

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Денисова Віктора Абрамовича

«Моделі та засоби оптимізації структури об'єднаної енергосистеми із використанням відновлюваних джерел генерації», що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.01 – енергетичні системи та комплекси»

Актуальність теми дисертації.

Можливість сталого економічного розвитку національної економіки значною мірою визначається надійністю та ефективністю функціонування енергетичної галузі. Основним сучасним трендом розвитку економічної галузі є підвищення вимог до екологічності технологічних процесів, включно з процесами видобування, перетворення, транспортування та споживання енергетичних ресурсів. Однак на сьогодні відсутні універсальні способи економічно прийняттого узгодженого вирішення проблеми задоволення енергетичних потреб людства із забезпеченням відсутності негативного впливу на оточуюче довкілля.

Актуальність дисертаційної роботи Денисова Віктора Абрамовича обумовлена врахуванням у дисертаційній роботі сучасних тенденцій та викликів у сфері енергетики та сталого розвитку.

Ключовими моментами актуальності дисертаційної роботи є:

1. Оптимізація структури інтегрованих енергетичних систем, забезпечення пріоритетного розвитку відновлюваних джерел енергії та врахування особливостей національного паливно-енергетичного комплексу.

2. Зосередження на технологічному прогресі в енергетичній галузі. Розробка моделей та інструментів, що враховують мінливість і переривчастість відновлюваних джерел, що є важливим фактором для забезпечення надійності та стійкості енергосистем.

3. Врахування впливу на навколишнє середовище. Оптимізація енергетичних систем з використанням відновлюваних джерел сприяє зменшенню викидів парникових газів і мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище.

4. Інтеграція накопичувачів енергії в енергетичну систему. Ефективне використання технологій накопичення енергії є ключовим аспектом оптимізації енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел енергії. Моделі, що враховують проблеми оптимальної інтеграції накопичувачів енергії і стратегії реагування на попит, мають вирішальне значення для підтримки стабільності енергетичної системи.

5. Дослідження фактору економічної конкурентоспроможності. Зменшення витрат на технології відновлюваної енергії в поєднанні з потенціалом економії за рахунок оптимізації робить інтеграцію відновлюваної енергії економічно привабливою. Моделі, що враховують економічні аспекти інтеграції відновлюваної енергетики, є важливими для прийняття стратегічних рішень в енергетичному секторі.

Таким чином, важливою задачею, на якій зосереджена дисертаційна

робота, є розроблення нових і вдосконалення існуючих математичних моделей та програмних засобів для оптимізації складу та режимів функціонування енергосистем в умовах перманентного зростання потужностей відновлюваних джерел енергії у світі та в Україні.

Врахування в цих моделях економічних та технологічних показників розвитку народного господарства та виробництва, що представлені у вигляді квазідинамічних функцій із дискретними стохастичними змінними, дозволяє досліджувати оптимальні обсяги технологічного оновлення інтегрованих енергосистем.

У зв'язку з цим задача розробки нових та удосконалення існуючих економіко-математичних моделей і методів для дослідження напрямів та оптимальних параметрів технологічного розвитку елементів енергосистем є актуальним науково-практичним завданням, яке потребує вирішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами.

Тематика та розділи цієї роботи входили до складу наукових робіт, що були виконані в Інституті загальної енергетики Національної академії наук України: «Створення методичних підходів та математичних моделей, дослідження пріоритетних напрямів використання енергоефективних технологій в галузях енергокомплексу України» (2011 р., № ДР 0107U002336); «Наукові основи аналізу і прогнозування процесів адаптації та фільтрації ефективних технологій перетворення енергії в умовах конкуренції та утворення міждержавних енергооб'єднань» (2016 р., № ДР 0111U010579); «Створення та розвиток математичних засобів прогнозування і оптимізації енергетичних об'єднань на основі ефективних технологій перетворення та використання енергії» (2017 р., № ДР 0117U000051); «Визначення перспективних технологій відновлюваних джерел енергії та економічно доцільних обсягів їх впровадження в енергосистемах України» (2022 р., № ДР 0120U100138), в яких автор брав участь як виконавець.

Новизна представлених теоретичних та / або експериментальних результатів проведених здобувачем досліджень.

Результати, отримані в процесі дисертаційного дослідження, несуть таку наукову новизну:

1. Розроблено новий метод економіко-технологічного прогнозування параметрів оптимального функціонування та розвитку енергетичної системи, який, за рахунок використання модифікованого інтегрального критерію, дозволяє врахувати показники розвитку національної економіки та виробництва у вигляді квазідинамічних функцій із дискретними стохастичними змінними, що є важливим для оцінки здатності енергетичної системи забезпечити обсяги та режими споживання енергії та потужності.

