

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

ДЕНИСОВ ВІКТОР АБРАМОВИЧ



УДК 620.9:621.311

**МОДЕЛІ ТА ЗАСОБИ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ
ОБ'ЄДНАНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ
ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ГЕНЕРАЦІЇ**

Спеціальність 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2024

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана Інституті загальної енергетики НАН України, м. Київ

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

ШРАЙБЕР Олександр Авраамович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
НІКІТІН Євген Євгенович,
Інститут газу НАН України, м. Київ
провідний науковий співробітник відділу технологій
альтернативних палив

кандидат технічних наук, доцент
ВЕРЕМІЙЧУК Юрій Андрійович,
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
доцент кафедри електропостачання

Захист дисертації відбудеться «15» травня 2024 року о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.223.01 в Інституті загальної енергетики НАН України за адресою: 03150, м. Київ, вул. Антоновича, буд.172, тел.294-67-01.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту загальної енергетики НАН України за адресою: 03150, м. Київ, вул. Антоновича, буд.172.

Автореферат розісланий «21» березня 2024 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.223.01



О.Л. Декуша

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. 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 видобування, перетворення та споживання енергетичних ресурсів.

Розробці теоретичних засад, методів та засобів оцінки ефективності функціонування і розвитку систем енергетики присвячено роботи таких українських і іноземних вчених, як Кулик М.М., Бабак В.П., Кириленко О.В., Жаркін А.Ф., Носовський А.В., Стогній Б.С., Кудря С.О., Якименко Ю.І., Кондратенко І.П., Кузнецов В.Г., Мохор В.В., Новосельцев О.В., Резцов В.Ф., Стоян Ю.Г., A. Lovins, M. Jacobson, D. Kammen, J. Goldemberg, V. Smil, D. MacKay та інші.

Актуальність дисертаційної роботи обумовлена поточними тенденціями та викликами у сфері енергетики та сталого розвитку з урахуванням наступних ключових моментів. Перехід до відновлюваної енергії: оптимізація структури інтегрованих енергетичних систем із зосередженням на відновлюваних джерелах енергії та розподіленої генерації має вирішальне значення для досягнення цілей сталого розвитку та пом'якшення кліматичних змін. Технологічний прогрес: постійний прогрес у технологіях генерації, накопичення енергії, розвиток інтелектуальних мереж забезпечує нові можливості оптимальної інтеграції відновлюваної енергії в існуючі та нові енергетичні системи. Моделі та інструменти, що можуть оперативнo відстежувати мінливість і переривчастість відновлюваних джерел, є важливими для прийняття оптимальних управлінських рішень що до забезпечення надійності та стійкості енергосистем. Вплив на навколишнє середовище: оптимізація енергетичних систем з використанням відновлюваних джерел сприяє зменшенню викидів парникових газів і мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. 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 генерування та постачання електроенергії. Соціальна значимість: дослідження моделей та засобів оптимізації впровадження відновлюваної енергії, можуть сприяти формуванню ефективних сценаріїв сталого забезпечення споживачів екологічно чистою та економічно доступною енергією. Економічна конкурентоспроможність: зменшення витрат на технології відновлюваної енергії в поєднанні з потенціалом економії за рахунок оптимізації режимів функціонування традиційної генерації робить інтеграцію відновлюваної енергії економічно привабливою. Моделі, що враховують економічні аспекти інтеграції відновлюваної енергетики є важливими для прийняття стратегічних рішень в енергетичному секторі.

Отже, важливою задачею виконаного дослідження є оптимізація структури та режимів функціонування енергосистем в умовах швидкого зростання потужностей відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), що потребує розроблення нових і вдосконалення існуючих економіко-математичних моделей та програмних засобів.

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

Таким чином, задача розроблення нових та удосконалення існуючих економіко-математичних моделей для дослідження напрямів та оптимальних параметрів технологічного розвитку елементів енергосистем є актуальною науковою проблемою, що потребує вирішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до планів наукових робіт Інституту загальної енергетики НАН України, а саме: "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.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розроблення нових і вдосконалення існуючих методів, економіко-математичних моделей та програмних засобів для оптимізації структури і режимів функціонування генеруючих, резервних та акумулюючих потужностей енергосистем в умовах швидкого зростання потужностей відновлюваних джерел енергії у світі та в Україні.

Відповідно до визначеної вище мети дослідження сформульовано й розв'язано такі задачі:

- досліджено можливості оптимізованої диспетчеризації компонентів енергосистем, меж допустимих значень параметрів генеруючих, резервних та акумулюючих потужностей, що забезпечують стійку збалансовану роботу об'єднаної енергосистеми;
- удосконалено економіко-математичні моделі визначення техніко-економічної ефективності функціонування окремих об'єктів генерації електричної енергії протягом їх життєвого циклу;
- розроблено метод економіко-технологічного прогнозування параметрів оптимального функціонування та розвитку енергетичної системи;
- розроблено нові і удосконалено існуючі моделі економіко-математичного програмування для дослідження напрямів та визначення оптимальних параметрів технологічного розвитку елементів енергосистем;
- проведено розрахункові експерименти з використанням розробленого методу, моделей та програмних засобів для виявлення перспектив коротко- та довгострокового розвитку енергосистеми України.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування та оптимізації розвитку енергосистем з урахуванням швидкого зростання потужностей ВДЕ.

Предметом дослідження є моделі і програмні засоби оптимізації структури та режимів функціонування генеруючих, резервних та акумулюючих потужностей енергосистем в умовах швидкого зростання потужностей ВДЕ.

Методи дослідження. Методичну основу проведеного наукового дослідження склали такі методи: математична статистика – аналіз та прогнозування поведінки стохастичних часових рядів; методи математичного моделювання; довгострокові прогнози в енергетиці, одним з головних цілей яких є виявлення основних об'єктивних тенденцій розвитку електропостачання народного господарства; моделювання дифузії інноваційних технологій в енергетиці; системні дослідження, одним з ключових аспектів яких в енергетиці є математичне моделювання при оптимальному управлінні системами енергетики; динамічні комп'ютерні методи моделювання енергосистеми, як ієрархічної керованої квазідинамічної системи.

Наукова новизна одержаних результатів.

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.

Практичне значення одержаних результатів.

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:

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

- b) 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.

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.

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.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати отримані здобувачем особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: [1] – створення програмно-інформаційного комплексу, який містить програмні модулі моделей оптимізації режимів функціонування енергетичних систем; [5] – створення та удосконалення моделі довгострокового технологічного оновлення структури

енергетичної системи; [9] – оцінка та формалізація технологічних умов паралельної роботи ОЕС України з сусідніми країнами, що входять до складу ENTSO-E; [10] – оцінка показників виробництва теплової енергії за рахунок прямого використання електроенергії з відновлюваних джерел у сучасних теплогенераторах; [13] – створення моделі для прогнозування оптимальних режимів використання квазідинамічних енергетичних систем; [14] – створення моделі для оцінки собівартості електроенергії генеруючих та накопичувальних технологій; [17] – оцінка собівартості та можливих обсягів виробництва електроенергії сонячними електростанціями в Україні.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, представлені в дисертації, були висвітлені на Міжнародних і Всеукраїнських науково-технічних та науково-практичних конференціях, зокрема: 2022 IEEE 8th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY SMART SYSTEMS IEEE ESS-2022; "XII International Scientific and Practical Conference", «Science, Innovations and Education: Problems and Prospects», Tokyo, 28-30 June 2022; "XIII International Scientific and Practical Conference", Chicago, USA, 15-17 June 2022; The 4th International scientific and practical conference — Modern research in world science (July 10-12, 2022) SPC — Sci-conf.com.ua, Lviv, Ukraine; V Міжнародна науково-практична конференція «MODERN RESEARCH IN WORLD SCIENCE» 7-9.08.2022 Львів, Україна; SCIENCE, RESEARCH, DEVELOPMENT. Technics and technology. 2014-2019; Сучасна наука: теорія і практика. Матеріали всеукраїнської науково-практичної заочної конференції (м.Запоріжжя, 28-30 червня 2012 року); Сучасна наука в мережі інтернет. Матеріали шостої всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції, 25-27 лютого 2010 року; Українська наука XXI століття. Матеріали п'ятої всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції, 17-19 червня 2009 року.

Публікації. 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 і обсяги дисертації. 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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 в умовах швидкого зростання потужності ВДЕ. Загальна схема досліджень енергетики (рис. 1) передбачає: застосування математичних моделей; урахування невизначеності інформації про майбутні умови розвитку енергетики: темпів зростання потреб в паливно-енергетичних ресурсах, перспектив науково-технічного прогресу, екологічних обмежень; урахування територіального розподілу виробничих потужностей енергетики та рівнів споживання електроенергії в територіальних вузлах; обробку та аналіз результатів, отриманих в наслідок застосування математичних моделей.



