

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ДНІПРОВСЬКА
ПОЛІТЕХНІКА»**

КАРПЕНКО ОЛЕГ ВІКТОРОВИЧ



УДК 681.533.5

**СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ З
СИСТЕМОЮ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА
ОСНОВІ ПРОГНОСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Ткачов Віктор Васильович,
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
Міністерства освіти і науки України
професор кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Осадчий Сергій Іванович,
Льотна академія Національного авіаційного університету Міністерства освіти і науки України,
в.о. зав. кафедри безпеки польотів та льотної експлуатації;

доктор технічних наук, професор
Купін Андрій Іванович,
Криворізький національний університет
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж.

Захист відбудеться «26» грудня 2024 р. о 13.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д08.080.07 у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» за адресом: 49005, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19. тел. +38-056-744-73-39

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» за адресом: 49005, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19.

Автореферат розісланий «22» грудня 2024 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07,
кандидат технічних наук, доцент

Ірина УДОВИК

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Будучи об'єктом купівлі/продажу на енергетичному ринку, фотоелектрична енергія має бути передбачуваною щодо обсягів її вироблення. Точність такого прогнозу обумовлена необхідністю підтримки стабільної роботи енергосистеми та балансування енергоринку згідно його правилам. У ряді країн, у тому числі і в Україні, енергоринок вимагає від виробників фотоелектричної енергії погодинні прогнози на добу наперед, накладаючи штрафи за небаланс між прогнозованою та фактично виробленою електроенергією. Величина такого штрафу для деяких сонячних електростанцій досягає 10% і більше вартості виробленої електроенергії. При цьому вироблення електроенергії фотоелектричними станціями безпосередньо пов'язане із змінами погоди, які повинні враховуватися прогностичною моделлю, залежить від часу доби і схильна до суттєвих сезонних змін. Такий нерівномірний, залежний від випадкових обставин режим роботи відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) негативно впливає на роботу енергосистеми і тому потребує додаткового регулювання. Цю функцію реалізує у складі диспетчерської системи Національної енергетичної компанії (НЕК) Укренерго система керування обмеженнями (СКО). Ця система видає команди генеруючим одиницям на обмеження виробітку електроенергії. Вибір об'єктів, рівнів та часу обмежень на рівні диспетчера НЕК Укренерго здійснюється з урахуванням прогнозів виробітку електроенергії всіма електростанціями (в тому числі - фотоелектричними). З іншого боку, на локальній фотоелектричній станції (ФЕС) прогноз виробітку електроенергії враховується оператором станції при керуванні її режимами роботи. Таким чином, система прогнозування виробітку електроенергії ФЕС являє собою підсистему інтелектуальної підтримки прийняття рішень на всіх рівнях системи управління процесами перетворення сонячної енергії.

Впровадження прогностичних систем, які забезпечують інтелектуальну підтримку прийняття рішень, є першочерговим за пріоритетністю технічним заходом для всіх об'єктів виробництва і споживання енергії, який стимулює впровадження всіх інших енергоефективних заходів. Недостатній рівень розробки теоретико – методологічних підходів та практичних аспектів побудови систем моніторингу, прогнозування та аналізу енергетичних процесів вказує на те, що проведення досліджень у цьому напрямі являється актуальною науковою задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана відповідно до енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність конкурентоспроможність», затвердженої розпорядженням Кабінету міністрів України від 18 серпня 2017 року № 605-р.

Дисертаційна робота направлена на виконання Постанови Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), від 26 квітня 2019 року № 641, п. 9.3, 9.4 про порядок купівлі Гарантованим покупцем електричної енергії, виробленої з альтернативних джерел енергії з урахуванням прогнозів виробітку електроенергії "на добу наперед" згідно

Правилам ринку "на добу наперед" (РДН) та внутрішньодобового ринку (ВДР), затверджених постановою НКРЕКП від 14 березня 2018 року № 308.

Результати роботи одержали втілення у системах корпорації «Облік» для прогнозування виробітку електроенергії "на добу наперед" згідно Правилам ринку "на добу наперед" на мережевих ФЕС, розташованих у різних регіонах України.

