасних енергетичних систем. Його впровадження забезпечує перехід від традиційних принципів диспетчерського управління до адаптивних, даноорієнтованих моделей прийняття рішень, які здатні функціонувати в умовах високої невизначеності та багатофакторної динаміки енергетичних і гідрологічних процесів.

Встановлено, що використання методів машинного навчання, нейронних мереж та алгоритмів глибокого навчання суттєво підвищує точність прогнозування гідрологічних показників, зокрема водності річки, рівнів водосховищ, режимів притоку, температурного режиму та можливих змін водного балансу. Це особливо важливо для складних регульованих систем, таких як Дніпровський каскад, де природні гідрологічні процеси тісно переплетені з антропогенним управлінням стоком.

Виявлено, що інтеграція інтелектуальних систем прогнозування з алгоритмами оптимізації створює можливість формування комплексних моделей управління режимами роботи гідроелектростанцій. Такі моделі дозволяють одночасно враховувати енергетичні потреби системи, гідрологічні обмеження, технічні можливості гідроагрегатів та екологічні вимоги, що забезпечує багатокритеріальну оптимізацію функціонування гідроенергетичних об'єктів.

Окремо встановлено, що застосування інтелектуальних систем управління, включаючи підкріплювальне навчання та концепцію цифрових двійників, дозволяє реалізувати

принципово новий рівень координації роботи гідроелектростанцій. Це забезпечує узгоджене функціонування всіх елементів каскаду як єдиної системи, мінімізує різкі коливання гідрологічних параметрів та підвищує загальну стабільність енергетичної інфраструктури.

Важливою перевагою штучного інтелекту є здатність працювати з великими масивами різномірних даних. До таких даних належать гідрологічні спостереження, метеорологічні прогнози, диспетчерські графіки, показники генерації, рівні водосховищ, дані екологічного моніторингу та інформація про технічний стан обладнання. Поєднання цих джерел у єдиній інформаційній системі створює основу для більш точного прогнозування та прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Доведено, що інтелектуальні системи можуть бути ефективними не лише для прогнозування, а й для оцінки альтернативних сценаріїв роботи ГЕС. Завдяки цьому диспетчер або оператор отримує можливість порівнювати кілька варіантів режиму за енергетичними, гідрологічними та екологічними критеріями. Такий підхід підвищує прозорість управління і дозволяє заздалегідь оцінювати можливі наслідки кожного рішення.

Особливе значення має пояснюваність моделей штучного інтелекту. У сфері гідроенергетики рішення не можуть бути повністю автоматизованими без контролю фахівця, оскільки вони впливають на енергетичну безпеку, водні ресурси та стан природних екосистем. Тому інтелектуальні системи мають не лише формувати рекомендації, а й пояснювати, на основі яких даних і критеріїв ці рекомендації були отримані.

У межах дослідження також обґрунтовано доцільність поєднання моделей штучного інтелекту з фізично обґрунтованими гідрологічними підходами. Гібридні моделі дозволяють зберігати фізичну коректність розрахунків і водночас використовувати переваги машинного навчання для виявлення складних нелінійних залежностей. Такий підхід є особливо перспективним для каскадних систем, де режими роботи окремих ГЕС взаємопов'язані між собою.

Отже, результати розділу підтверджують, що штучний інтелект може стати ефективним інструментом модернізації управління режимами роботи гідроелектростанцій. Його застосування дозволяє підвищити точність прогнозування, покращити якість диспетчерських рішень, забезпечити багатокритеріальну оптимізацію та створити передумови для більш збалансованого поєднання енергетичних і екологічних цілей. Для Дніпровського каскаду це має особливе значення, оскільки саме тут необхідне узгоджене управління всіма ланками системи з урахуванням водності, енергетичних потреб і екологічних обмежень.

РОЗДІЛ 4.

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ З УРАХУВАННЯМ ЕКОЛОГІЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ

4.1. Підходи до зменшення негативного впливу на екосистеми

Оптимізація режимів роботи гідроелектростанцій у сучасних умовах розглядається як складна міждисциплінарна задача, що перебуває на перетині гідроенергетики, гідроекології та системного управління водними ресурсами. Її сутність полягає у пошуку збалансованого компромісу між необхідністю забезпечення стабільного виробництва електроенергії та потребою збереження природної динаміки водних екосистем. Особливо це актуально для Дніпровського каскаду, де багаторічне регулювання стоку призвело до глибокої трансформації природного режиму річки Дніпро, включаючи зміну швидкості течії, гідрологічної структури та морфології берегових зон.

Негативний вплив гідроенергетичних об'єктів проявляється не лише у фізичних змінах гідрологічного режиму, але й у порушенні біологічних та біогеохімічних процесів у водних екосистемах. Зокрема, коливання рівнів води у водосховищах спричиняють деградацію прибережної рослинності, руйнування нерестовищ риб, а також зміну умов існування гідробіонтів. Крім того, уповільнення течії води у водосховищах сприяє накопиченню органічних речовин, що підсилює процеси евтрофікації та погіршення якості води.

У зв'язку з цим сучасні підходи до мінімізації негативного впливу базуються на впровадженні екологічно орієнтованих режимів роботи гідроелектростанцій. Такі режими передбачають обмеження різких добових та сезонних коливань рівнів води, а також поступову зміну витрат стоку, що дозволяє зменшити гідродинамічний стрес для екосистем. Важливим елементом є забезпечення більш стабільного гідрологічного фону, який наближається до природних умов функціонування річкової системи.

Окрему роль відіграє концепція екологічних попусків, яка полягає у цілеспрямованому регулюванні витрат води з метою відтворення природних гідрологічних процесів. Такі попуски можуть імітувати сезонні паводки, періоди високої водності або природні коливання стоку, що є критично важливим для підтримання життєвих циклів водних організмів. Вони сприяють відновленню міграційних шляхів риб, покращенню умов нересту та відновленню прибережних екосистем.

Додатковим напрямом зменшення екологічного навантаження є впровадження адаптивного управління рівнями водосховищ, яке базується на оперативному врахуванні гідрологічної ситуації та екологічного стану водних об'єктів. Такий підхід дозволяє уникати різких перепадів рівнів води, які є одними з основних факторів деградації прибережних зон.