Рисунок 1 – Загальна схема досліджень енергетики

Дослідження виконуються з урахуванням можливих сценаріїв енергоспоживання: песимістичного, референтного, оптимістичного. Розглядається та оцінюється технологічна та економічна ефективність використання та перспективність кожної технології. Оптимізація за економіко-технологічними

критеріями дозволяє виявити довгострокові тенденції розвитку енергетики, які мають найбільшу ймовірність бути впровадженими. Теоретичний аналіз показує, що рішення глобальної оптимізаційної задачі на мінімум витрат збігається з рішеннями локальних завдань на максимум прибутку при врахуванні відповідних обмежень. При побудові системи економіко-математичних моделей для дослідження перспектив розвитку енергетична система в цілому або її окремі частини, що моделюються на своїх рівнях ієрархії, розглядаються як керована квазідинамічна система, траєкторія якої, під дією допустимих оптимальних управлінь, представляє з себе послідовність станів оптимальної енергетичної та економічної рівноваги.

Навіть короткий огляд робіт, присвячених удосконаленню методів моделювання енергетичних систем підтверджує висновок про актуальність оновлення існуючих і розробки нових програмно-інформаційних засобів для зазначених цілей. Так, станом на 2019 рік у світі нараховувалося 146 відомих систем моделювання енергетики. Існуючі моделі можуть бути класифіковані за просторовим або часовим масштабами, способом обліку властивостей об'єкта, замкнутості системи тощо. Найбільш поширеними є моделі, які призначені для визначення пропорцій розвитку систем енергетики. У більшості робіт зроблено висновок, що розробка єдиного інструменту, який однаково відповідає різноманіттю вимог до моделей енергосистем, здається мало перспективною. Тому в даній роботі запропоновано метод та економіко-математичні моделі, спрямовані на вирішення конкретних проблем, що виникають в процесі оцінки поточного стану і якості сценаріїв розвитку енергетичних систем.

В таблиці 1 представлено *відомі* моделі, модифікація та узагальнення яких дозволила розробити *новий метод та удосконалені моделі*.

Таблиця 1 – Відомі та нові і удосконалені моделі

| ВІДОМІ МОДЕЛІ | | НОВІ ТА УДОСКОНАЛЕНІ МОДЕЛІ | |
|---|---|--|---|
| Фундаментальна модель дифузії інновацій | ➔ | Метод економіко-технологічного прогнозування параметрів оптимального функціонування та розвитку енергетичної системи | |
| ↓ | | ↓ | |
| Модель змішаного впливу дифузії нових технологій | | Динамічні моделі циклічного розвитку систем генерації | |
| | | Модель довгострокового технологічного оновлення структури споживання та генеруючої потужності ОЕС України | |
| Класична постановка задачі управління динамічною системою | ➔ | Модель ієрархічно керованої квазідинамічної енергетичної системи | |
| | | Модель мінімізації середньозваженої вартості електроенергії | Модель багато вузлової інтегрованої енергосистеми |

На основі модифікації фундаментальної моделі дифузії інновацій та узагальнення моделі змішаного впливу дифузії нових технологій, було розроблено *нову динамічну модель циклічного розвитку систем генерації*. Ця модель, в свою чергу, дозволила розробити *новий метод економіко-технологічного прогнозування параметрів оптимального функціонування та розвитку енергетичної системи та нову модель довгострокового технологічного оновлення структури споживання та генеруючої потужності ОЕС України*. Узагальнення класичної моделі управління динамічною системою дозволило розробити *нову модель ієрархічно керованої квазідинамічної енергетичної системи*. Окремими випадками цієї моделі є розроблені

автором модель мінімізації середньозваженої вартості електроенергії та модель багато вузлової інтегрованої енергосистеми. Програмні модулі числової реалізації перелічених математичних моделей впроваджено у розроблений автором проблемно-орієнтований програмно-інформаційний комплекс.

Динамічна модель циклічного розвитку систем генерації.

Системна теорія економічних циклів, звана також теорією довгих хвиль Кондратьєва, досліджує закономірності розвитку великих систем. Вона є основою теорії інновацій і численних моделей дифузії нових технологій. Закон розвитку великих систем виражається диференціальним рівнянням, яке згодом було переформульовано в термінах впровадження інноваційних технологій і вважається фундаментальною моделлю дифузії інновацій. Модифікована автором фундаментальна модель дифузії інноваційної енергетичної технології k представлена формулою (1):

$$\frac{dP^k(\tau)}{d\tau} = g(\tau)(P^{\Sigma k}(\tau) - P^k(\tau)), \quad (1)$$

де: $g(\tau)$ – коефіцієнт дифузії; $P^k(\tau)$ – поточна потужність технології; $P^{\Sigma k}(\tau)$ – максимальна можлива потужність технології. Залежно від формули для коефіцієнта дифузії $g(\tau)$, запропоновані три моделі інноваційної дифузії: модель зовнішнього впливу, модель внутрішнього впливу та модель змішаного впливу, яка об'єднує обидві попередні моделі і найбільш часто використовується в дослідженнях:

$$\frac{dP^k(\tau)}{d\tau} = \left\{ p + \frac{q}{P^{\Sigma k}} P^k(\tau) \right\} (P^{\Sigma k}(\tau) - P^k(\tau)), \quad (2)$$

де: p – інтенсивність зовнішнього впливу; q – коефіцієнт швидкості розповсюдження інформації про інноваційну технологію.

За визначенням, (рис.2) обсяг впровадження інновації спочатку збільшується зі зростаючою швидкістю. Згодом, крива досягає точки перегину, і швидкість дифузії починає зменшуватися. Нарешті, дифузія досягає рівня насичення $P^{\Sigma k}(\tau)$.

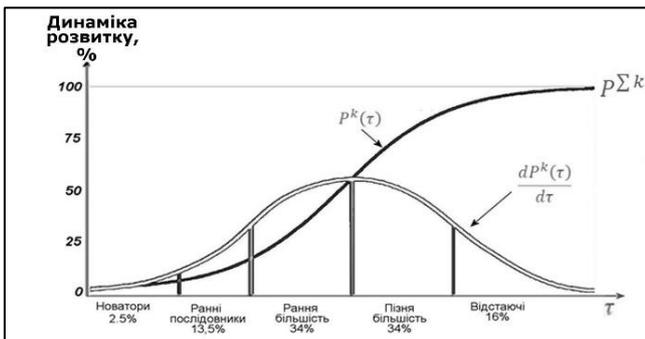


Рисунок 2 – Динаміка розвитку інноваційної технології



Рисунок 3 Сценарії розвитку економічних та технологічних коефіцієнтів

Використання модифікованої моделі змішаного впливу дозволило автору розрахувати сценарії розвитку економічних та технологічних коефіцієнтів (рис.3), що є складовими запропонованого автором функціонала економіко-технологічного впливу, який входить до нового методу економіко-технологічного прогнозування параметрів оптимального функціонування та розвитку енергетичної системи та нової узагальненої моделі розвитку енергетичної технології у вигляді суми декількох логістичних кривих (3):

$$P^k(\tau+1) = P^k(\tau) + K_m \sum_{j=1}^J F(k, \tau) \left\{ p_j + \frac{q_j}{P^{\Sigma k_j}(\tau)} P^k_j(\tau) \right\} (P^{\Sigma k_j}(\tau) - P^k_j(\tau)), \quad (3)$$

де: K_m – коефіцієнт масштабування;

$F(k, \tau) = F[PPF(\tau), ET(k, \tau), FCF(k, \tau), EGR(\tau)]$ – функціонал економіко-технологічного впливу, в якому (рис.3): $PPF(\tau)$ – регіональний коефіцієнт купівельної спроможності, $ET(k, \tau)$ – ефективність технології, $FCF(k, \tau)$ – коефіцієнт кінцевої вартості, $EGR(\tau)$ – темп зростання економіки.

Узагальнена модель у вигляді суми декількох логістичних кривих дозволила розрахувати сценарії розвитку СЕС в Німеччині та Україні. Також вона є складовою моделі довгострокового технологічного оновлення структури споживання та генеруючої потужності ОЕС України.