Мета і завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності системи керування процесом фотогальванічного перетворення сонячної енергії шляхом підвищення точності прогнозування виробітку електроенергії "на добу наперед" за рахунок зменшення залежності цих прогнозів від похибок метеорологічних прогнозів погоди, а також підвищення оперативності системи підтримки прийняття рішень шляхом розробки та побудови системи прогностичного моніторингу процесів виробітку фотоелектричної енергії.

Визначена мета роботи обумовила необхідність розв'язання наступних завдань:

- розробити математичну модель фотогальванічного перетворювача як об'єкта автоматичного прогнозування з самонавчанням на основі аналітичних та статистичних методів врахування впливу метеорологічних факторів на рівень виробітку фотоелектричної енергії;

- розробити та дослідити методи зменшення залежності прогнозів виробітку фотоелектричної енергії від похибок метеорологічних прогнозів погоди;

- розробити та дослідити алгоритм і програму прогностичного моніторингу процесів фотогальванічного перетворення сонячної енергії;

- розробити та дослідити у реальних умовах експериментальні системи прогностичного моніторингу процесів виробітку фотоелектричної енергії;

- виконати порівняльні експериментальні випробування різних методів прогнозування, що можуть бути реалізовані на базі розробленої прогностичної моделі;

- розробити типову структуру системи прогностичного моніторингу процесів виробітку фотоелектричної енергії для втілення на діючих фотоелектричних станціях;

- провести аналіз результатів дослідної експлуатації діючих у реальних умовах систем прогностичного моніторингу, що забезпечують інтелектуальну підтримку прийняття рішень відносно управління режимами фотогальванічного перетворення сонячної енергії та процесами її купівлі/продажу на РДН.

Ідея роботи полягає у отриманні в аналітичному вигляді функцій впливу метеорологічних факторів для зменшення негативного впливу метеорологічних похибок у навчальній послідовності прогностичної моделі на результат прогнозування за рахунок введення режиму рефлексивного навчання шляхом охоплення моделі зворотнім зв'язком і використання для прогнозування множини методів, поєднаних у ансамбль. Режим рефлексивного навчання передбачає використання фотогальванічних панелей у якості датчиків зворотного зв'язку для

корекції метеорологічних похибок у навчальній послідовності прогностичної моделі.

Об'єктом дослідження є процес автоматичного прогнозування та моніторингу електричної енергії фотоелектричною станцією.

Предметом дослідження є математичні моделі та методи автоматичного прогнозування щогодинного виробітку «на добу наперед» електричної енергії фотоелектричною станцією, у зв'язку з проблемою зменшення негативного впливу метеорологічних похибок у навчальній послідовності моделі на точність прогнозів.

Методи дослідження. Дослідження рівнів інсоляції фотогальванічних панелей у залежності від часу дня та сезону виконувались з використанням математичних методів та анізотропних моделей Хей-Девіса, Рейндла та Ключера, які дають потік розсіяного випромінювання на поверхню панелі з урахуванням її азимуту та ухилу. Дослідження, пов'язані з побудовою поліноміальної прогностичної моделі, яка враховує вплив метеорологічних факторів, виконувались з використанням методу найменших квадратів та псевдо інверсної теорії Мура – Пенроуза. Експериментальні дослідження виконувались на діючих фотоелектричних станціях з використанням методів математичної статистики та кореляційного аналізу.

Теоретичні та експериментальні дослідження виконувались з використанням ліцензованих програмних продуктів: Microsoft Office 365, MATLAB Online, Java Development Kit, Netbeans IDE.

Наукові положення, що виносяться на захист:

1. Функція впливу вхідних метеорологічних факторів на рівень щогодинного виробітку електроенергії визначається у вигляді добутку часткових функцій впливу кожного з врахованих факторів, чим забезпечується можливість побудови поліноміальної прогностичної моделі як малої так і високої розмірності, що дає можливість отримати у аналітичному вигляді залежність рівня виробітку фотоелектричної енергії від факторів що впливають.

2. Корекція хибних вхідних метеорологічних даних здійснюється шляхом цілеспрямованої децимації навчальної послідовності у поєднанні з рефлексивним навчанням прогностичної моделі, і відрізняється від відомих методів корекції використанням фотогальванічних панелей у якості датчиків зворотного зв'язку для виправлення метеорологічних похибок у навчальній послідовності прогностичної моделі, завдяки чому підвищується точність прогнозів.