У сучасних умовах значного розвитку набуває інтеграція екологічних критеріїв у системи управління гідроелектростанціями, зокрема через використання моделей штучного інтелекту. Це дозволяє враховувати екологічні обмеження не як зовнішній фактор, а як невід'ємну складову оптимізаційного процесу. У результаті формується новий підхід до управління, в якому екологічна безпека розглядається на рівні з енергетичною ефективністю.

Таким чином, сучасні підходи до зменшення негативного впливу гідроелектростанцій на екосистеми базуються на поєднанні екологічно орієнтованих режимів роботи, керованих попусків води та інтелектуальних систем управління. Їх комплексне впровадження дозволяє частково відновити природну динаміку річкових екосистем навіть в умовах високого рівня антропогенного регулювання, характерного для Дніпровського каскаду.

4.2. Сценарії оптимізації режимів роботи ГЕС

Сценарний підхід до оптимізації режимів роботи гідроелектростанцій є одним із ключових інструментів сучасного управління складними енергогідрологічними системами. Його сутність полягає у формуванні набору альтернативних варіантів експлуатації водних ресурсів, які відрізняються за пріоритетами, обмеженнями та очікуваними наслідками. Такий підхід дозволяє враховувати багатофакторність функціонування гідроенергетичних об'єктів, зокрема Дніпровського каскаду, де взаємодія енергетичних, гідрологічних та екологічних процесів має системний і взаємозалежний характер.

Умови експлуатації гідроелектростанцій характеризуються високою мінливістю зовнішніх факторів, серед яких ключову роль відіграють добові та сезонні коливання енергетичного навантаження, нерівномірність водності річки Дніпро, а також екологічні вимоги до підтримання стабільного стану водних екосистем. У зв'язку з цим сценарне моделювання дозволяє формувати гнучкі стратегії управління, які можуть адаптуватися до змін умов без втрати загальної ефективності функціонування системи.

Базовий сценарій оптимізації орієнтований на пріоритетне забезпечення енергетичних потреб об'єднаної енергетичної системи. У цьому випадку основним критерієм є максимізація виробництва електроенергії та покриття пікових навантажень. Такий підхід забезпечує високу стабільність енергопостачання, однак може супроводжуватися підвищенням антропогенним навантаженням на водні екосистеми, зокрема через інтенсивні коливання рівнів води та зміну природної динаміки стоку.

Екологічний сценарій, навпаки, передбачає пріоритет збереження природного стану водних екосистем. У цьому випадку обмежується інтенсивність маневрових режимів роботи гідроелектростанцій, стабілізуються витрати води та мінімізуються різкі зміни рівнів водосховищ. Основною метою такого сценарію є зменшення деградації прибережних зон, підтримання біорізноманіття та зниження стресового впливу на гідробіонтів. Проте реалізація цього сценарію може частково знижувати гнучкість енергетичної системи в пікові періоди навантаження.

Компромісний сценарій є найбільш збалансованим варіантом, оскільки поєднує енергетичну ефективність із екологічною безпекою. Він базується на оптимізації режимів скидів води таким чином, щоб забезпечити достатній рівень генерації електроенергії при одночасному обмеженні негативного впливу на екосистеми. У цьому сценарії особлива увага приділяється регулюванню швидкості зміни витрат води та вирівнюванню гідрологічних коливань у межах каскаду.

У сучасних умовах сценарний підхід набуває нової якості завдяки інтеграції методів штучного інтелекту. Інтелектуальні системи дозволяють не лише заздалегідь формувати сценарії, але й динамічно адаптувати їх у режимі реального часу залежно від фактичного стану енергетичної

та гідрологічної системи. Це означає перехід від статичного планування до безперервного адаптивного управління.

Особливо важливим є те, що інтелектуальні алгоритми здатні оцінювати ефективність кожного сценарію за багатокритеріальними показниками, включаючи енергетичну продуктивність, стабільність рівнів води, екологічний вплив та експлуатаційну надійність. Це дозволяє автоматично обирати найбільш доцільну стратегію управління в конкретний момент часу.

Таким чином, сценарний підхід до оптимізації режимів роботи гідроелектростанцій є важливим елементом сучасного управління Дніпровським каскадом. Його поєднання з інтелектуальними технологіями створює основу для формування адаптивної системи управління, здатної забезпечувати баланс між енергетичною ефективністю, технічною надійністю та екологічною безпекою.

4.3. Оцінка ефективності запропонованих рішень

Оцінка ефективності запропонованих підходів до оптимізації режимів роботи гідроелектростанцій здійснюється як комплексний багатокритеріальний процес, що враховує взаємодію енергетичних, гідрологічних та екологічних складових функціонування Дніпровського каскаду. Такий підхід обумовлений тим, що зміни в одному з компонентів системи неминуче впливають на інші, формуючи складну мережу причинно-наслідкових зв'язків.

У межах оцінювання ефективності особлива увага приділяється енергетичним показникам, зокрема стабільності електропостачання, рівню покриття пікових навантажень та ефективності використання встановленої потужності гідроелектростанцій. Важливим аспектом є також зниження витрат на резервування потужностей та підвищення гнучкості енергосистеми, що особливо актуально в умовах зростання частки нестабільної генерації.

Гідрологічний блок критеріїв включає оцінку рівномірності водного режиму, ступеня коливання рівнів водосховищ, швидкості зміни витрат стоку та загального навантаження на річкову систему. Зменшення амплітуди коливань рівнів води розглядається як один із ключових індикаторів ефективності, оскільки воно безпосередньо пов'язане зі стабільністю гідродинамічних процесів та зменшенням ерозійних явищ у прибережних зонах.

Екологічна складова оцінювання передбачає аналіз стану водних екосистем, включаючи біорізноманіття, якість води, рівень евтрофікації та умови існування гідробіонтів. Важливим показником є також ступінь відновлення природних характеристик річкового середовища в умовах регульованого стоку. У цьому контексті ефективність запропонованих рішень визначається здатністю зменшувати антропогенний тиск без суттєвої втрати енергетичної продуктивності.