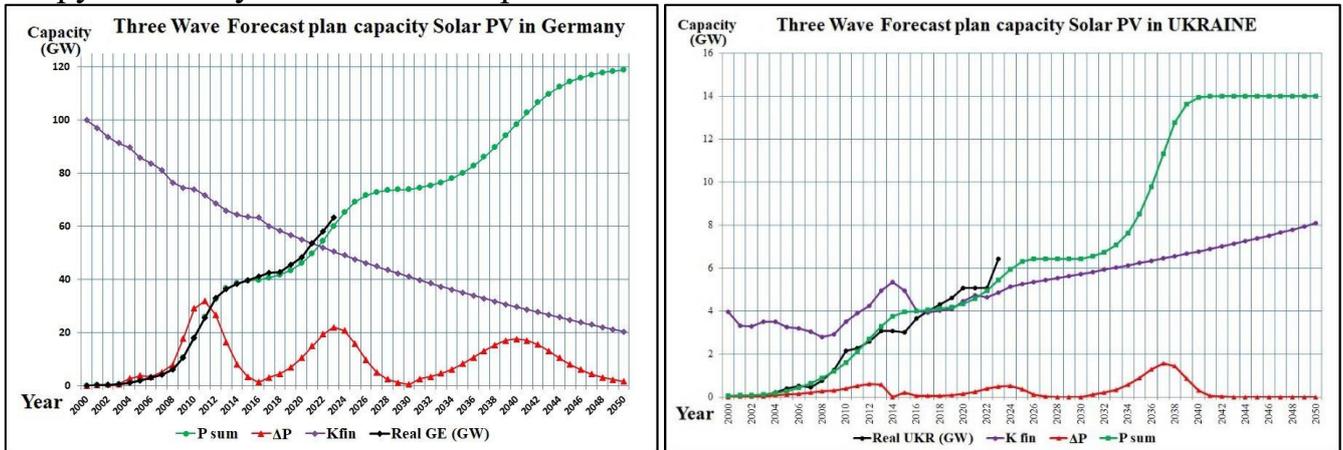


Рисунок 4 – Сценарії розвитку СЕС в Німеччині та Україні

Метод економіко-технологічного прогнозування параметрів оптимального функціонування та розвитку енергетичної системи та модель довгострокового технологічного оновлення структури споживання та генеруючої потужності ОЕС України, що є складовою цього методу, призначені для дослідження коротко та довгострокових сценаріїв. Модель є окремим випадком моделі ієрархічної керованої квазідинамічної системи та квазідинамічної моделі економіко-технологічного впливу життєвого циклу інноваційних технологій. Основною відмінністю запропонованої моделі є явне врахування впливу економіко-технологічних показників розвитку національної економіки та виробництва, представлених у вигляді квазідинамічних функцій із дискретними стохастичними змінними.

Модель представлена як ієрархія сценаріїв. На верхньому рівні ієрархії задіяні агреговані технології енергозабезпечення. Матриця стану системи $\Omega(k, \tau)$ відображає структуру обсягів генерації, постачання та споживання енергії на кроці τ , $\tau=0,1,2,\dots,T$ горизонту моделювання. Усі використані $k=1,\dots,K$ технології беруть участь у забезпеченні балансу поставленої $E_{S\tau}^{\Sigma}$ та спожитої $E_{C\tau}^{\Sigma}$ на кожному кроці τ енергії. Основними обмеженнями моделі є дотримання балансу загальної потужності P_{τ}^{Σ} , маневреної потужності $P_{m\tau}^{\Sigma}$ та обсягів генерованої $E_{G\tau}^{\Sigma}$, поставленої $E_{S\tau}^{\Sigma}$ та спожитої $E_{C\tau}^{\Sigma}$ енергії, при умові, що всі параметри належать до набору можливих станів. Введено міру μ_{τ} неузгодженості векторів поставленої та спожитої енергії. Вихідною інформацією для моделювання є: цільова послідовність річного споживання енергії $E_{C\tau}^{\Sigma} = \sum_{k=1}^K E_{C\tau}^k$; початковий стан вектору загального постачання E_{S0}^{Σ} ;

вектор чистої вигоди $NB_k = K_m (LACE_k - LCOE_k)$ для кожної з агрегованих технологій, залучених до розрахунку; функціонал економіко-технологічного впливу $F(k, \tau)$. Прогнозована вартість компонентів технології: $C_{k\tau}^{cap}$ – інвестиції, $C_{k\tau}^{co}$ – постійні операційні витрати, $C_{k\tau}^{vo}$ – змінні операційні витрати.

Розраховується набір допустимих станів траєкторії розвитку агрегованої технології k : $\Phi_{k\tau} \{NB_k, F(k, \tau)\}$. Вирішується задача розрахунку такого вектору постачання $E_{S\tau}^\Sigma(\Phi_{k\tau})$, який мінімізує міру μ^Σ – сумарної неузгодженості векторів поставленої та спожитої енергії.

Цільова функція мінімізації сумарної неузгодженості векторів відпущеної та спожитої енергії протягом прогнозного періоду з дотриманням обов'язкових обмежень має наступний вигляд:

$$\mu^\Sigma = \sum_{\tau=1}^T (E_{S\tau}^\Sigma - E_{C\tau}^\Sigma) \forall u(\tau, k), \xi(\tau, k) \rightarrow \min, \quad (4)$$

де на кожному кроці $\tau=1, 2, \dots, T$, для кожної агрегованої технології k : $E_{S\tau}^\Sigma, E_{C\tau}^\Sigma$ – загальні обсяги відпущеної та спожитої енергії; $u(\tau, k)$ – вектор управляючих дій; $\xi(\tau, k)$ – вектор випадкових зовнішніх збурень. Оптимальна цільова траєкторія вектору постачання $E_{S\tau}^{\Sigma-OPT}(\Phi_{k\tau})$ визначається на основі прогнозів загального розвитку економіки та пов'язаних з ними прогнозів структури споживання $E_{C\tau}^\Sigma = \sum_{k=1}^K E_{C\tau}^k$. Значення сумарних обсягів постачання, які отримані на верхньому рівні,

і значення компонент вектору $E_{S\tau}^\Sigma = \sum_{k=1}^K E_{S\tau}^k$ для кожної з агрегованих технологій є вихідними даними для розрахунків: необхідного балансу сумарної потужності P_τ^Σ ; необхідної структури маневрених потужностей $P_{m\tau}^\Sigma$; обсягів сумарної та по компонентній генерації $E_{G\tau}^\Sigma = \sum_{k=1}^K E_{G\tau}^k$, обсягів необхідних інвестицій $C_{k\tau}^{\Sigma cap} = \sum_{k=1}^K C_{k\tau}^{cap}$,

обсягів постійних експлуатаційних витрат $C_{k\tau}^{\Sigma co} = \sum_{k=1}^K C_{k\tau}^{co}$, суми змінних операційних

витрат $C_{k\tau}^{\Sigma vo} = \sum_{k=1}^K C_{k\tau}^{vo}$.

На наступних рівнях моделювання аналогічні розрахунки виконуються в межах кожної з агрегованих технологій, тобто розраховуються компоненти сценаріїв розвитку кожної з агрегованих технологій. За допомогою цієї моделі розраховано прогноз структури споживання та генерації електроенергії ОЕС України до 2040 року. Згідно з методом економіко-технологічного прогнозування параметрів оптимального функціонування та розвитку енергетичної системи прогноз розраховано в три етапи.

1. На першому, за допомогою узагальненої логістичної моделі (3) розраховано песимістичний та оптимістичний прогнози обсягів споживання ОЕС

України до 2040 року (рис.5).



Рисунок 5 – песимістичний та оптимістичний прогнози обсягів споживання ОЕС України до 2040 року

2. На другому етапі, з використанням формул чистої вигоди $NB_k = K_m (LACE_k - LCOE_k)$ та мінімізації сумарної собівартості генерації

$C_{S\tau}^{\Sigma} = \sum_{k=1}^K NB_k \cdot E_{S\tau}^k \rightarrow \min$, розраховано співвідношення потужностей та обсягів генерації технологій.

3. На третьому етапі вирішено задачу мінімізації сумарної неузгодженості обсягів генерації та споживання (4) (рис.6).

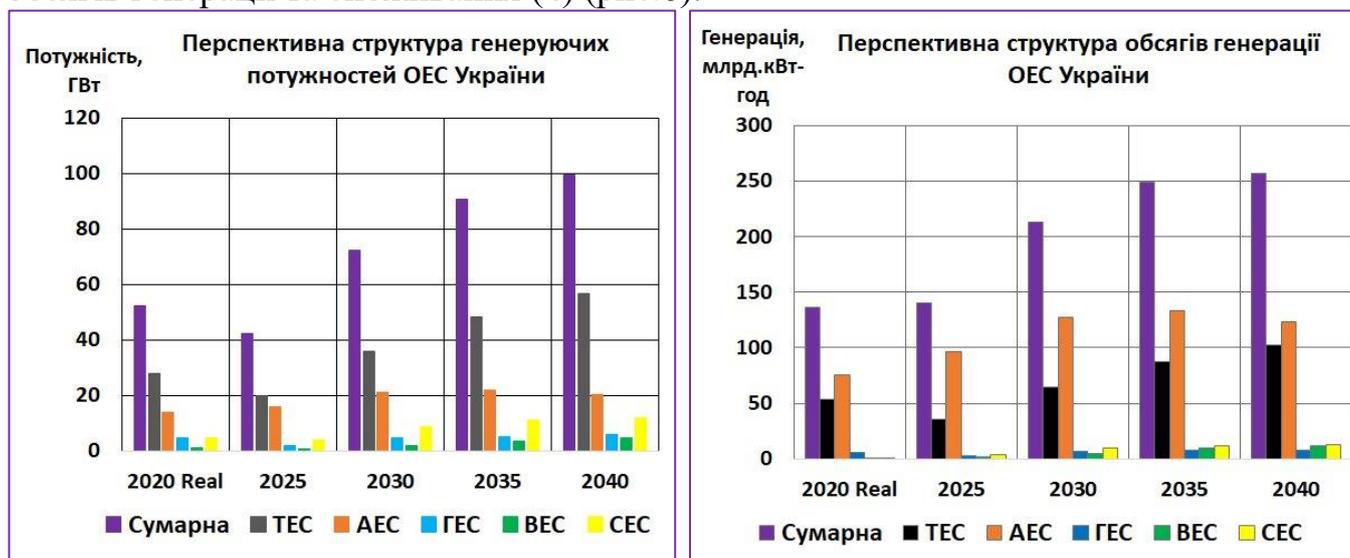


Рисунок 6 – Сценарії розвитку структур генеруючих потужностей та обсягів генерації ОЕС України до 2040 року

Таким чином:

1. За допомогою *нової математичної моделі дифузії інноваційних технологій в енергетиці* розраховані сценарії розвитку сонячних електростанцій (СЕС) в Німеччині та Україні.