Наукова новизна одержаних результатів:

вперше:

– розроблено метод синтезу екзогенної прогностичної моделі процесу фотогальванічного перетворення сонячної енергії у вигляді ансамблю поліноміальних факторизованих моделей з використанням методу найменших квадратів та псевдоінверсної теорії Мура-Пенроуза, що дозволяє підвищити точність прогнозу;

– одержані у аналітичному вигляді часткові функції впливу метеорологічних факторів на рівень виробітку фотогальванічної енергії, які за результатами синтезу поліноміальної прогностичної моделі вказують на те, що при зміні ступеню

прогностичного поліному зберігається загальна тенденція часткових впливів, серед яких найбільш впливовими являються рівень хмарності та вологості;

– розроблено метод рефлексивного навчання поліноміальної прогностичної моделі процесу фотогальванічного перетворення сонячної енергії, що забезпечує зменшення негативного впливу похибок у навчальній послідовності прогностичної моделі;

– визначено вплив вітру та температури навколишнього середовища на зниження потужності фотогальванічного модуля при досягненні ним надкритичної температури, що дозволило підвищити точність прогностичної моделі.

отримав подальший розвиток:

– метод прогнозування, відомий у посиланнях як метод «к – найближчих сусідів», шляхом включення до евклідової норми, що характеризує близькість станів погодних умов поточної години і відповідної години навчальної послідовності, додаткового параметру, який враховує відхилення ретроспективних прогнозів від фактичних даних, чим досягається зменшення негативного впливу помилок у навчальній послідовності прогностичної моделі.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень та результатів.

Наукові положення, новизна та висновки, що представлені в дисертації, обґрунтовані на основі результатів перевірки точності щогодинного «на добу наперед» прогнозу у робочому режимі з передачею оперативної інформації на платформу Гарантованого покупця та операторам мережі станцій (40 генеруючих одиниць в різних регіонах України), де втілено системи прогностичного моніторингу, що розроблені за участю здобувача. Перевірка здійснювалась на протязі 2023 року шляхом порівняння усередненої похибки розроблених систем з середньою похибкою всієї балансуєчої групи Гарантованого покупця і показала що середня похибка групи розроблених систем не перевершує середньої похибки значно більшої балансуєчої групи Гарантованого покупця, а за вибірковими даними є навіть нижчою більш ніж у 1,2 рази.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Запропоновано структуру та розроблено типовий проект системи прогностичного моніторингу процесів фотоелектричного перетворення сонячної енергії мережевою станцією, що включена до балансуєчої групи Гарантованого покупця з автоматичною регулярною передачею прогнозу інформації на ФЕС, платформу Гарантованого покупця, та НЕК УКРЕНЕРГО.

2. Розроблено уніфіковане програмне забезпечення системи прогностичного моніторингу фотоелектричних станцій.

3. Розроблено структуроутворюючий компонент системи прогностичного моніторингу – модульний мережевий адаптер, який забезпечує можливість створювати на станціях з великою кількістю комунікаційного обладнання розгалужені мережі RS-485 з топологією «зірки».

4. Розроблену згідно отриманих у роботі наукових положень систему прогностичного моніторингу втілено на 40 діючих мережевих фотоелектричних станціях загальною потужністю 56 мВт у Дніпропетровському, Харківському, Миколаївському, Запорізькому та Житомирському регіонах.

5. Точність, розробленої системи інтегрованого моніторингу перевищує точність значної кількості інших систем, які функціонують у складі групи Гарантованого покупця. Використання у програмному забезпеченні прогностичної моделі нових розроблених методів прогнозування дозволяє знизити абсолютну середню помилку прогнозів на 5–7%.

Особистий внесок здобувача.