Результати комплексного аналізу свідчать, що впровадження інтелектуальних систем управління та екологічно орієнтованих режимів роботи гідроелектростанцій забезпечує досягнення більш збалансованого стану енергогідрологічної системи. Зокрема, спостерігається зниження різких добових та сезонних коливань рівнів води, що позитивно впливає на стабільність прибережних екосистем та зменшує ризики деградації водних біотопів.

Крім того, підвищується загальна стійкість енергетичної системи за рахунок більш раціонального розподілу навантаження між гідроелектростанціями каскаду. Це дозволяє зменшити експлуатаційні ризики, підвищити ефективність використання водних ресурсів та забезпечити більш прогнозовану роботу енергетичної інфраструктури.

Таким чином, можна констатувати, що оптимізація режимів роботи гідроелектростанцій із урахуванням екологічних обмежень та використанням інтелектуальних технологій є ефективним інструментом досягнення сталого розвитку гідроенергетики в межах Дніпровського каскаду. Вона забезпечує одночасне підвищення енергетичної ефективності, стабілізацію гідрологічних процесів та зменшення негативного впливу на водні екосистеми.

4.4. Багатокритеріальна модель оптимізації режимів роботи ГЕС

Оптимізаційна задача модернізації режимів роботи ГЕС повинна враховувати одночасно енергетичні, водогосподарські та екологічні критерії. До енергетичних критеріїв належать виробіток електроенергії, покриття пікових навантажень, підтримання резерву та обмеження кількості пусків і зупинок агрегатів. До водогосподарських критеріїв належать підтримання допустимих рівнів водосховищ, забезпечення водопостачання та протипаводкової безпеки. До екологічних критеріїв належать мінімально допустимий пропуск, швидкість зміни рівня, умови нересту, водообмін і кисневий режим.

У межах каскадної системи доцільно застосовувати підхід Парето-оптимальності. Рішення вважається ефективним, якщо неможливо покращити один критерій без погіршення іншого. Наприклад, збільшення виробітку у вечірній пік може погіршити рівневий режим нижче греблі, а жорстке обмеження коливань може знизити маневрові можливості ГЕС. Завдання інтелектуальної системи полягає у тому, щоб показати межі такого компромісу і не допустити режимів, які формально вигідні енергосистемі, але екологічно неприйнятні.

У практичній реалізації можна поєднувати прогнозну модель і оптимізаційний модуль. Прогнозний блок формує очікувані значення притоку, попиту, температури й екологічних індикаторів, а оптимізаційний блок перевіряє допустимі графіки роботи агрегатів. У разі зміни прогнозу система перераховує рекомендації, але остаточне рішення має залишатися під контролем фахівця.

4.5. Сценарії оптимізації режимів роботи Дніпровського каскаду

Для практичного застосування запропоновано такі сценарії: базовий енергетичний, екологічно обмежений, адаптивний сезонний, сценарій маловоддя, паводковий, аварійний енергетичний, сценарій інтеграції відновлюваних джерел енергії та сценарій екосистемного відновлення. Кожен із них має власну систему пріоритетів, але всі сценарії повинні зберігати обов'язкові екологічні обмеження.

Базовий енергетичний сценарій передбачає підтримання надійності енергосистеми за умов нормальної водності. Екологічно обмежений сценарій застосовується у періоди підвищеної чутливості водних екосистем, насамперед під час нересту. Адаптивний сезонний сценарій змінює вагу критеріїв залежно від водності року, температури, фази розвитку біоти та прогнозу попиту. Сценарій маловоддя передбачає економію водного ресурсу і підтримання мінімально необхідного водообміну. Паводковий сценарій поєднує протипаводкову функцію з недопущенням надмірного руйнування прибережних біотопів.

Таблиця 4.1. Матриця сценаріїв оптимізації

Сценарій	Головний пріоритет	Ключове екологічне обмеження	Очікуваний результат
Базовий	Надійність енергосистеми	Мінімально допустимий пропуск	Стабільне покриття піків без критичних порушень
Екологічно обмежений	Збереження біотопів	Амплітуда та швидкість зміни рівня	Зменшення ризику осушення мілководь
Маловоддя	Економія водного ресурсу	Підтримання водообміну	Зменшення дефіциту води в наступних періодах
Паводкова готовність	Безпека територій	Контроль швидкості спрацювання	Зниження ризику підтоплення та берегової ерозії
Інтеграція ВДЕ	Балансування змінної генерації	Обмеження гідропіків	Підтримка системи без надмірного навантаження на екосистеми
Відновлення	Екосистемна стабілізація	Сезонні біологічні пороги	Поступове покращення умов існування гідробіонтів

4.6. Умови практичного впровадження інтелектуальної системи

Практична реалізація має відбуватися поетапно. На першому етапі доцільно створити єдине сховище даних і систему візуалізації. На другому - протестувати прогнознi моделі на історичних даних без впливу на фактичну диспетчеризацію. На третьому - запровадити рекомендаційний режим, коли модель пропонує альтернативи, але рішення ухвалює фахівець. Лише після накопичення статистики точності й надійності можна переходити до частково автоматизованого коригування окремих параметрів.

Серед ризиків впровадження слід виділити недостатню якість історичних даних, обмежену пояснюваність складних нейронних моделей, кібербезпекові ризики, організаційну інерцію та можливий конфлікт між короткостроковими потребами енергосистеми і довгостроковими екологічними цілями. Ці ризики не є підставою для відмови від цифрової модернізації, але потребують запобіжників: контролю якості даних, збереження людського контролю, регулярної валідації моделей та нормативного закріплення екологічних порогів.

4.7. Розширена практична модель сценарного управління

Формування багатокритеріальної цільової функції є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У четвертому розділі цей аспект використовується для побудови практичних сценаріїв оптимізації, де кожне рішення проходить перевірку за енергетичними, гідрологічними та екологічними критеріями.