2. *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.

Класична постановка задачі управління динамічною системою (УДС) припускає, що управління ухвалюються єдиним органом на основі одного критерію оптимальності. Критерій оптимальності може бути записаний у вигляді:

$$\mu = \sum_{\tau=1}^T g(\Omega(\tau), u(\tau), \xi(\tau)) \rightarrow \max$$

де у момент часу τ : g — значення критерію оптимальності, Ω — вектор стану УДС, u — вектор управляючих дій, ξ — вектор випадкових зовнішніх дій. Вирішенню цієї задачі в різних варіантах присвячені роботи по теорії оптимального управління.

Враховуючі складність і природну ієрархічність енергосистем, класична модель УДС виявляється недостатньою. Тому вона узагальнюється у вигляді моделі ієрархічно керованої квазідинамічної енергетичної системи з $r \in R$ рівнями адміністративно-територіальної ієрархії та галузевою (підгалузевою) інфраструктурою, що деталізована за структурою свого технологічного $k \in K$ наповнення. Задача управління такою системою сформульована автором нижче.

На горизонті моделювання T , для усіх: $\tau = 1, 2, \dots, T$; $r = 1, 2, \dots, R$; $k = 1, 2, \dots, K$: $\Omega(\tau, r, k)$ — вектор стану системи, $\Phi(\tau, r, k)$ — множина допустимих станів системи, g — функціонал економіко технологічного впливу, до якого належать елементи матриць: $\omega(\tau, r, k)$ — стану, $u(\tau, r, k)$ — керуючих дій, $\xi(\tau, r, k)$ — випадкових елементів зовнішнього впливу, наприклад, у нашому випадку, генеруючі потужності ВДЕ. μ — критерій оптимальності, $U(\tau, r, k), \Xi(\tau, r, k)$ — множини можливих значень керуючих та випадкових зовнішніх впливів. При виконанні умов: $\Omega(\tau, r, k) \in \Phi(\tau, r, k)$, $u(\tau, r, k) \in U(\tau, r, k)$, $\xi(\tau, r, k) \in \Xi(\tau, r, k)$, $\omega(\tau, r, k) \in \Omega(\tau, r, k)$, під впливом $u(\tau, r, k), \xi(\tau, r, k)$ система переходить до наступного стану:

$$\Omega(\tau, r, k) | u(\tau, r, k), \xi(\tau, r, k) \Rightarrow \Omega(\tau + 1, r, k).$$

Критерій оптимальності:

$$\mu_{\tau} = \sum_r^R \sum_k^K g(\omega(\tau, r, k), u(\tau, r, k), \xi(\tau, r, k)) \rightarrow \min / \max.$$

Модель багато вузлової інтегрованої енергосистеми, що є окремим випадком моделі ієрархічно керованої квазідинамічної системи — економіко-математична модель оптимізації складу та режимів навантаження енергосистем, які працюють в межах єдиної синхронної зони континентальної Європи ENTSO-E, із критерієм мінімізації витрат на виробництво та імпорту/експорту електроенергії. У найбільш загальному вигляді модель може бути описана наступним чином.

$$\sum_r^R \sum_{\tau}^T \left\{ \sum_g^G (P_{r\tau g}^{Gen} c_{r\tau g}^{Gen} + S_{r\tau g}^{Start} c_{r\tau g}^{Start}) + \sum_k^R P_{rk\tau}^{Imp} c_{k\tau}^{Imp} (1 - a_{kr}^{Transf}) \right\} \rightarrow \min,$$

Баланс виробництва – споживання – імпорту – експорту:

$$\sum_g^G P_{r\tau g}^{Gen} + \sum_k^R (P_{rk\tau}^{Imp} - P_{rk\tau}^{Exp}) = D_{r\tau}; \forall \tau \in T; \forall r \in R.$$

Баланс перетоків потужності:

Обмеження на пропускну спроможність ЛЕП (Net Transfer Capacity):

$$P_{rk\tau}^{Exp} \leq F_{kr}^{NTC}; P_{rk\tau}^{Imp} \leq F_{kr}^{NTC}; \forall \tau \in T; \forall r \in R; \forall k \in R (k \neq r).$$

Тут: T – період (час у годинах); $R(K)$ – множина вузлів; G – множина генеруючих потужностей; P – потужність; c – вартість; α – коефіцієнт втрат; D – споживання; F – максимальна пропускна спроможність ЛЕП.

Вихідною інформацією для оцінки та прогнозування оптимальних режимів є набір векторів і матриць вихідних параметрів кожної країни-учасниці для кожного кроку $\tau=1,2,\dots,T$ на горизонті моделювання: S – перелік країн s ; J – перелік технологій, $j=1,\dots,J$; $L(\tau,s)$ – прогнозована або розрахована диспетчерською службою кожної країни матриця погодинного навантаження; $C(c,j,s)$ – матриця собівартості технологій; $C^{\text{FUEL}}(f,j,s)$ – матриця цін на паливо f ; $W^{\text{CO}_2}(j,s)$ – матриця викидів CO_2 ; $P^{\text{RES}}(j,s,\tau)$ – погодинна потужність технологій ВДЕ; $\Psi(P^{\text{inst}}(j,s), P^{\text{max}}(j,s), P^{\text{min}}(j,s))$ – матриця параметрів і обмежень для відновлюваних джерел енергії. $\theta(n(j,s), P^{\text{inst}}(j,s), P^{\text{max}}(j,s), P^{\text{min}}(j,s), P^{\text{ramp}}(j,s))$ – матриця параметрів і обмежень для технологій, що можуть бути диспетчеризовані, де для технології j країни s : $n(j,s)$ – кількість енергоблоків; $P^{\text{inst}}(j,s)$, $P^{\text{max}}(j,s)$, $P^{\text{min}}(j,s)$ – встановлена, максимальна та мінімально допустима потужність; $E^{\text{max}}(j,s)$ – максимальне вироблення електроенергії протягом доби; $P^{\text{ramp}}(j,s)$ – допустима швидкість зміни потужності. Усі перераховані ресурси використовуються для вирішення задачі, де на кожному кроці τ горизонту моделювання T вирішується задача пошуку оптимального набору режимів генерації, резервування, накопичення та імпорту/експорту за умови дотримання технологічних обмежень. Розв'язком задачі є набір матриць, які забезпечують оптимальні умови: генерації $G(L,C,P^{\text{RES}},\theta,\Psi)$, резервування $R(L,C,P^{\text{RES}},\theta,\Psi)$, накопичення $A(L,C,P^{\text{RES}},\theta,\Psi)$ та імпорту/експорту (обсягів транскордонних перетоків) $F(L,C,P^{\text{RES}},\theta,\Psi)$. При формуванні параметрів вхідних даних враховані, викладені у кодексі систем передачі, вимоги до необхідних обсягів резервування які забезпечать: відновлення частоти; резервування та підтримку в аварійному та штатному режимах; доступні обсяги транскордонних технологічних перетоків електроенергії при роботі в межах єдиної синхронної зони континентальної Європи ENTSO-E енергосистем України, Польщі, Угорщини та Румунії.