2. Розроблено нову математичну модель дифузії нових технологій в енергетиці, що є узагальненням моделі змішаного впливу дифузії нових технологій Френка Басса і, на відміну від існуючих, включає функціонал економіко-технологічного впливу. Розроблена модель дозволила врахувати стохастичність економічних та технологічних параметрів розвитку національної економіки при прогнозуванні розвитку структури інтегрованої системи енергетики в умовах швидкого зростання потужностей ВДЕ.

3. Вперше запропоновано використання набору регресійних моделей у вигляді узагальнених логістичних кривих, що дозволило підвищити ефективність прогнозування з урахуванням того, що отримані за методом найменших квадратів значення параметрів моделювання не суперечать експериментальним даним.

4. Розроблено нову модель довгострокового технологічного оновлення структури об'єднаної енергетичної системи, що дозволило оцінити потенціал вдосконалення компонентів енергосистеми.

5. Узагальнення класичної моделі управління динамічною системою дозволило розробити економіко-математичну модель енергетичної системи як складної ієрархічної квазідинамічної системи з рівнями адміністративно-територіальної ієрархії та галузевою (підгалузевою) інфраструктурою. Розроблена модель, на відміну від відомих, містить функціонал економіко-технологічного впливу, до якого належать елементи матриць стану, керуючих дій, випадкові елементи матриці зовнішнього впливу, а також враховує особливості роботи генеруючих, резервних та акумулюючих потужностей енергосистем України та сусідніх країн-учасниць ENTSO-E.

Наукова обґрунтованість представлених результатів здобувача.

Наукові положення та висновки, що містяться в дисертаційній роботі, є теоретично обґрунтованими і підтверджуються результатами моделювання під час виконання науково-дослідних робіт, апробацією на наукових міжнародних конференціях і наукових семінарах.

Представлена дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням. Зміст дисертації, структура, послідовність та повнота розв'язаних задач цілком відповідають темі роботи. Достовірність підтверджується також практичними результатами впровадження дисертаційного дослідження.

Результати виконаних досліджень впроваджено:

– у наукових роботах «Послуги з прогнозування обсягів та кривих попиту на електричну енергію в ОЕС України в умовах військової агресії (на період з 01 жовтня 2022 року по 31 грудня 2023 року)», виконаних за Договором між НЕК «Укренерго» та Інститутом загальної енергетики НАН України від «28» вересня 2022р. № 1916;

– у проблемно-орієнтованій програмно-інформаційний комплекс, який містить програмні модулі числової реалізації розроблених та досліджених автором математичних моделей. Комплекс використано у нормативній освітній компоненті «Математичне моделювання та прийняття рішень в системах енергопостачання» освітньо-професійної програми підготовки магістрів «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Впровадження результатів виконаного дослідження засвідчено двома актами впровадження.

Представлена робота відповідає принципам академічної доброчесності, а саме: відтворення в тексті наукової роботи результатів дослідження інших науковців наведено з посиланнями, що не порушує Закон України «Про авторське право і суміжні права»; адекватність та точність наведеної інформації (без спотворення) з цитуванням із іноземних джерел.

Наукове значення та практична цінність.

Полягає в тому, що на основі запропонованих в дисертаційній роботі методу економіко-технологічного прогнозування параметрів оптимального функціонування та розвитку енергетичної системи та економіко-математичних моделей автором розроблено проблемно-орієнтований програмно-інформаційний комплекс, що містить програмні модулі моделей оптимізації режимів функціонування енергетичних систем і використовується у відділі прогнозування розвитку електроенергетичного комплексу Інституту загальної енергетики НАН України та згідно договору з НЕК «Укренерго» для дослідження запропонованого автором методу економіко-технологічного впливу та нових і удосконалених економіко-математичних моделей. Практичні результати роботи отримані шляхом математичного моделювання з використанням розробленого автором програмно-інформаційного комплексу, а саме:

- визначені умови синхронізації роботи об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України з суміжними країнами, що входять до ENTSO-E (Угорщина, Словаччина, Польща, Румунія), з урахуванням граничних значень обсягів транскордонного обміну електроенергією, географічного розташування, наявності та потужності міждержавних ліній електропередачі, величин потужності максимально допустимих обсягів імпорту та експорту;

- показано, що до 2040 року основним трендом змін в ОЕС України повинно бути:

- а) нарощування та максимальне використання потужності атомних електростанцій (АЕС);

- б) зростання пропускної спроможності міждержавних ліній електропередач (ЛЕП), яке є вигідним як для України, так і для суміжних країн, що входять до ENTSO-E, оскільки це дозволить забезпечити умови балансової надійності кожної країни в умовах нарощування потужності АЕС та ВДЕ;

- показано, що незважаючи на технічний прогрес у відновлюваній енергетиці, зокрема, зниження собівартості виробництва електроенергії вітровими та фотоелектричними станціями, через мінливість електричної генерації вони зможуть бути включені до складу енергооб'єднань тільки при наявності досить потужних, енергетично і економічно ефективних промислових акумуляторів енергії;

- запропоновано вирішення задачі прогнозування вибору оптимальних режимів використання генеруючої та накопичувальної потужностей енергетичної системи за критерієм мінімізації середньозваженої вартості виробництва електроенергії за традиційними, ВДЕ та технологіями накопичення електроенергії.

Використання розроблених в роботі математичних моделей та програмних засобів дозволяє проаналізувати і спрогнозувати сучасні тенденції оновлення існуючих та впровадження перспективних технологій генерації енергії і визначити основні напрями і референтні сценарії в цій області.

Оцінка публікацій здобувача.

Викладені в дисертаційній роботі результати дослідження отримали достатній рівень апробації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 20 друкованих наукових працях (13 одноосібних), з них: 12 у

наукових фахових виданнях (з них 1 – у закордонних періодичних виданнях та 1 у розділі монографії, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus (1 одноосібне)); 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на науковий твір (одноосібне); доповіді у матеріалах конференцій (4 одноосібних).

Структура та зміст дисертації.

Структура дисертації побудована відповідно до мети та задач дослідження. Викладення основного матеріалу дисертації, наукових положень, результатів та висновків логічне та аргументоване. Дисертація написана в науковому стилі та оформлена відповідно до чинних умов.

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 196 сторінок, у тому числі 162 сторінки основного тексту, 40 рисунків, 53 таблиці, список використаних джерел зі 122 найменувань та 4 додатки.

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, вказано на зв'язок з науковими програмами і темами, визначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, відзначено особистий внесок здобувача у наукових публікаціях, наведено відомості про апробацію, впровадження та публікації.

У **першому** розділі розглянуті: сучасні тенденції моделювання процесів розповсюдження технологій перетворення та використання енергії; визначення перспективної структури генерації та споживання електричної енергії ОЕС України; визначення перспективних технологій відновлюваних джерел енергії. Розглянуто метод економіко-технологічного прогнозування параметрів оптимального функціонування та розвитку енергетичної системи, нові і удосконалено існуючі моделі економіко-математичного програмування для дослідження напрямів та визначення оптимальних параметрів технологічного розвитку елементів енергосистем. До них відносяться моделі: циклічного розвитку систем генерації, довгострокового технологічного оновлення структури споживання та генеруючої потужності енергетичних систем, ієрархічно керованої квазідинамічної енергетичної системи, мінімізації середньозваженої вартості електроенергії, багатовузлової інтегрованої енергосистеми. Головною відмінністю цих моделей є врахування в явному вигляді впливу економічних і технологічних індикаторів розвитку національних економік та виробництва, що представлені у вигляді квазідинамічних функцій із дискретними стохастичними змінними. Це дозволяє адекватно описати процеси функціонування енергоблоків у складі енергетичних об'єднань. Впровадження запропонованих оптимізаційних моделей дозволяє моделювати процеси використання перспективних технологій систем енергетики в коротко і довгостроковій перспективі. В процесі виконання роботи проведено розгляд сценаріїв використання генеруючих, резервних та акумулюючих потужностей енергосистем України та сусідніх країн-учасниць ENTSO-E. Враховані встановлені потужності складових енергосистем, максимальні можливості зміни потужності акумуляції та генерації електроенергії. Важливим критерієм є конкурентоспроможність на горизонті моделювання до 2040 року відносно інших енергетичних технологій. Результати моделювання свідчать, що незважаючи на зниження собівартості виробництва електроенергії вітровими та

фотоелектричними станціями, вони зможуть бути включені до складу енергооб'єднань тільки при наявності досить потужних, енергетично і економічно ефективних промислових акумуляторів енергії.