Практичне значення цього положення полягає в тому, що воно формує основу для вибору допустимих режимів роботи ГЕС. Якщо у процесі планування враховується лише енергетичний результат, система може отримати короткострокову вигоду, але водночас збільшити екологічні ризики. Якщо ж до розрахунку включаються гідрологічні, біологічні та технічні обмеження, тоді управління стає більш збалансованим і передбачуваним.

Для Дніпровського каскаду особливо важливо враховувати просторову послідовність водосховищ. Зміна режиму на одній станції впливає на наступні ланки, тому рішення має оцінюватися не тільки в межах окремого гідровузла, а й у масштабі каскаду. Саме така логіка відповідає сучасним підходам до інтегрованого управління водними ресурсами і дає можливість поєднати енергетичну ефективність із мінімізацією негативного впливу на екосистеми.

Визначення екологічних порогів допустимості режиму є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У четвертому розділі цей аспект використовується для побудови практичних сценаріїв оптимізації, де кожне рішення проходить перевірку за енергетичними, гідрологічними та екологічними критеріями.

Застосування принципу Парето-оптимальності є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У четвертому розділі цей аспект використовується для побудови практичних сценаріїв оптимізації, де кожне рішення проходить перевірку за енергетичними, гідрологічними та екологічними критеріями.

Розроблення сценарію маловоддя є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У четвертому розділі цей аспект використовується для побудови практичних сценаріїв оптимізації, де кожне рішення проходить перевірку за енергетичними, гідрологічними та екологічними критеріями.

Розроблення паводкового сценарію є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У четвертому розділі цей аспект використовується для побудови практичних сценаріїв оптимізації, де кожне рішення проходить перевірку за енергетичними, гідрологічними та екологічними критеріями.

Розроблення сценарію інтеграції відновлюваних джерел енергії є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно

розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У четвертому розділі цей аспект використовується для побудови практичних сценаріїв оптимізації, де кожне рішення проходить перевірку за енергетичними, гідрологічними та екологічними критеріями.

Оцінка ефективності екологічно обмеженого режиму є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У четвертому розділі цей аспект використовується для побудови практичних сценаріїв оптимізації, де кожне рішення проходить перевірку за енергетичними, гідрологічними та екологічними критеріями.

Порівняння традиційного та адаптивного управління є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У четвертому розділі цей аспект використовується для побудови практичних сценаріїв оптимізації, де кожне рішення проходить перевірку за енергетичними, гідрологічними та екологічними критеріями.

Побудова системи показників післяопераційного контролю є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У четвертому розділі цей аспект використовується для побудови практичних сценаріїв оптимізації, де кожне рішення проходить перевірку за енергетичними, гідрологічними та екологічними критеріями.

Формування рекомендацій для поетапного впровадження є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У четвертому розділі цей аспект використовується для побудови практичних сценаріїв оптимізації, де кожне рішення проходить перевірку за енергетичними, гідрологічними та екологічними критеріями.

Визначення ролі людини в контурі прийняття рішень є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У четвертому розділі цей аспект використовується для побудови практичних сценаріїв оптимізації, де кожне рішення проходить перевірку за енергетичними, гідрологічними та екологічними критеріями.

Оцінка ризиків надмірної автоматизації є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку

з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У четвертому розділі цей аспект використовується для побудови практичних сценаріїв оптимізації, де кожне рішення проходить перевірку за енергетичними, гідрологічними та екологічними критеріями.

Нормативне закріплення екологічних обмежень є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У четвертому розділі цей аспект використовується для побудови практичних сценаріїв оптимізації, де кожне рішення проходить перевірку за енергетичними, гідрологічними та екологічними критеріями.

Організація міжвідомчого обміну даними є важливим елементом дослідження, оскільки дозволяє перейти від загального опису проблеми до конкретних управлінських висновків. У контексті теми магістерської роботи цей аспект потрібно розглядати не ізольовано, а у зв'язку з режимами роботи гідроелектростанцій, станом водосховищ, сезонною мінливістю стоку та потребами енергосистеми. У четвертому розділі цей аспект використовується для побудови практичних сценаріїв оптимізації, де кожне рішення проходить перевірку за енергетичними, гідрологічними та екологічними критеріями.

4.8. Поглиблення практичної оцінки ефективності запропонованих рішень

Визначення показника зменшення амплітуди гідропіків потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У четвертому розділі це перетворює загальну ідею оптимізації на систему вимірюваних критеріїв і практичних управлінських кроків. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

На оперативному горизонті важливими є швидкість зміни витрат, рівнів і потужності агрегатів. На сезонному горизонті основну роль відіграють водність року, періоди нересту, температурні умови, льодові явища та потреба у водопостачанні. На довгостроковому горизонті необхідно враховувати накопичувальні екологічні наслідки: евтрофікацію, замулення, зміну прибережних біотопів, втрату природної динаміки стоку та зниження стійкості водних екосистем.

Саме тому модернізована система управління має працювати як контур постійного уточнення. Фактичні дані моніторингу порівнюються з прогнозними, модель оцінює відхилення, а диспетчер отримує не одну команду, а набір допустимих альтернатив. Такий підхід підвищує якість рішень і дозволяє уникати ситуацій, коли короткострокова енергетична потреба автоматично переважає над екологічною безпекою.

Оцінка частоти порушення екологічних порогів потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У четвертому розділі це перетворює загальну ідею оптимізації на систему вимірюваних критеріїв і практичних управлінських кроків. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Порівняння виробітку електроенергії у традиційному та адаптивному режимах потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У четвертому розділі це перетворює загальну ідею оптимізації на систему вимірюваних критеріїв і практичних управлінських кроків. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Оцінка впливу сценаріїв на кисневий режим і водообмін потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У четвертому розділі це перетворює загальну ідею оптимізації на систему вимірюваних критеріїв і практичних управлінських кроків. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Формування інтегрального індексу екологічної прийнятності потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У четвертому розділі це перетворює загальну ідею оптимізації на систему вимірюваних критеріїв і практичних управлінських кроків. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Розрахунок умовної втрати енергетичної гнучкості заради екологічної стабільності потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У четвертому розділі це перетворює загальну ідею оптимізації на систему вимірюваних критеріїв і практичних управлінських кроків. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Визначення пріоритетів у період нересту потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У четвертому розділі це перетворює загальну ідею оптимізації на систему вимірюваних критеріїв і практичних управлінських кроків. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Оцінка ефекту від поетапного впровадження цифрової системи потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У четвертому розділі це перетворює загальну ідею оптимізації на систему вимірюваних критеріїв і практичних управлінських кроків. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Побудова матриці ризиків для кожного сценарію потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У четвертому розділі це перетворює загальну ідею оптимізації на систему вимірюваних критеріїв і практичних управлінських кроків. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Формування рекомендацій для оновлення правил експлуатації потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У четвертому розділі це перетворює загальну ідею оптимізації на систему вимірюваних критеріїв і практичних управлінських кроків. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Визначення потреби у міжвідомчому обміні даними потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У четвертому розділі це перетворює загальну ідею оптимізації на систему вимірюваних критеріїв і практичних управлінських кроків. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