Модель мінімізації середньозваженої вартості 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. Використання одержаного рішення забезпечує мінімізацію погодинної вартості виробленої електроенергії ОЕС України. Модель $\Omega(G,S,O,C,I,E,D,L)$ характеризується наступним набором основних параметрів, де для кожної генеруючої технології j : $G_j(P^{\text{min}}, P^{\text{max}}, C, r)$ – набір генеруючих вузлів, для кожного з яких: $P^{\text{min}}, P^{\text{max}}$ – мінімальна і максимальна потужність генерації, C_j – середньозважена вартість виробництва електроенергії, r_j – набір технологічних обмежень. $S_k(P_{\text{Sch}}^{\text{min}}, P_{\text{Sch}}^{\text{max}}, P_{\text{SDCh}}^{\text{min}}, P_{\text{SDCh}}^{\text{max}}, C_{\text{Ch}}, C_{\text{DCh}}, r)$ – набір накопичувачів, для кожного з яких: $P_{\text{Sch}}^{\text{min}}, P_{\text{Sch}}^{\text{max}}, P_{\text{SDCh}}^{\text{min}}, P_{\text{SDCh}}^{\text{max}}$ – мінімальна і максимальна потужність в режимах заряду (Ch) і розряду (DCh), $C_{\text{Ch}}, C_{\text{DCh}}$ – середньозважена вартість використання в режимах заряду та розряду, r_k – технологічні обмеження. I, E – аналогічні параметри, що характеризують імпорт та експорт електроенергії. D_T – профіль навантаження на горизонті моделювання T .

Умова покриття графіка навантаження на кроці t :

$$P_t^{\text{NPP}} + P_t^{\text{CHP}} + P_t^{\text{PV}} + P_t^{\text{WIND}} + P_t^{\text{TPP}} + P_t^{\text{HPP}} + P_t^{\text{HPSS-G}} - P_t^{\text{HPSSp}} + Z_t^{\text{I}} - Z_t^{\text{E}} = D_t; \quad \forall t \in T.$$

Тобто в покритті графіка навантаження бере участь: сукупна потужність генерації наступних технологій: P_t^{NPP} – АЕС, P_t^{CHP} – ТЕЦ, P_t^{TEC} – ТЕС, P_t^{HPP} – ГЕС, P_t^{PV} – СЕС, P_t^{WIND} – ВЕС, P_t^{HPSS-G} – ГАЕС; сукупна потужність споживання ГАЕС – P_t^{HPSS-P} ; сукупна потужність імпорту – Z_t^I та експорту – Z_t^E . Сумарна середньозважена вартість виробництва електроенергії ОЕС України C^Σ розраховується за такою формулою:

$$C^\Sigma = \sum_t \left(C_{NPP} P_t^{NPP} + C_{TEC} P_t^{TEC} + C_{PV} P_t^{PV} + C_{WIND} P_t^{WIND} + C_{TPP} P_t^{TPP} + C_{HPP} P_t^{HPP} + C_{HPSS-G} P_t^{HPSS-G} + C_{HPSS-P} P_t^{HPSS-P} + C_I Z_t^I - C_E Z_t^E \right).$$

При розрахунках потенціалу оптимізованої середньозваженої вартості виробництва електроенергії в ОЕС України $C^{\Sigma-O}$ використано цільову функцію, яка забезпечує мінімальну сумарну середньозважену вартість:

$$C^{\Sigma-O} = \sum_t \left(C_{NPP} P_t^{NPP-O} + C_{TEC} P_t^{TEC-O} + C_{PV} P_t^{PV} + C_{WIND} P_t^{WIND} + C_{TPP} P_t^{TPP-O} + C_{HPP} P_t^{HPP-O} + C_{HPSS-G} P_t^{HPSS-G-O} + C_{HPSS-P} P_t^{HPSS-P-O} + C_I Z_t^{I-O} - C_E Z_t^{E-O} \right) \Rightarrow \min.$$

Також, враховано технологічні обмеження.

В третьому розділі надано опис нового розробленого автором програмно-інформаційного комплексу (ПІК) для моделювання як інтегрованих багато вузлових, так і автономних систем електро та теплостачання. Таблиця 2 містить головні відмінності програмно-інформаційного комплексу, що запропонований в даному дослідженні, від найбільш відомих в Україні програмно-інформаційних засобів моделювання енергосистем.

Таблиця 2 – головні відмінності ПІК, від найбільш відомих в Україні програмно-інформаційних засобів моделювання енергосистем.

| ПАРАМЕТР | ІЗЕ НАН України | PLEXOS | ANTARES SIMULATOR | FLEX TOOL |
|---|-----------------|--------|-------------------|-----------|
| Обмеження Експорту/Імпорту за добу, МВт·год | + | + | + | + |
| Обмеження Експорту/Імпорту за годину, МВт·год | + | + | +/- | + |
| Врахування ціни Експорту/Імпорту електроенергії для кожної доби, USD/МВт·год | + | + | + | + |
| Адекватне моделювання гідроагрегатів ГАЕС, енергоблоків ТЕС та АЕС України | + | - | - | - |
| Моделювання ВЕС та СЕС | + | + | + | + |
| Моделювання акумуляторних батарей | + | + | + | + |
| Моделювання ГЕС (мінімальний водопропуск, обмеження можливості зміни потужності та виробництва за добу) | + | + | + | - |
| Моделювання багатовузлової енергосистеми | + | + | + | + |
| Можливість порівняння декількох моделей | + | - | - | +/- |
| Можливість порівняння результатів оптимізації на окремих етапах життєвого циклу | + | - | - | - |

Структура програмно-інформаційного комплексу представлена на рис. 7.

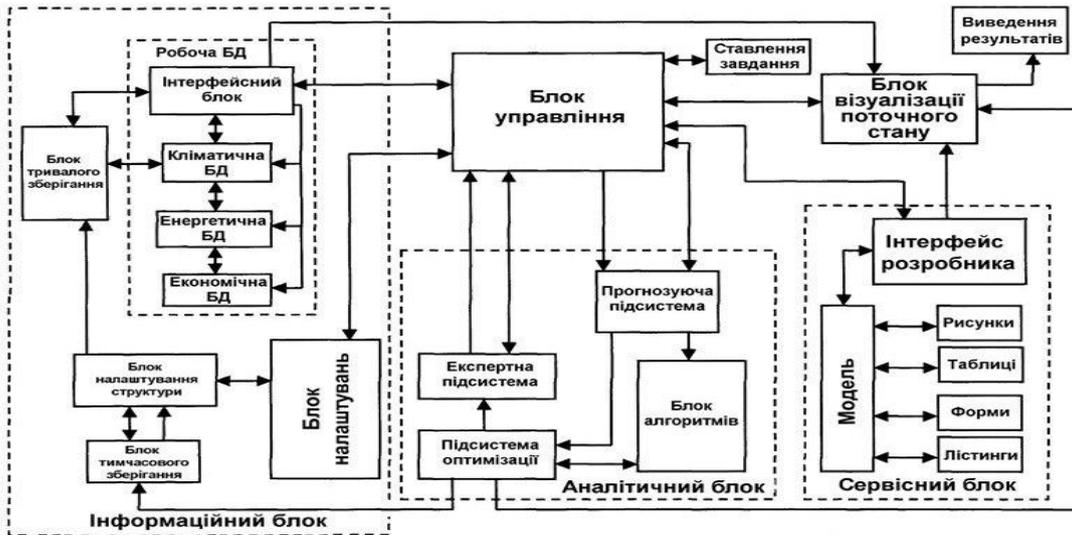


Рисунок 7 – Структура програмно-інформаційного комплексу

ПК включає взаємодіючі: сервісний блок, блок управління, інформаційний та аналітичний блоки. Інформаційний блок дозволяє інтеграцію необхідних, наприклад енергетичної, економічної та кліматичної баз даних. Блок управління забезпечує взаємодію з експертною підсистемою та підсистемою оптимізації використовуючи блок алгоритмів, де і реалізовані ключові алгоритми впроваджених моделей. Склад і структура використання математичних моделей вбудованих до програмно-інформаційного комплексу представлена на рис. 8.