Другий розділ присвячений розробленню методу економіко-технологічного прогнозування параметрів оптимального функціонування та розвитку енергетичної системи, нових та удосконаленню економіко-математичних моделей і програмних засобів оцінювання ефективності функціонування та прогнозування розвитку енергетики України та сусідніх країн-учасниць ENTSO-E в умовах швидкого зростання потужності відновлюваних джерел енергії.

За допомогою *нової економіко-математичної моделі дифузії інноваційних технологій в енергетиці* розраховані сценарії розвитку СЕС в Німеччині та Україні.

Метод економіко-технологічного прогнозування параметрів оптимального функціонування та розвитку енергетичної системи та модель довгострокового технологічного оновлення структури енергетичної системи дозволили зробити прогнози структури споживання та генерації електроенергії ОЕС України до 2040 року, які дозволяють оцінити потенціал вдосконалення компонентів ОЕС України.

Модель ієрархічно керованої квазідинамічної енергетичної системи дозволяє вирішувати задачі управління складними динамічними енергосистемами. Окремими випадками цієї моделі є розроблені автором *модель багатовузлової інтегрованої енергосистеми та модель мінімізації середньозваженої вартості виробництва електроенергії*.

Модель багатовузлової інтегрованої енергосистеми дозволяє вирішувати задачі оптимального завантаження генеруючих потужностей енергосистем із критерієм мінімізації витрат на виробництво та імпорт / експорт електроенергії.

Модель мінімізації середньозваженої вартості виробництва електроенергії за традиційними, ВДЕ та технологіями накопичення електроенергії дозволяє оцінити потенціал можливого зниження середньогодинної вартості виробництва електроенергії та, на основі прогнозних добових графіків навантаження, вирішити задачу прогнозування вибору оптимальних режимів використання генеруючої та накопичувальної потужностей системи.

В третьому розділі надано опис нового розробленого автором програмно-інформаційного комплексу для моделювання як інтегрованих багатовузлових, так і автономних систем електро- та теплопостачання. Означені головні відмінності програмно-інформаційного комплексу, що запропонований в даному дослідженні, від найбільш відомих в Україні програмно-інформаційних засобів моделювання енергосистем. Представлена структура програмно-інформаційного комплексу та склад і структура використання економіко-математичних моделей вбудованих до програмно-інформаційного комплексу. Комплекс дозволяє забезпечити оптимальний вибір агрегатів та режимів їх експлуатації, які забезпечують вироблення та перерозподіл енергії відповідно до графіка споживання. Виконано моделювання оптимізованих режимів експлуатації зазначених енергосистем. Моделювання дозволило розрахувати та дослідити

параметри, що забезпечують оптимізоване покриття графіків навантаження на прикладах фактичних та прогнозованих значень встановленої потужності енергоагрегатів і графіків навантаження інтегрованих та автономних енергосистем.

В четвертому розділі надано результати виконаних числових досліджень з використанням створених та удосконалених моделей. Метод економіко-технологічного прогнозування параметрів оптимального функціонування та розвитку енергетичної системи і модель довгострокового технологічного оновлення структури енергетичної системи дозволили зробити прогнози структури споживання та генерації електроенергії ОЕС України до 2040 року, які дозволяють оцінити потенціал вдосконалення компонентів ОЕС України. Аналіз умов паралельної роботи ОЕС України з суміжними країнами, що входять до ENTSO-E, дозволив визначити умови синхронізації з урахуванням граничних значень обсягів транскордонного обміну електроенергією, географічного розташування, наявності та потужності міждержавних ліній електропередачі, величин потужності максимально допустимих обсягів імпорту та експорту, одержати числові оцінки параметрів енергоблоків та технологій, необхідних для сталого функціонування та перспективного розвитку енергосистеми.

Висновки по дисертаційній роботі підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень.

Список використаної літератури із 122 найменувань охоплює сучасні вітчизняні та закордонні публікації за темою дисертаційних досліджень.

Додатки до дисертаційної роботи містять основні показники системи моделювання енергетики, множини, параметри та змінні моделі, яка побудована для енергосистеми України, таблиці електричної потужності для 2018 року, коли спостерігалися максимуми і мінімуми навантаження для кожної з енергосистем України та суміжних країн-членів ENTSO-E, акти впровадження результатів дисертаційної роботи та список публікацій.

Відповідність дисертаційної роботи вимогам МОН України

Матеріал дисертації викладено досить логічно і обґрунтовано, усі розділи мають свою специфіку, котра у сукупності свідчить про цілісність та завершеність дисертаційної роботи. Таким чином, представлена дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, яка написана науковою мовою. Зміст, структура, послідовність та повнота розв'язаних задач цілком відповідають як темі роботи, так і затвердженим вимогам до написання дисертаційних досліджень МОН України.

