

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.

Розвиток відновлюваної енергетики в Україні демонстрував стабільну тенденцію зростання у продовж 2017-2021 років, де спостерігалось постійне підвищення кількості введених в експлуатацію різних типів об'єктів. Постійне підвищення кількості об'єктів відновлюваної енергетики призводить до зростання цінового навантаження на споживачів електричної енергії України, а також загострює проблеми, що пов'язані із забезпеченням операційної безпеки ОЕС України. В той же час енергетична безпека відіграє важливу роль у забезпеченні економічного функціонування і зростання держави. Крім того, у процесі відновлення України енергетика має стати однією з ключових галузей, яка забезпечуватиме експортні надходження і підтримуватиме фінансову стійкість.

Можливість сталого економічного розвитку національної економіки значною мірою визначається надійністю та ефективністю систем енергозабезпечення. Важливою особливістю сучасного світу є відкритість національної економіки. При цьому функціонування і розвиток національної економіки відбувається за умов постійного зростання глобальної конкуренції і впливу як інших економік, особливостей функціонування глобальних ринків ресурсів, в тому числі і паливно-енергетичних, капіталу, а також цілей розвитку і фактичних дій транснаціональних корпорацій. Одночасно із зростанням мінливості глобальної економічної системи відбувається підвищення вимог до екологічності технологічних процесів, зокрема, процесів видобування, перетворення та споживання енергетичних ресурсів та енергоносіїв. На сьогодні відсутні універсальні способи економічно прийняттого узгодженого вирішення проблеми задоволення енергетичних потреб людства із забезпеченням відсутності негативного впливу на довкілля.

Актуальність дисертаційної роботи Денисова В.А. обумовлена поточними тенденціями та викликами у сфері енергетики та сталого розвитку. Ключовими моментами актуальності є:

1. Перехід до відновлюваної енергії: Оптимізація структури інтегрованих енергетичних систем із зосередженням на відновлюваних джерелах енергії має вирішальне значення для досягнення цілей сталого розвитку та пом'якшення кліматичних змін.

2. Технологічний прогрес: Постійний прогрес у технологіях, накопичення енергії та інтелектуальних мереж забезпечує нові можливості оптимальної інтеграції відновлюваної енергії в існуючі та нові енергетичні системи. Моделі та інструменти, що можуть ефективно відстежувати мінливість і переривчастість відновлюваних джерел, є важливими для надійності та стійкості енергосистем.

3. Вплив 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: Ефективне використання технологій накопичення енергії є ключовим аспектом оптимізації енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел енергії. Моделі, що вирішують проблеми оптимальної інтеграції накопичувачів енергії (акумуляторів) і стратегії реагування на попит, мають вирішальне значення для підтримки стабільності мережі.

5. Соціальна значимість: Дослідження моделей та засобів оптимізації впровадження відновлюваної енергії, можуть сприяти формуванню ефективних сценаріїв сталого енергетичного майбутнього.

6. Економічна конкурентоспроможність: 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 є розроблення нових і вдосконалення існуючих математичних моделей та програмних засобів для оптимізації складу та режимів функціонування енергосистем в умовах швидкого зростання потужностей відновлюваних джерел енергії у світі та в Україні.

Врахування у 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** науковим 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 у модифікованому інтегральному критерії якості функціоналу економіко-технологічного впливу, 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 дозволила 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, що деталізована за структурою свого технологічного наповнення. 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 проведеним моделюванням 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. Також достовірність підтверджується 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;

– проблемно-орієнтований програмно-інформаційний комплекс, який містить програмні модулі числової реалізації розроблених та досліджених автором математичних моделей впроваджено 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;

що 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 (Угорщини, Словаччини, Польщі, Румунії) 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 в галузях енергокомплексу України; визначення перспективної структури генерації та споживання електричної енергії ОЕС України; визначення перспективних технологій відновлюваних джерел енергії та економічно доцільних обсягів їх впровадження в енергосистемі України. Запропоновано 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 ОЕС України, ієрархічно керованої квазідинамічної енергетичної системи, мінімізації середньозваженої вартості електроенергії, багато вузлової 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 дозволило адекватно описати процеси функціонування енергоблоків у складі енергетичних об'єднань. Впровадження запропонованих оптимізаційних моделей дозволило моделювати процеси використання перспективних технологій систем енергетики в коротко і довгостроковій перспективі. В процесі виконання роботи проведено розрахунки 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.

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 багато вузлової інтегрованої енергосистеми дозволяє вирішувати задачі оптимального завантаження генеруючих потужностей енергосистем із критерієм мінімізації витрат на виробництво та імпорту/експорту 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 (ПІК) для моделювання як інтегрованих багато вузлових, так і автономних систем електро та тепlopостачання. 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.

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 систем 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.

1. У розділі 1.4 автором проведено аналіз українських, європейських стратегій, планів розвитку та інших програм і зроблено акцент на реалізації Третього енергетичного пакету ЄС, проте не розглянуто директиви і цілі Четвертого енергетичного пакету ЄС, який уже в повній мірі реалізовується європейськими країнами з 2019 року.

2. У п.2.2. автором виконано прогнози розвитку структур генеруючих потужностей та обсягів генерації ОЕС України до 2040 року, результати прогнозу можуть бути маловірогідними, оскільки розвиток ВДЕ обумовлено законом України «Про альтернативні джерела енергії» до початку 2030 року, після даного періоду виникає невизначеність, що не враховано в даній моделі.

3. При реалізації «*Моделі мінімізації середньозваженої вартості*» не враховано обмеження для режимів розряду накопичувачі, які обумовленні технологічним процесом.

4. На Рис. 4.1 представлена встановлена потужність СЕС в Україні до 2023 року (графік чорного кольору), дані не відповідають дійсності в умовах початку війни.

5. У пунктах розділу 4 для апробації математичних моделей і ПК використовувались дані 2018-2020 рр. і в отриманих тестових розрахунках для української енергосистема не враховані дії в період воєнного стану.

6. У якості редакційних зауважень слід зазначити такі:

- відсутня нумерація формул на ст. 24, 37, 38, 46, 48, 56, 57, 58, 65, 66 ;
- п. 1.8. «*Модель мінімізації середньозваженої вартості виробництва та накопичення електроенергії*» розділу 1 написаний обсягом в 1 сторінку, не доречно такий обсяг матеріалу виділяти у окремий пункт;
- на Рис 1.6 наведено «Енергетичні технології БАТ» і в подальшому по тексту також використовувалось дане скорочення «БАТ», яке не наведено в переліку умовних позначень;
- висновки до окремих розділів недостатньо підкріплені наведеними в цих розділах результатами досліджень;
- при оформленні списку використаних джерел допущені неточності та граматичні помилки.

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

к.т.н., доцент, доцент кафедри електропостачання
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Юрій ВЕРЕМІЙЧУК