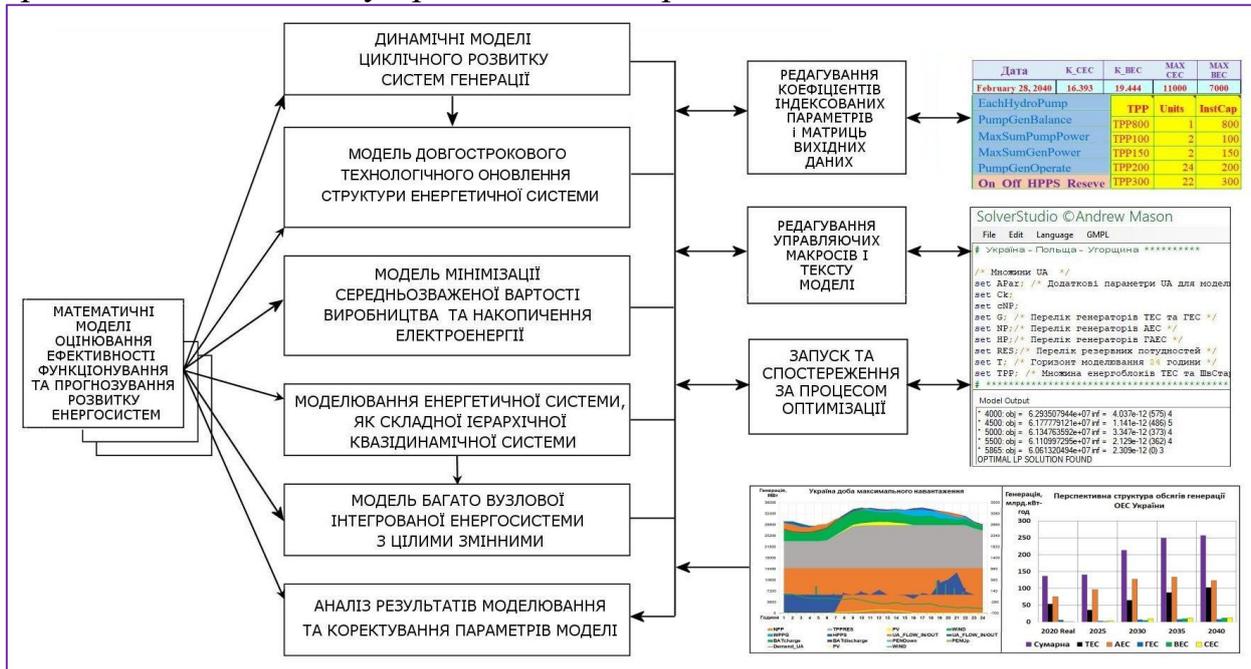


Рисунок 8 – Склад і структура використання математичних моделей вбудованих до програмно-інформаційного комплексу

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.

Дослідження моделі багато вузлової інтегрованої енергосистеми.

Модель реалізовано на мові алгебраїчного моделювання GMP на платформі SolverStudio. Лістинг моделі має 1579 рядків, а файл параметрів моделі 1080 строк. З урахуванням фактичної погодинної потужності складових вітрових електростанцій (ВЕС) та сонячних електростанцій (СЕС) енергосистем України, Польщі, Угорщини та Румунії, використавши фактичні значення встановленої потужності та графіків навантажень одержані результати оптимізаційних розрахунків (Таблиця 3).

Таблиця 3 – Результуючий оптимізований енергетичний баланс багато вузлової інтегрованої енергосистеми (ТВт•год)

| Країна | Навантаження | Обсяги генерації диспетчеризованих технологій | Імпорт | Експорт | Необхідний забезпечений резерв |
|----------|--------------|---|--------|---------|--------------------------------|
| Україна | 55 916 | 51 335 | 4 580 | 0 | 3 129 |
| Польща | 60 672 | 61 579 | 1 002 | 1 909 | 3 129 |
| Угорщина | 15 154 | 18 936 | 621 | 4 404 | 3 129 |
| Румунія | 21 383 | 21 290 | 465 | 372 | 3 129 |

Результати розрахунків прогнозного результуючого оптимізованого енергетичного балансу в режимі синхронної роботи енергосистем України, Польщі, Угорщини для характерних діб максимального навантаження ОЕС України 20 грудня 2040 року і балансу транскордонних перетоків на цю добу представлено на рисунку 9.

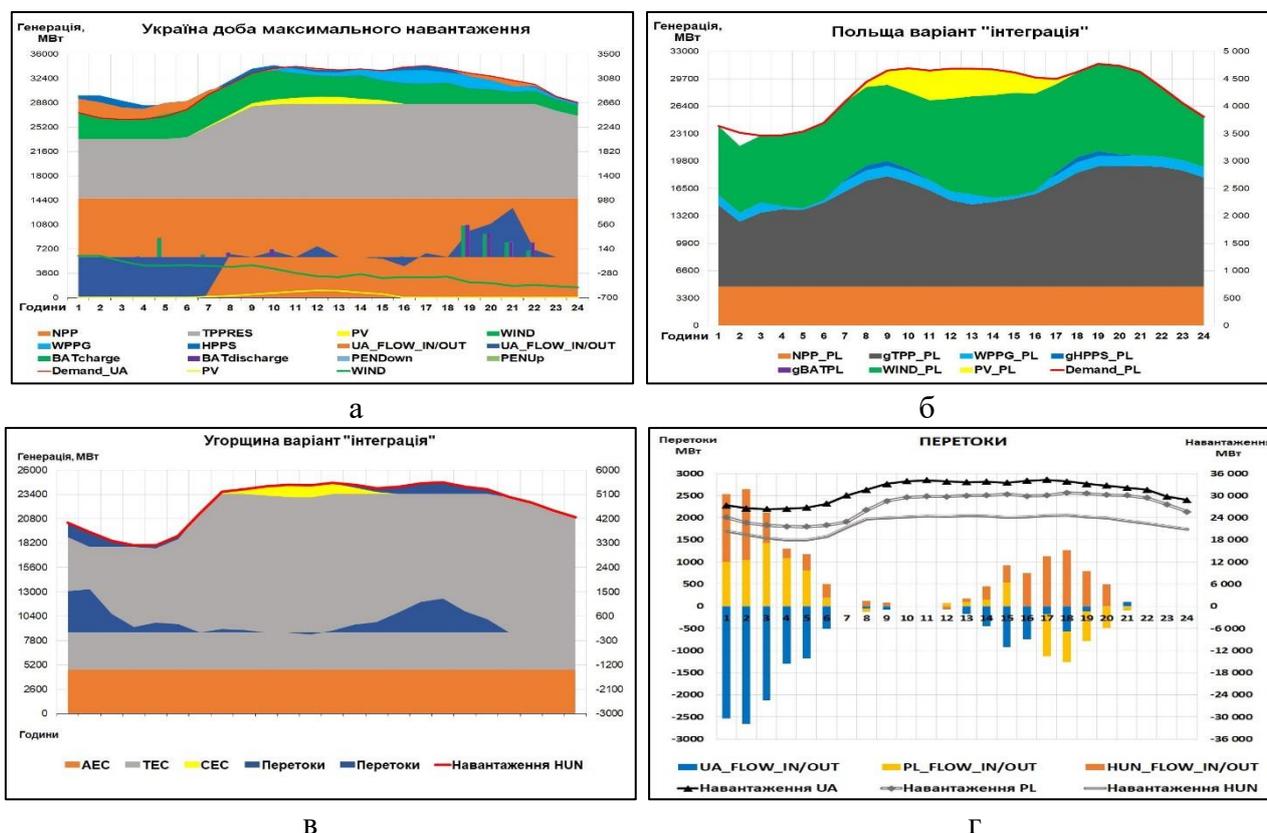


Рисунок 9 – Результати прогнозних розрахунків енергетичних балансів країн та балансу транскордонних перетоків

а – енергетичний баланс України; б – енергетичний баланс Польщі;

в – енергетичний баланс Угорщини; г – баланс транскордонних перетоків.

Отримані результати засвідчують перспективність застосування моделі при формуванні прогнозних балансів та сценаріїв коротко- та довгострокового розвитку

енергосистем України та енергосистем суміжних країн, які входять до складу ENTSO-E, що є актуальним в умовах інтеграції цих енергосистем.

Дослідження за допомогою математичної моделі мінімізації середньозваженої вартості виробництва електроенергії. Порівняння вихідного та оптимізованого балансів ОЕС України на горизонті моделювання $T = 100$ годин (~ 4 характерні доби) 2018 року наведено на рис. 10.

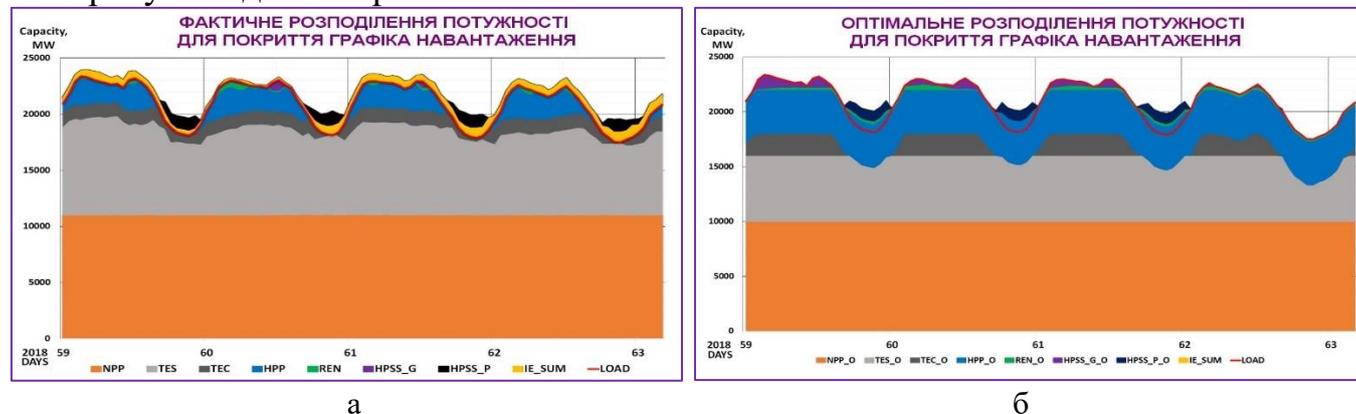


Рисунок 10 – Порівняння вихідного та оптимізованого балансів ОЕС України
а – вихідний баланс; б – оптимізований баланс.