Зауваження.

До числа зауважень до виконаного дисертаційного дослідження слід віднести такі:

– автору дослідження слід було більш уваги приділити аналізу особливостей поточного стану національного паливно-енергетичного комплексу, включно з сектором електроенергетики, тепlopостачання, газопостачання, споживання енергії. До таких особливостей слід віднести велику ступінь централізації об'єднаної енергетичної системи України, велику зношеність енергогенеруючого обладнання, наявність потужної

газотранспортної системи, а також потужних систем централізованого теплопостачання, велику частку атомної та вугільної генерації, низький розвиток малої розподіленої когенерації, фрагментарний характер існуючого енергетичного законодавства;

– питання використання потенціалу цілісного підходу до окремих секторів енергетики заслуговують бути дослідженими більш ретельно. Зокрема цілісний підхід до електроенергетичного сектору та сектору теплопостачання має великий потенціал підвищення балансуєчої спроможності об'єднаної енергетичної системи та підвищення енергетичної ефективності систем централізованого теплопостачання. Потужна розгалужена національна газотранспортна система також має великий потенціал підвищення балансуєчої спроможності об'єднаної енергосистеми шляхом впровадження малої розподіленої когенерації;

– у розділі 1.4 «Перехід енергетичного сектору України на ВДЕ до 2050 року» розглядаються три сценарії розвитку відновлюваної енергетики. Надається опис цих сценаріїв. Однак було би доцільно додати порівняльний аналіз цих сценаріїв із застосуванням аналізу сильних та слабких сторін кожного з них;

– у розділі 4 на основі розробленої дисертантом моделі довгострокового технологічного оновлення структури енергетичної системи визначені напрямки вдосконалення компонентів ОЕС України: нарощування та максимальне використання потужності АЕС, зростання пропускнуєчої спроможності міждержавних ЛЕП, яке є вигідним як для України, так і для решти країн ОЕС, певне корегування параметрів енергоблоків та технологій, необхідних для сталого функціонування та перспективного розвитку енергосистеми, встановлення економічно ефективних промислових акумуляторів енергії. На жаль, у висновках до цього розділу не деталізовані кількісні характеристики вищезгаданих напрямків вдосконалення компонентів ОЕС.

Сформульовані зауваження не знижують загальну позитивну оцінку дисертаційного дослідження та можуть бути використані як напрямки подальших досліджень.

Загальний висновок опонента по дисертаційній роботі.

Детальний аналіз матеріалу дисертаційної роботи та опублікованих наукових праць дає змогу стверджувати, що дисертаційна робота Денисова Віктора Абрамовича «Моделі та засоби оптимізації структури об'єднаної енергосистеми із використанням відновлюваних джерел генерації» містить усі ознаки завершеної наукової роботи. В ній отримано нові науково обґрунтовані результати вдосконалення і подальшого розвитку моделей та засобів оптимізації складу та режимів навантаження генеруючих, резервних та акумулюючих потужностей енергосистем. Означені результати в сукупності розв'язують актуальне наукове завдання підвищення ефективності функціонування та оновлення енергосистем за рахунок вирішення задач вибору оптимальних режимів їх використання за критеріями енергетичної, економічної та екологічної ефективності.

Дисертаційна робота Денисова В.А. є самостійно виконаним науковим дослідженням. Матеріал дисертації викладено послідовно, стиль викладання доказовий, чіткий і лаконічний. Висновки до кожного розділу і дисертації в

цілому тісно пов'язані з її змістом і відображають суть виконаних досліджень. Публікації автора повністю висвітлюють наукові положення і результати наукових досліджень.

Враховуючи актуальність теми дисертаційної роботи, а також отримані достовірні наукові результати, що мають наукову і практичну значимість, та враховуючи достатню повноту висвітлення основних положень дисертаційної роботи в опублікованих працях, вважаю, що представлена дисертаційна робота відповідає всім вимогам Міністерства освіти і науки України та «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567, а її автор Денисов Віктор Абрамович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.01 – енергетичні системи та комплекси.

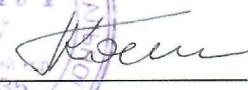
Офіційний опонент

Д.т.н., старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник
Інституту газу НАН України



Нікітін Є.Є.

Особистий підпис Нікітіна Є.Є. підтверджую,
заступник директора Інституту газу
НАН України, к.т.н.



Костоґриз К.П.