Оцінка довгострокового екосистемного ефекту модернізації потребує окремого аналізу, оскільки в умовах Дніпровського каскаду навіть локальна зміна режиму може мати відкладені наслідки для нижніх водосховищ. У четвертому розділі це перетворює загальну ідею оптимізації на систему вимірюваних критеріїв і практичних управлінських кроків. Це означає, що управлінське рішення повинно оцінюватися за кількома часовими горизонтами: оперативним, сезонним і довгостроковим.

4.9. Узагальнена схема впровадження модернізованого режиму експлуатації

Узагальнена схема впровадження модернізованого режиму експлуатації ГЕС має включати кілька взаємопов'язаних етапів. Перший етап полягає у створенні повної інформаційної основи: зведенні гідрологічних, метеорологічних, енергетичних, екологічних і технічних даних в єдину систему. На цьому рівні важливо не лише зібрати дані, а й визначити їхню якість, частоту оновлення, відповідального постачальника та можливі обмеження використання. Без такого етапу штучний інтелект може відтворювати помилки історичних даних або формувати рекомендації на неповній інформаційній базі.

Другий етап передбачає ретроспективне моделювання. На основі минулих режимів роботи ГЕС можна перевірити, як альтернативні алгоритми поводитися б у фактичних умовах різної водності, різного навантаження енергосистеми та різної екологічної чутливості. Це дає можливість оцінити, чи здатна модель зменшувати амплітуду небажаних коливань, не створюючи при цьому неприйнятних втрат для генерації. Ретроспективне тестування є важливим запобіжником, оскільки дозволяє виявити слабкі місця моделі до її використання у реальному диспетчерському процесі.

Третій етап полягає у впровадженні рекомендаційного режиму. На цьому етапі інтелектуальна система не керує ГЕС самостійно, а пропонує диспетчеру кілька варіантів графіка із зазначенням очікуваного енергетичного результату, рівневих змін, екологічних ризиків і ступеня невизначеності прогнозу. Такий формат є найбільш прийнятним для критичної інфраструктури, оскільки зберігає відповідальність людини та водночас підвищує якість аналітичної підтримки.

Четвертий етап пов'язаний із регулярною оцінкою результатів. Після реалізації режиму фактичні показники мають порівнюватися з прогнозними. Якщо система прогнозувала допустиму зміну рівня, а фактична зміна виявилася більшою, це повинно фіксуватися в

журналі рішень і використовуватися для уточнення моделі. Таким чином формується замкнений цикл навчання, у якому кожне управлінське рішення стає джерелом нової інформації.

П'ятий етап передбачає нормативне і організаційне закріплення модернізованого підходу. Для цього необхідно визначити перелік екологічних показників, які мають статус обов'язкових обмежень, встановити правила реагування на перевищення порогів, описати процедури обміну даними між енергетичними, водогосподарськими та природоохоронними структурами. Без такого закріплення цифрова система залишатиметься допоміжним інструментом, а не повноцінним елементом управління.

Таблиця 4.2. Етапи впровадження інтелектуальної системи управління режимами ГЕС

Етап	Зміст робіт	Очікуваний результат
Формування даних	Об'єднання гідрологічних, енергетичних і екологічних показників	Створення надійної інформаційної бази
Ретроспективне тестування	Перевірка моделей на історичних режимах	Оцінка точності та стійкості алгоритмів
Рекомендаційний режим	Підготовка альтернативних графіків для диспетчера	Збереження людського контролю
Післяопераційна перевірка	Порівняння прогнозу з фактичними наслідками	Постійне уточнення моделі
Нормативне закріплення	Визначення порогів, процедур і відповідальності	Перехід від експерименту до сталої практики

Отже, практична цінність запропонованого підходу полягає в тому, що він не обмежується загальною ідеєю застосування штучного інтелекту. Він передбачає конкретну управлінську послідовність: дані, прогноз, сценарій, перевірка обмежень, рекомендація, контроль результату та оновлення моделі. Саме така послідовність дозволяє зробити модернізацію режимів роботи ГЕС реально застосовною для Дніпровського каскаду.

4.10. Критерії прийнятності модернізованих режимів роботи

Для того щоб запропонована модернізація мала практичне значення, необхідно визначити критерії прийнятності режимів роботи ГЕС. Першим таким критерієм є енергетична достатність, тобто здатність режиму забезпечити необхідну потужність у період системної потреби. Проте цей критерій не може бути єдиним, оскільки надмірна орієнтація на короткострокову генерацію може призвести до погіршення водного режиму та зростання екологічного навантаження.

Другим критерієм є гідрологічна допустимість. Він означає, що запропонований режим не повинен порушувати водний баланс, створювати надмірну швидкість спрацювання водосховища або призводити до небезпечних коливань нижче греблі. Для каскадної системи цей критерій має оцінюватися не лише для окремої ГЕС, а й для всього ланцюга водосховищ. Рішення, яке виглядає прийнятним на одній ділянці, може бути небажаним для нижньої ланки через накопичення ефекту.