Результати оптимізаційних розрахунків: абсолютна Δ_T^Σ та відносна Ψ_T^Σ різниці між фактичною та оптимізованою середньозваженою вартістю розраховані за формулами:

$\Delta_T^\Sigma = C^\Sigma - C^{\Sigma,0}$, $\Psi_T^\Sigma = \frac{\Delta_T^\Sigma}{C^\Sigma}$, і дорівнюють на горизонті моделювання $T = 100$ годин (~ 4 характерні доби) 2018 року: $\Delta_T^\Sigma = 120\,187\,378$ гривень, що становить $\Psi_T^\Sigma = 38.97\%$.

Відносна різниця $\Psi_{T=1\text{ year}}^\Sigma$ середньозваженої вартості та оптимізованої середньозваженої вартості на горизонті моделювання 1 рік (8760 годин) змінюється від мінімального значення 1,43% до максимального значення 66,8%; середнє значення становить 25,44%. Погодинний розподіл абсолютних δ_t і відносних ψ_t різниць фактичної та оптимізованої середньозваженої вартості представлено на рис. 11.



Рисунок 11 – Погодинний розподіл абсолютних δ_t і відносних ψ_t різниць фактичної та оптимізованої середньозваженої вартості.

Отримані числові оцінки потенціалу оптимізації режимів роботи складових ОЕС України. В оптимізованому режимі знижується вартість виробленої електроенергії. Завдяки вирівнюванню графіків роботи енергоблоків послаблюються вимоги до режимів маневрування та покращуються експлуатаційно-технологічні характеристики. Зменшується ймовірність необхідності і збільшується час між аварійним і плановим ремонтом. Модель може бути основою для подальшого розвитку сімейства моделей оптимізації структури ОЕС України.

Дослідження моделі довгострокового технологічного оновлення складових енергетичних систем. Розраховані прогнози структури споживання та генерації електроенергії ОЕС України до 2040 року. Порівняння результатів цих розрахунків з прогнозами світових агенцій представлено на рис.12.

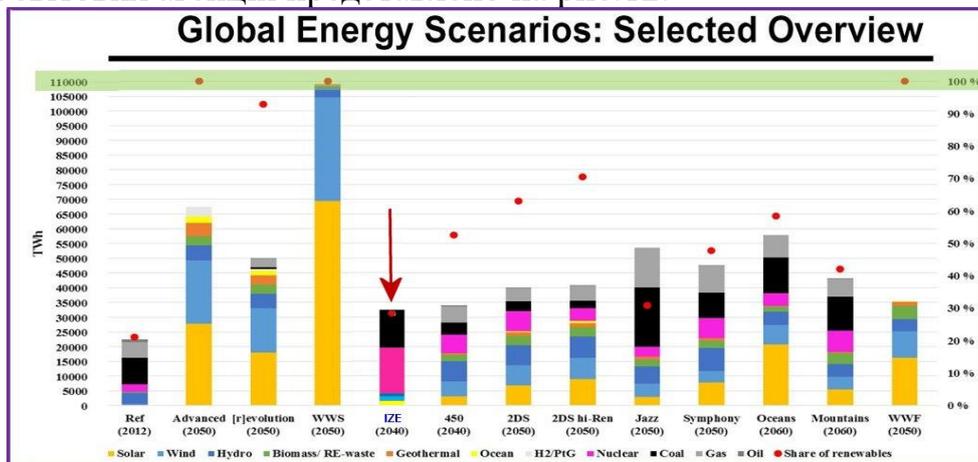


Рисунок 12 – Порівняння прогнозних параметрів розвитку технологічних складових ОЕС України до 2040 року з прогнозами з світових агенцій.

Проведені розрахунки і порівняння підтверджують адекватність запропонованої моделі, перспективність застосування даного підходу та подальшого розвитку моделі для досягнення необхідних рівнів деталізації прогнозних сценаріїв розвитку енергосистеми України.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить 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.

Висновки, що узагальнюють отримані наукові та практичні результати, полягають у наступному.

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. Метод використано при розрахунку песимістичного, референтного та оптимістичного сценаріїв структури споживання та генерації електроенергії ОЕС України до 2040.

2. Розроблено і досліджено математичну модель дифузії нових технологій в енергетиці, яка є узагальненням математичної моделі Френка Басса і, на відміну від неї, включає функціонал економіко-технологічного впливу, що дає можливість враховувати стохастичність економічних та технологічних параметрів та прогнозувати розвиток інтегрованих систем енергетики. За допомогою цієї моделі розраховані сценарії розвитку СЕС в Україні та Німеччині до 2050 року.

3. Розроблено і досліджено модель енергетичної системи, як складної ієрархічної квазідинамічної системи, яка є узагальненням класичної постановки задачі управління динамічною системою. Розроблена модель, на відміну від

класичної, дозволяє враховувати множини стохастичних параметрів стану, керуючих впливів, випадкових збурень і допускає пошук вибору найкращого рішення серед множини допустимих. На основі цієї моделі розроблені модель багатовузлової інтегрованої енергосистеми та модель мінімізації середньозваженої вартості виробництва електроенергії.

4. Розроблено і досліджено модель багатовузлової інтегрованої енергосистеми з цілими змінними, яка, на відміну від існуючих, враховує особливості роботи генеруючих, резервних та акумулюючих потужностей енергосистем України та сусідніх країн-учасниць ENTSO-E, а саме встановлені потужності складових енергосистем, максимальні можливості зміни потужності накопичення та генерації електроенергії, завдяки чому має переваги адекватного моделювання оптимізованих режимів використання гідроагрегатів гідроакumuлюючих електростанцій (ГАЕС) та енергоблоків теплових електростанцій (ТЕС). Впровадження цієї моделі до програмно-інформаційного комплексу дозволило 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.

5. Модель мінімізації середньозваженої вартості виробництва електроенергії за традиційними, ВДЕ та технологіями накопичення електроенергії дозволила 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. За результатами оптимізаційних розрахунків: абсолютна різниця між фактичною та оптимізованою середньозваженою вартістю на горизонті моделювання 100 годин (~ 4 характерні доби) 2018 року дорівнює ~ 120 млн гривень, що становить 38,97%. Відносна різниця середньозваженої вартості та оптимізованої середньозваженої вартості на горизонті моделювання 1 рік (8760 годин) змінюється від мінімального значення 1,43% до максимального значення 66,8%; середнє значення становить 25,44%.

6. Розроблено модель довгострокового технологічного оновлення складових енергетичних систем, використання якої дозволило отримати числові оцінки потенціалу вдосконалення компонентів енергосистеми, враховувати вплив економіко-технологічних показників розвитку національної економіки та виробництва у вигляді квазідинамічних функцій із дискретними стохастичними змінними, розширити інструменти та можливості якісного прогнозування. За допомогою цієї моделі розраховано песимістичний, референтний та оптимістичний сценарії структури споживання та генерації електроенергії ОЕС України до 2040 року. Порівняння розрахованої структури постачання ОЕС України із численними сценаріями структури світового енергопостачання від різних дослідників дозволило зробити висновок про достатній збіг порівнюваних сценаріїв, що підтверджує адекватність запропонованої моделі та можливість використання її для розробки сценаріїв розвитку та оновлення систем енергетики.

7. Розроблено проблемно-орієнтований програмно-інформаційний комплекс, що містить програмні модулі числової реалізації математичних моделей оптимізації режимів функціонування автономних і інтегрованих енергетичних систем. Використання комплексу дозволило одержати оцінку потенціалу оптимізації середньозваженої вартості електроенергії ОЕС України, та, на основі прогнозних добових графіків навантаження, вирішити задачу прогнозування вибору оптимальних

режимів використання генеруючої та накопичувальної потужностей системи, що забезпечують погодинну мінімізацію вартості виробленої електроенергії.

8. Подальше використання результатів дисертаційної роботи пропонується здійснювати шляхом розробки спеціалізованих програмних продуктів та їх впровадження на різних рівнях державного і регіонального управління системами електро- і теплопостачання, а також на підприємствах енергетичної галузі.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Babak, V., Denysov, V. Software and information simulation complex of multi-node integrated and autonomous power and heat supply systems. *System research in energy*. № 3 (74), 2023, с. 50-63. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.050>.

2. Denysov, V. Efficiency of The Renewable Energy Sources Application for an Autonomous Heat Supply System. *System Research in Energy*, № 1 (72), 2023, с. 80-87. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.01.080>.