Дисертація є підсумковим результатом роботи автора. Ним обґрунтовано актуальність теми, виконано аналіз джерел інформації з означеної задачі, у тому числі наукової літератури та ресурсів мережі Internet, сформульовано завдання дослідження. Автором розроблено математичну основу методу синтезу екзогенної прогностичної моделі процесу фотогальванічного перетворення сонячної енергії у вигляді ансамблю поліноміальних факторизованих моделей з використанням методу найменших квадратів та псевдо інверсної теорії Мура – Пенроуза. Проведено аналіз часткових функцій впливу метеорологічних факторів на рівень виробітку фотогальванічної енергії за результатами якого було виявлено, що при зміні ступеню прогностичного поліному зберігається загальна тенденція часткових впливів. При цьому, найбільш впливовими являються рівень хмарності та вологості. Досліджено функціональний зв'язок між значеннями метеорологічних факторів, що впливають, величинами їх похибок та пов'язаних з ними похибками прогнозів. Розроблено математичну процедуру зворотного перетворення функції впливу хмарності на рівень виробітку фотоелектричної енергії для використання її у методі рефлексивного навчання прогностичної моделі. Запропонована та включена до прогнозуючого ансамблю нова модифікація методу прогнозування, відомого в літературі як «Метод k -найближчих сусідів», завдяки якій значно знижується негативний вплив похибок у навчальній послідовності прогностичної моделі. Виконано на імітаційній моделі дослідження впливу вітру та температури навколишнього середовища на зниження потужності фотогальванічного модуля при досягненні ним надкритичної температури. Розроблено уніфіковане програмне забезпечення системи прогностичного моніторингу. Розроблено і експериментально випробувана в промислових умовах принципову схему модульного мережевого адаптеру, як складової частини системи моніторингу.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення та результати роботи доповідались на міжнародних конференціях «Mathematical Modeling and Simulation of Systems» – XVI International Scientific– Practical Conference MODS 2021 (м. Чернігів, Національний університет "Чернігівська політехніка", 28 червня – 01 липня 2021 р) та XVIII MODS 2023 (м. Чернігів, Національний університет "Чернігівська політехніка", 13 – 15 листопада 2023 р.).

Публікації. За результатами наукових досліджень виконаних у дисертаційній роботі опубліковано 7 робіт, з них: 3 статті у фахових виданнях України, 2 статті у періодичних виданнях, які включені до наукометричної бази Scopus, 2 тези доповідей на конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 66 найменувань на 7 сторінках

та 4 додатків на 21 сторінці; містить 38 рисунків і 21 таблиця. Загальний обсяг роботи 147 сторінок, з них 125 – основний текст.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульована мета і завдання досліджень. Наведено відомості про наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, Вказано кількість публікацій за тематикою дисертаційної роботи. Зазначено особистий внесок здобувача

У першому розділі проведено аналіз процесу виробітку електроенергії фотоелектричними станціями, а також здійснено огляд та критичний аналіз основних методів побудови прогностичних моделей цього процесу.

Виявлено, що головним недоліком розглянутих підходів до побудови прогностичних моделей фотогальванічних станцій являється відсутність в них механізму захисту від помилкових ознак метеорологічного стану довкілля у ретроспективних базах даних, які використовуються для машинного навчання моделей. За наявності таких помилкових ознак модель навчається некоректно, що призводить до значних відхилень прогнозу від факту у подальшому, навіть при якісних, безпомилкових метеорологічних прогнозах на прогнозовану годину.

У першому розділі сформульовані мета і завдання дослідження.

Другий розділ присвячено побудові прогностичної моделі згідно запропонованому підходу. В роботі створено аналітичну розрахункову платформу для побудови прогностичних моделей фотогальванічного процесу перетворення сонячної енергії в електричну. На основі запропонованої у роботі гіпотези факторизації функцій впливу метеорологічних факторів, розроблено методику і відповідне програмне забезпечення для побудови поліноміальних моделей будь якої розмірності з використанням для навчання ретроспективної бази даних будь якого об'єму. Обчислення поліноміальних коефіцієнтів моделі за допомогою псевдо-інверсної теорії Мура - Пенроуза надало можливість побудови моделей за умов сінгулярності характеристичної матриці моделі, що має місце при великих об'ємах ретроспективної бази даних. Структурна схема моделі показана на рис. 1.