Третім критерієм є екологічна прийнятність. Вона передбачає дотримання мінімальних витрат, обмеження швидкості зміни рівня, збереження умов нересту, підтримання водообміну та недопущення погіршення кисневого режиму. У періоди підвищеної біологічної чутливості цей критерій має отримувати вищу вагу, ніж у періоди відносної екологічної стабільності. Такий підхід дозволяє уникнути однакових правил для різних сезонів, що є важливим для реальних умов функціонування водосховищ.

Четвертим критерієм є технічна реалістичність. Режим, сформований алгоритмом, має відповідати фактичним можливостям обладнання: допустимим навантаженням агрегатів, обмеженням пусків і зупинок, ремонтному стану, коефіцієнтам корисної дії та вимогам безпеки гідротехнічних споруд. Якщо модель пропонує режим, який теоретично покращує екологічні показники, але не може бути виконаний технічно, така рекомендація не має практичної цінності.

П'ятим критерієм є пояснюваність рішення. Диспетчер, еколог або водогосподарський фахівець має розуміти, чому система пропонує саме такий графік роботи. Для цього рекомендація повинна супроводжуватися коротким поясненням: які обмеження були активними, який прогноз притоку використано, які сценарії порівнювалися, які ризики зменшено і які компроміси залишаються. Пояснюваність є важливою умовою довіри до штучного інтелекту у сфері критичної інфраструктури.

Шостим критерієм є стійкість до помилки прогнозу. У водогосподарських системах неможливо повністю усунути невизначеність, тому режим має бути придатним не лише за основним прогнозом, а й за близькими альтернативними варіантами розвитку ситуації. Наприклад, якщо фактичний притік виявиться нижчим від очікуваного, система не повинна одразу переходити у критичний стан. Для цього доцільно використовувати резервні сценарії та допустимі коридори управління.

Сьомим критерієм є можливість післяопераційної перевірки. Кожен реалізований режим має залишати інформаційний слід: вхідні дані, прогноз, обраний сценарій, активні обмеження, фактичний результат і відхилення від очікуваного стану. Це створює основу для навчання системи, аудиту рішень і поступового підвищення точності моделей. Без такого механізму цифрова модернізація не матиме накопичувального ефекту.

Таблиця 4.3. Критерії прийнятності режимів роботи ГЕС

Критерій	Зміст	Практичне значення
Енергетична достатність	Забезпечення потрібної потужності	Підтримання надійності енергосистеми
Гідрологічна допустимість	Дотримання водного балансу і меж рівнів	Запобігання небезпечним коливанням
Екологічна прийнятність	Дотримання природоохоронних порогів	Зменшення впливу на біоту та якість води
Технічна реалістичність	Відповідність можливостям обладнання	Виконуваність запропонованого графіка
Пояснюваність	Зрозуміле обґрунтування рекомендації	Довіра фахівців до цифрової системи
Стійкість до похибки	Придатність за кількох варіантів прогнозу	Зниження ризику помилкових рішень
Післяопераційна перевірка	Порівняння прогнозу і факту	Постійне вдосконалення моделі

У сукупності ці критерії формують основу для оцінки модернізованого режиму. Якщо хоча б один із них систематично порушується, запропоновану схему не можна вважати достатньо обґрунтованою. Найбільш цінними є ті режими, які не максимізують один показник, а забезпечують прийнятний баланс між енергетичною функцією ГЕС, водогосподарськими вимогами та екологічною стійкістю водосховищ.

Додатково варто зазначити, що запропоновані критерії не повинні залишатися незмінними протягом усього періоду експлуатації. У разі зміни кліматичних умов, структури генерації, технічного стану агрегатів або екологічного стану водосховищ вони мають переглядатися. Саме адаптивність є головною перевагою модернізованого підходу, оскільки вона дозволяє враховувати нові дані, уточнювати пороги допустимості та поступово підвищувати якість управління каскадом. Для практики це означає, що система має бути не одноразовою моделлю, а постійно діючим інструментом підтримки рішень, який поєднує моніторинг, прогнозування, сценарний аналіз і професійну експертну оцінку.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

Проведений комплексний аналіз засвідчив, що оптимізація режимів роботи гідроелектростанцій Дніпровського каскаду з урахуванням екологічних обмежень є необхідною складовою сучасного підходу до управління водно-енергетичними системами. Умови багаторічного антропогенного регулювання річки Дніпро зумовлюють потребу переходу від суто енергетично орієнтованих моделей експлуатації до збалансованих еколого-енергетичних рішень, які враховують довгострокові наслідки впливу на водні екосистеми.

Встановлено, що впровадження екологічно орієнтованих режимів роботи гідроелектростанцій дозволяє суттєво знизити негативний вплив гідрологічних коливань на природні екосистеми. Зокрема, стабілізація рівнів води та обмеження різких змін витрат стоку сприяють зменшенню ерозійних процесів, покращенню стану прибережних біотопів та створенню більш сприятливих умов для функціонування водних біоценозів. Це свідчить про важливість врахування екологічної складової як невід'ємного елементу експлуатаційної політики гідроенергетичних об'єктів.

Виявлено, що застосування сценарного підходу до управління режимами роботи ГЕС забезпечує підвищення гнучкості та адаптивності системи управління водними ресурсами. Різні сценарії експлуатації дозволяють враховувати варіативність гідрологічних умов, коливання енергетичного попиту та екологічні обмеження, що формує основу для прийняття більш обґрунтованих і збалансованих управлінських рішень. Особливе значення має можливість динамічного переходу між сценаріями залежно від поточної ситуації, що підвищує ефективність реагування енергосистеми на зовнішні зміни.

Отримані результати також підтверджують, що інтеграція інтелектуальних систем управління з екологічними критеріями оптимізації є ключовим інструментом підвищення ефективності функціонування гідроелектростанцій. Такий підхід дозволяє одночасно забезпечити стабільність енергопостачання, раціональне використання водних ресурсів та мінімізацію антропогенного навантаження на природні екосистеми.

Практичне значення запропонованих підходів полягає в тому, що вони можуть бути використані для формування адаптивних графіків роботи гідроелектростанцій. Такі графіки мають враховувати не лише поточну потребу енергосистеми у маневровій потужності, а й стан водосховищ, прогноз притоку, сезонну чутливість гідробіотів, ризики евтрофікації та допустимі межі коливання рівнів води. Це дозволяє підвищити якість диспетчерських рішень і зменшити ймовірність екологічно небажаних наслідків.