3. Denysov V., Zaporozhets A., Nechaieva T., Shulzhenko S., Derii V. Improving the model of long-term technological update of power system components. *System Research in Energy*, № 2 (73), 2023, с. 30-37. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.030>.

4. Денисов В.А. Ефективність застосування відновлювальних джерел енергії для автономної системи теплопостачання. *Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал*, № 2 (72), 2023, с. 60–65. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2023.279649>.

5. Denysov, V. Optimal vector of generating and accumulation capacities modeling at a subset of available discrete technological solutions for load following regimes. *Monografia pokonferencyjna. Science, research, development #11. Technics and technology. Rotterdam (The Netherlands) 29.11.2018 - 30.11.2018. Diamond trading tour © Warszawa 2018*, с. 45-47. ISBN: 978-83-66030-66-4.

6. Denysov, V. Integrated Power System multi-node model, taking into account the nondispatchable of renewable energy sources. *2022 IEEE 8th international conference on energy smart systems IEEE ESS-2022*. pp. 175-179. <https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969255>.

7. Denysov, V. Software and information complex for district heat supply systems modeling. *System research in energy*. № 1(70), 2022, с. 38—45. <https://doi.org/10.15407/srenergy2022.01.038>.

8. Денисов В.А. Оцінка параметрів оптимізованого покриття графіків навантажень в режимах синхронної роботи енергосистем України та Польщі для критичних діб на прикладі фактичних значень встановленої потужності та графіків навантаження. *Проблеми загальної енергетики*, № 1-2 (68-69), 2022, с. 50-57. <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.050>.

9. Денисов В.А., Чуприна Л.В., Технологічні умови паралельної роботи ОЕС України з суміжними країнами, приєднаними до ENTSO-E. *Проблеми загальної енергетики*, № 3 (66), 2021, с. 53-62. <https://doi.org/10.15407/pge2021.03.053>.

10. Derii V., Teslenko O., Lenchevsky E., Denisov V., Maistrenko N. Prospects and Energy-Economic Indicators of Heat Energy Production Through Direct Use of Electricity from Renewable Sources in Modern Heat Generators. *Systems, Decision and Control in Energy IV*, 2023, vol 454, pp. 451–463. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_27.

11. Денисов В.А. Визначення оптимальних режимів функціонування енергосистеми України при покритті добового графіка електричних навантажень, забезпеченні необхідних обсягів резервування та використанні накопичуючих потужностей. *Проблеми загальної енергетики*, № 4 (63) 2020, с. 33-44. <https://doi.org/10.15407/pge2020.04.033>.

12. Denysov, V. Electricity prime cost optimization potential assessment of the Ukrainian integrated power system taking into account technological limitations. *Herald pedagogiki. Nauka i Praktyka*, numer: 54 (04/2020), pp. 6-11. *Diamond trading tour © Warszawa–2020*. ISSN: 2450-8160, nr.indeksu: 19464.

13. Denysov, V. The phased optimization concept of models for assessing and forecasting the structure and modes of use of energy complexes. *Monografia pokonferencyjna*.

Science, research, development #19. Berlin 30.08.2019- 31.08.2019. Diamond trading tour © Warszawa 2019, с. 17-19. ISBN: 978-83-66401-13-6.

14. Denysov, V. Assessment and forecasting of the optimal modes of technological energy complexes using matrices of parameters. Monografia pokonferencyjna. Science, research, development #16. Technics and technology. Barcelona 29.04.2019- 30.04.2019. Diamond trading tour © Warszawa 2019, с. 84-88. ISBN: 978-83-66030-96-1.

15. Denysov, V., Denisov, S. The optimal modes prediction of quasi dynamic energy systems. Monografia pokonferencyjna. Science, research, development #14. Technics and technology. London 27.02.2019 - 28.02.2019. Diamond trading tour © Warszawa 2019, с. 26-29. ISBN: 978-83-66030-84-8.

16. Денисов В.А., Іваненко Н.П. Моделювання та порівняльна оцінка собівартості електроенергії генеруючих та накопичувальних технологій. Проблеми загальної енергетики, № 4(55), 2018, с. 36-40. <https://doi.org/10.15407/pge2018.04.036>.

17. Денисов В.А., Динамічні моделі циклічного розвитку систем фотоелектричної генерації. Відновлювана енергетика. № 1 (48), 2017, с. 36-43. <https://ve.org.ua/index.php/journal/issue/download/5/1-48-2017-pdf>. ISSN 1819-8058.

18. Денисов В.А. Визначення доцільних обсягів використання енергозберігаючих технологій в житлово-комунальному господарстві. Проблеми загальної енергетики, № 2 (29), 2012, с. 41-50. ISSN 1562-8965.

19. Денисов В.А., Іваненко Н.П., Чуприна Л.В. Оцінки собівартості та можливих обсягів виробництва електроенергії сонячними електростанціями в Україні. Проблеми загальної енергетики, № 3 (30), 2012, с. 45-52. ISSN 1562-8965.

20. Денисов В.А. Ієрархічна модель оптимізації екологічних параметрів житлово-комунального господарства. Проблеми загальної енергетики, № 4 (27), 2011, с. 35-38. ISSN 1562-8965.

АНОТАЦІЯ

Денисов В.А. Моделі та засоби оптимізації структури об'єднаної енергосистеми із використанням відновлюваних джерел генерації – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси – Інститут загальної енергетики НАН України, Київ, 2023.

Дисертаційну роботу присвячено розробленню нових і вдосконаленню існуючих математичних моделей та програмних засобів для оптимізації складу та режимів функціонування генеруючих, резервних та акумулюючих потужностей енергосистем в умовах швидкого зростання потужностей ВДЕ у світі та в Україні.

Запропоновано і досліджено: новий метод економіко-технологічного прогнозування параметрів оптимального функціонування та розвитку енергетичної системи, економіко-математичну модель дифузії нових технологій в енергетиці, яка є узагальненням математичної моделі Френка Басса; модель енергетичної системи, як складної ієрархічної квазідинамічної системи, яка є узагальненням класичної постановки задачі управління динамічною системою; модель багатовузлової інтегрованої енергосистеми з цілими змінними, яка, на відміну від існуючих, враховує особливості роботи генеруючих, резервних та акумулюючих потужностей енергосистем України та сусідніх країн-учасниць ENTSO-E; модель довгострокового технологічного оновлення складових енергетичних систем, яка дозволила отримати числові оцінки потенціалу вдосконалення компонентів енергосистеми, враховувати вплив економіко-технологічних показників розвитку національної економіки та виробництва у вигляді квазідинамічних функцій із дискретними стохастичними змінними, розширити інструменти та можливості якісного прогнозування.

Розроблено проблемно-орієнтований програмно-інформаційний комплекс, використання якого дозволило одержати оцінку потенціалу оптимізації середньозваженої вартості електроенергії ОЕС України, та вирішити задачу

прогнозування вибору оптимальних режимів використання генеруючої та накопичувальної потужностей системи.

Ключові слова: *метод економіко-технологічного прогнозування, математична модель, дифузія нових технологій в енергетиці, багатовузлова інтегрована енергосистема, проблемно-орієнтований програмно-інформаційний комплекс.*

ABSTRACT

Denysov V.A. Models and means of optimizing the structure of the combined energy system using renewable sources of generation. – As the manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of Candidate of Technical Sciences on a specialty 05.14.01 – Energy systems and complexes – General Energy Institute of NAS of Ukraine, Kyiv, 2023.

Thesis devoted to the development of new and improvement of existing mathematical models and software tools for optimizing the composition and operation modes of generating, reserve and storage capacities of power systems in the conditions of rapid growth of renewable energy sources (RES) capacities in the world and in Ukraine.

Proposed and researched: a new method of economic and technological forecasting of the parameters of optimal functioning and development of the energy system, a mathematical model of the diffusion of new technologies in energy, which is a generalization of the Frank Bass mathematical model; the energy system model as a complex hierarchical quasi-dynamic system, which is a generalization of the classical statement for the dynamic system managing problem; model of a multi-node integrated energy system with integer variables, which, unlike the existing ones, takes into account the peculiarities of the generating, reserve and storage capacities of the energy systems of Ukraine and neighboring ENTSO-E countries; model of long-term technological renewal of energy system components, which made it possible to obtain numerical estimates of the improvement potential of energy system components, to take into account the influence of economic and technological indicators of the development of the national economy and production in the form of quasi-dynamic functions with discrete stochastic variables, to expand the tools and possibilities of qualitative forecasting.

Problem-oriented software and information complex was developed, the use of which made it possible to obtain an estimate of the optimization potential of the weighted average cost of electricity of the integrated power system (IPS) of Ukraine, and to solve the problem of forecasting the choice of optimal modes of use of generating and storage capacities of the system.

Keywords: *method of economic and technological forecasting, mathematical model, diffusion of new technologies in energy, multi-nodal integrated energy system, problem-oriented software and information complex.*