Модель фотогальванічного процесу являє собою відношення між прогнозованими значеннями вироблення фотоелектричної енергії та одночасними з ними факторами, що впливають, такими як рівень сонячної інсоляції, хмарність, температура, вологість, швидкість вітру, та ін. Ідеальний рівень $S(t)$ сонячної інсоляції (включно з прямою та дифузною компонентами) в умовах «чистого неба» і пропорційна їй кількість електроенергії, що виробляється в цих ідеальних умовах, визначаються детермінованим алгоритмом у функції від моменту часу (година, день, місяць), що характеризує взаємне розташування Сонця, Землі, умовної точки на її поверхні, що вказує місце розташування фотоелектричної станції, яка моделюється, а також у функції кутів, під якими падають сонячні промені на фотоелектричні панелі.

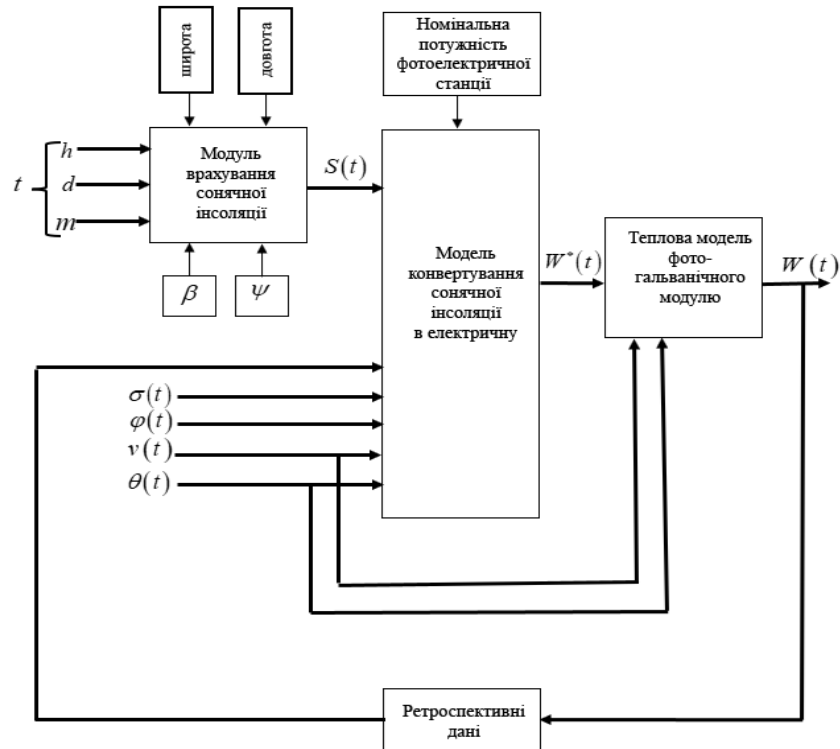


Рисунок 1 – Структурна схема прогностичної моделі фотогальванічної станції

Фактична кількість електроенергії $W_0(t)$, що виробляється фотоелектричною станцією, завжди менша від цього ідеального рівня і залежить від ряду метеорологічних факторів, що впливають. У нашій моделі враховується: рівень хмарності $\sigma(t)$, рівень сонячної інсоляції на кожний кВт, номінальної потужності

станції $\theta(t) = \frac{S(t)}{P_n}$, вологість повітря $\varphi(t)$, швидкість вітру $v(t)$. Ігноруючи

реальну фізичну природу фотоелектричного перетворювача, представимо відношення «вхід - вихід» моделі, яке його формально характеризує, у вигляді:

$$W(t) := S(t) \cdot F(\sigma, \varphi, v, \theta, \dots), \quad (1)$$

де $W(t)$ – прогнозований виробіток електроенергії впродовж годинного інтервалу;

$F(\sigma, \varphi, v, \theta, \dots)$ – функція впливу на фотоелектричне перетворення, яка враховує залежність його ефективності від метеорологічних умов в місці розташування PV – станції.

Залежність функції впливу від її аргументів будемо шукати у вигляді поліному, який мінімізує відхилення прогнозованого виробітку електроенергії від фактичного. Підхід до вирішення цієї задачі спирається на гіпотезу, відповідно якій функція $F(\sigma, \varphi, v, \theta, \dots)$ може бути факторизована та представлена у вигляді добутку часткових функцій впливу:

$$F(\sigma, \varphi, v, \theta, h, d) := f_1(\sigma) \cdot f_2(\varphi) \cdot f_3(v) \cdot f_4(\theta) \cdot f_5(h) \cdot f_6(d), \quad (2)$$

де $f_5(h)$ та $f_6(d)$ зарезервовані часткові функції впливу.