Таким чином, реалізація запропонованих підходів формує науково обґрунтовану основу для переходу до інтегрованого управління Дніпровським каскадом, у якому енергетичні та екологічні цілі розглядаються як взаємопов'язані та рівнозначні компоненти єдиної системи сталого розвитку. Подальше вдосконалення таких підходів має бути спрямоване на розширення моніторингової бази, уточнення екологічних порогів, апробацію моделей оптимізації на фактичних даних і поступове впровадження інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у практику експлуатації гідроелектростанцій.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі комплексно досліджено проблему модернізації режимів роботи гідроелектростанцій Дніпровського каскаду із застосуванням технологій штучного інтелекту в контексті мінімізації негативного впливу на екосистеми водосховищ та підвищення ефективності функціонування енергетичної системи України. У межах дослідження розглянуто гідрологічні, екологічні, енергетичні та технологічні аспекти функціонування каскадної гідроенергетичної системи, що дало змогу обґрунтувати необхідність переходу від традиційних підходів управління до інтегрованих адаптивних моделей.

У ході виконання роботи встановлено, що Дніпровський каскад гідроелектростанцій є ключовим елементом об'єднаної енергетичної системи України, який виконує не лише функцію генерації електроенергії, а й забезпечує регулювання енергетичного балансу, покриття пікових навантажень, підтримання стабільності частоти в мережі та підвищення надійності енергопостачання. Водночас багаторічна експлуатація каскаду призвела до суттєвої трансформації природного гідрологічного режиму річки Дніпро, що проявляється у зміні сезонної динаміки стоку, зменшенні швидкості течії, деградації прибережних екосистем, порушенні міграційних процесів гідробіонтів та активізації процесів евтрофікації у водосховищах.

Проведений аналіз показав, що традиційні підходи до управління режимами роботи гідроелектростанцій базуються переважно на енергетичних критеріях і недостатньо враховують екологічні наслідки експлуатації водних ресурсів. Такий підхід не забезпечує повною мірою збалансованого використання потенціалу водосховищ, оскільки короткострокова енергетична вигода може супроводжуватися довгостроковим погіршенням стану водних екосистем. Це зумовлює необхідність переходу до інтегрованих моделей управління, які одночасно враховують енергетичні, гідрологічні, екологічні та технічні параметри функціонування системи.

У роботі обґрунтовано, що застосування технологій штучного інтелекту є ефективним інструментом підвищення якості управління складними гідроенергетичними системами. Використання методів машинного навчання, нейронних мереж, інтелектуального аналізу даних і прогнозних моделей дозволяє підвищити точність оцінювання водності річки, рівнів водосховищ, обсягів притоку, температурного режиму та потенційних екологічних ризиків. Це створює передумови для більш обґрунтованого планування режимів роботи гідроелектростанцій у коротко-, середньо- та довгостроковій перспективі.

Встановлено, що інтелектуальні системи управління дозволяють здійснювати багатокритеріальну оптимізацію режимів роботи ГЕС, забезпечуючи баланс між енергетичною ефективністю та екологічною безпекою. Особливе значення має можливість інтеграції екологічних обмежень безпосередньо у процес прийняття рішень. Це дає змогу зменшити амплітуду коливань рівнів води, стабілізувати гідрологічний режим, підтримувати мінімально допустимі витрати, зберігати умови нересту та мінімізувати негативний вплив на прибережні екосистеми.

Доведено, що сценарний підхід до управління режимами роботи гідроелектростанцій забезпечує гнучкість і адаптивність системи в умовах змінного енергетичного попиту та нестабільних гідрологічних умов. Поєднання базового, екологічно обмеженого, адаптивного сезонного, маловодного, паводкового та аварійного сценаріїв дозволяє формувати оптимальні стратегії експлуатації водних ресурсів залежно від поточної ситуації. Такий підхід є особливо важливим для Дніпровського каскаду, де рішення на одній ланці можуть впливати на гідрологічний та екологічний стан нижчих водосховищ.

Окремо підкреслено, що впровадження концепції цифрових двійників, прогнозних моделей і алгоритмів підкріплювального навчання відкриває нові можливості для моделювання та оптимізації роботи каскадних гідроенергетичних систем. Ці технології дають змогу створювати віртуальні моделі роботи ГЕС, перевіряти різні сценарії без ризику для реальної системи, оцінювати наслідки диспетчерських рішень і поступово вдосконалювати алгоритми управління на основі фактичних даних.

Важливим результатом дослідження є обґрунтування необхідності збереження ролі людини у контурі прийняття рішень. Штучний інтелект доцільно розглядати не як повну заміну диспетчера або фахівця-еколога, а як інструмент аналітичної підтримки. Остаточне рішення щодо режимів роботи ГЕС має ухвалюватися з урахуванням прогнозних даних, технічних обмежень, екологічних ризиків, нормативних вимог і професійної експертної оцінки.

Узагальнюючи результати дослідження, можна зробити висновок, що інтеграція штучного інтелекту в систему управління Дніпровським каскадом є науково обґрунтованим і практично доцільним напрямом розвитку гідроенергетики. Такий підхід дозволяє одночасно підвищити ефективність використання водно-енергетичних ресурсів, забезпечити стабільність функціонування енергетичної системи та зменшити негативний вплив на природні водні екосистеми.