Але при навчанні прогностичної моделі на ретроспективних базах даних великих об'ємів зворотна матриця A^{-1} у великому числі випадків виявляється сингулярною, внаслідок чого система рівнянь (6) стає нерозв'язною, що унеможливорює навчання моделі. Запобігти цій ситуації можливо шляхом використання псевдоінверсної матриці Мура-Пенроуза.

За цим методом отримуємо рішення, які підставляємо у (3), одержуємо часткові функції впливу у явному вигляді. Підставляючи ці функції у рівняння (2), одержуємо загальну функцію $F(\sigma, \varphi, v, \theta, h, d)$ впливу метеорологічних факторів на потік сонячної енергії, під впливом якого виробляється фотоелектрична енергія. У цій моделі функція $F(\sigma, \varphi, v, \theta, h, d)$ відіграє роль оператора, під впливом якого, згідно рівнянню (1), сонячна енергія перетворюється в електричну.

Розглянута вище поліноміальна прогностична модель процесу фотогальванічного перетворення сонячної енергії в електричну забезпечує мінімальне середньоквадратичне відхилення прогнозованого виробітку електроенергії від фактичного тільки за умов відсутності помилок впливових факторів, перш за все метеорологічних, які використовуються при прогностичному моделюванні. При цьому, якщо помилка метеопрогнозу на поточну прогнозовану годину призводить до додаткової похибки прогнозу виробітку електроенергії лише на цю годину, то така саме помилка у ретроспективній базі даних, що використовується для навчання моделі, негативно і значно в більшій мірі впливає на якість прогнозу в цілому. Це вказує на актуальність додаткових заходів, направлених на зменшення залежності результатів навчання прогностичної моделі від помилок метеорологічних прогнозів.

Для зменшення негативної залежності прогнозів виробітку фотоелектричної енергії від помилок метеорологічних прогнозів розроблено метод децимації навчальної послідовності шляхом видалення неправдоподібних даних та метод рефлексивного навчання прогностичної моделі.

За першим методом прогноз, що одержано на стадії навчання, порівнюється з фактичним виробітком енергії у навчальній послідовності. Відхилення прогнозних даних від фактичних упорядковуються і години, яким відповідають найбільші відхилення виключаються з навчальної послідовності як такі що відповідають найбільшим похибкам метеорологічних даних. Після чого виконується повторне навчання моделі.

Ідея методу рефлексивного навчання полягає у наступному. Оскільки виробіток електроенергії фотогальванічною станцією залежить від рівня хмарності в значно більшій мірі ніж від інших факторів, можна у першому наближенні нехтувати всіма цими факторами. З цієї точки зору виробіток електроенергії на розрахунковій годині майже однозначно характеризує фактичний середній рівень хмарності на тій самій годині. Якби нам була відома точна формула залежності виробітку електроенергії від рівня хмарності, можна було б, зробивши необхідні математичні перетворення, одержати зворотну формулу залежності хмарності від фактичного виробітку електроенергії, який точно фіксується системою комерційного обліку. Хоча ми не маємо такої точної формули, але поліноміальна

модель, розглянута вище, дає нам середньостатистичну функцію впливу рівня хмарності на рівень виробітку електроенергії. Конвертуючи цю функцію зворотнім математичним перетворенням можна одержати наближене значення середньої хмарності у розрахункову годину в місці розташування станції і використати одержане значення в якості елемента навчальної послідовності. Така цілеспрямована послідовність зворотних та прямих перетворень в процесі самонавчання відповідає поняттю рефлексивного навчання.

Для одержання виправленою величини рівня хмарності $\sigma^*(t)$ (з використанням у якості сенсорів зворотного зв'язку саме фотоелектричних панелей) виведено формулу

$$\sigma^*(t) = \frac{\ln \frac{W}{W_0} + a_{11}\sigma + a_{12}\sigma^2 + \dots}{a_{11} + \frac{3}{4}a_{12} + \frac{3}{5}a_{13} + \frac{3}{6}a_{14} + \dots}, \quad (8)$$

де $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14} \dots$ поліноміальні коефіцієнти функції впливу хмарності, які обчислено за результатами первинного навчання прогностичної моделі, W - прогнозований виробіток енергії, W_0 - фактичний виробіток енергії.