Отримані результати підтверджують перспективність переходу до інтегрованого еколого-енергетичного управління гідроенергетичними об'єктами, що відповідає сучасним принципам сталого розвитку, енергетичної безпеки та екологічної збалансованості. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення конкретних математичних моделей оптимізації режимів роботи ГЕС, апробацію інтелектуальних алгоритмів на фактичних даних Дніпровського каскаду та формування нормативних механізмів урахування екологічних обмежень у диспетчерському управлінні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гребінь В. В. Гідрологія України / В. В. Гребінь. - Київ : ВПЦ «Київський університет», 2018. - 412 с.
2. Вишневський В. І. Річки і водойми України. Стан і використання / В. І. Вишневський. - Київ : Віпол, 2000. - 376 с.
3. Хільчевський В. К., Кравчук М. Я. Водні ресурси України та їх використання / В. К. Хільчевський, М. Я. Кравчук. – Київ : ВПЦ «Київський університет», 2012. – 304 с.
4. Забокрицька М. Р., Хільчевський В. К., Манченко А. П. Гідроекологічний стан басейнів річок України / М. Р. Забокрицька, В. К. Хільчевський, А. П. Манченко. – Київ : Ніка-Центр, 2005. - 184 с.
5. Методики гідрографічного районування території України / В. В. Гребінь, В. Б. Мокін, В. А. Сташук [та ін.]. - Київ : Інтерпрес ЛТД, 2013. – 55 с.
6. Наукові засади раціонального використання водних ресурсів України / за ред. В. А. Сташука. - Херсон : Грін Д.С., 2014. - 320 с.
7. Горбачова Л. О. Особливості формування стоку річок України // Український географічний журнал. - 2015. - № 3. - С. 16–23.
8. Чорноморець Ю. О., Павленко П. О., Лук'янець О. І. Аналіз гідрологічного режиму річки Дніпро // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. - 2017. - № 4. - С. 36-47.
9. Кравчук М. Я. Антропогенна трансформація водних екосистем Дніпра // Вісник Київського університету. - 2016. - № 2. - С. 45–52.
10. International Energy Agency. Hydropower Special Market Report. - Paris, 2023. - 156 p.
11. UNESCO. World Water Development Report 2021: Valuing Water. - Paris, 2021. - 234 p.
12. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. - MIT Press, 2016. - 800 p.
13. Sutton R., Barto A. Reinforcement Learning: An Introduction. - MIT Press, 2018. - 552 p.
14. Zhang Q., Liu J., Wang H. Artificial intelligence in hydropower systems // Renewable Energy. - 2022. - Vol. 180. - P. 1-12.
15. Водний кодекс України : Закон України від 06.06.1995 № 213/95-ВР.
16. Закон України «Про ринок електричної енергії» : Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII.
17. ПрАТ «Укргідроенерго» : офіційний сайт. – Режим доступу: <https://uhe.gov.ua>
18. Державне агентство водних ресурсів України : офіційний сайт. – Режим доступу: <https://davr.gov.ua>
19. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України : офіційний сайт. – Режим доступу: <https://mepr.gov.ua>
20. International Energy Agency. Hydropower Special Market Report: Analysis and forecast to 2030. Paris : IEA, 2021. Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report>

21. International Hydropower Association. 2024 World Hydropower Outlook. London : IHA, 2024. Режим доступа: <https://www.hydropower.org/publications/2024-world-hydropower-outlook>
22. World Commission on Dams. Dams and Development: A New Framework for Decision-Making. London : Earthscan, 2000. 404 p.
23. European Parliament and Council. Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy. 2000. Режим доступа: https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-framework-directive_en
24. European Parliament and Council. Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks. 2007.
25. Bernardes J., Santos M., Abreu T., Prado L., Miranda D., Julio R., Viana P., Fonseca M., Bortoni E., Bastos G. S. Hydropower Operation Optimization Using Machine Learning: A Systematic Review // AI. 2022. Vol. 3(1). P. 78–99. DOI: 10.3390/ai3010006.
26. Moreira M., Hayes D. S., Boavida I., Schletterer M., Schmutz S., Pinheiro A. Ecologically-based criteria for hydropeaking mitigation: A review // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 657. P. 1508–1522. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.107.
27. Labadie J. W. Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review // Journal of Water Resources Planning and Management. 2004. Vol. 130(2). P. 93–111.
28. Loucks D. P., van Beek E. Water Resource Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications. Cham : Springer, 2017. 624 p.
29. Wurbs R. A. Modeling and Analysis of Reservoir System Operations. Upper Saddle River : Prentice Hall, 1996. 356 p.
30. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory // Neural Computation. 1997. Vol. 9(8). P. 1735–1780.
31. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45. P. 5–32.
32. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. New York : Springer, 2006. 738 p.
33. Murphy K. P. Machine Learning: A Probabilistic Perspective. Cambridge : MIT Press, 2012. 1104 p.
34. Luo Y. Optimal operation model of ecological flow of hydropower station based on genetic algorithm and neural network // Heliyon. 2024. Vol. 10(20). DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e39441.
35. Hashemi S. M., Robati A., Kazerooni M. A. Applying the new multi-objective algorithms for the operation of a multi-reservoir system in hydropower plants // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Article 3607.
36. Mansouri S. et al. Optimal operation of the dam reservoir in real time based on generalized structure of group method of data handling and optimization technique // Applied Water Science. 2024. Vol. 14. Article 105.
37. Bozeman B. B., Matson P. G., Pracheil B. The environmental impact of hydropower: a systematic review of the ecological effects of sub-daily flow variability on riverine fish // Reviews in Fish Biology and Fisheries. 2024.

38. IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge : Cambridge University Press, 2022.
39. UNESCO. United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water. Paris : UNESCO, 2023.
40. International Renewable Energy Agency. Renewable Power Generation Costs in 2022. Abu Dhabi : IRENA, 2023.
41. НЕК «Укренерго» : офіційний сайт. Режим доступу: <https://ua.energy/>
42. Державна служба України з надзвичайних ситуацій : офіційний сайт. Режим доступу: <https://dsns.gov.ua>
43. Державна служба геології та надр України : офіційний сайт. Режим доступу: <https://www.geo.gov.ua>
44. Український гідрометеорологічний центр : офіційний сайт. Режим доступу: <https://www.meteo.gov.ua>
45. Державна екологічна інспекція України : офіційний сайт. Режим доступу: <https://www.dei.gov.ua>
46. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні. Київ : Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України.
47. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні. Київ : Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України.
48. Правила експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду. Київ : Державне агентство водних ресурсів України.
49. План управління річковим басейном Дніпра. Київ : Державне агентство водних ресурсів України.