Одержані за цією формулою дані $\sigma^*(t)$ враховуються при наступному навчанні замість даних метеорологічного прогнозу $\sigma(t)$.

Спираючись на велику низку, проведених на даний час досліджень, можна стверджувати, що найбільш ефективні результати погодинного прогнозу на день наперед досягаються при використанні ансамблевих методів прогнозування. В даній роботі пропонується новий принцип (кумулятивний) побудови прогностичного ансамблю, в якому послідовно збільшується та зменшується кількість моделей, з яких спочатку складається ансамбль. Ці моделі змішуються в ансамблі та з них відбираються найкращі за критерієм мінімальної середньої абсолютної помилки прогнозу. Цей процес продовжується, доки не буде знайдено остаточний прогноз.

Структура кумулятивного ансамблю складається з прогностичних моделей, побудованих за методами, що наведено вище. Базовими являються поліноміальні моделі, які відрізняються показниками ступеню поліному. Одержані ними прогнози порівнюються за величиною середньої абсолютної помилки прогнозу MAE (Mean Absolute Error)

$$MAE = \frac{\sum |W^*(t) - W(t)|}{t}, \quad (9)$$

За результатом порівняння знаходиться модель, яка дає прогноз з мінімальним MAE. Ця модель методами децимації та рефлексивного навчання перетворюється на низку моделей, які здійснюють прогнозування виробітку енергії. Для кожного прогнозу обчислюється відповідна оцінка MAE. На остаточному етапі порівнюються п'ять прогнозів (два останніх, а також три проміжних) і знаходиться найкращий за критерієм $MAE = \min$. Крім того формується нова поліноміальна модель, шляхом усереднення функцій впливу відібраних п'яти моделей.

Структура одержаного прогностичного ансамблю базується виключно на поліноміальній моделі, яка варіюється за рахунок використання різних методів та різних параметрів навчання. При такому обмеженні області пошуку, виявлена у якості остаточної, прогностична модель може опинитися не найкращою. Для подолання цього недоліку, розроблений ансамбль, доповнено прогностичною моделлю, яка реалізує алгоритм прогнозування, принципово відмінний від поліноміального.

Для підвищення точності прогнозів пропонується доповнити ансамбль прогностичних моделей новою моделлю.

В якості базової математичної структури, яка була модифікована в ході вирішення поставленого завдання, було обрано досить популярний метод прогнозування, відомий як «Метод k – найближчих сусідів». Суть методу k –найближчих сусідів у тому, що конкретні метеорологічні умови на годину прогнозу, швидше за все, призведуть до такого вироблення електроенергії яка буде дуже близька до тієї, що була в минулому, коли були схожі погодні умови.

Запропонована ідея модифікації цього методу полягає в тому, щоб відібрані k прогнозів у минулому задовольняли умові близькості не тільки за погодними умовами, а й з урахуванням відхилення фактичного вироблення електроенергії на момент часу $t = t_1 \dots t_k$ від тієї, що прогнозувалася для відповідних k годин на той самий час.

$$d_t^* = d_t + \left(\frac{W_{MMF}^*(t) - W_t}{W_{MMF}^*(t) + W_t} \right)^2, \quad (10)$$

Ця незначна в математичному відношенні модифікація методу « k – найближчих сусідів» кардинально змінює у системному відношенні як процес прогнозування, так і його результати. Перенесення результатів прогнозування по петлі зворотного зв'язку з виходу моделі на її вхід і використання цих результатів для корекції прогнозу робить процес прогнозу ітеративним, що у поєднанні з відбором даних для навчання, що відповідають найбільш точним прогнозам, створює тенденції отримання прогнозів вироблення електроенергії, найменш спотворених помилками метеопрогнозу. Далі, як і в методі « k – найближчих сусідів», знаходимо найменшу (не рівну нулю) евклідову міру відхилення:

$$D_T = \min \{ D_t > 0 \}, \quad t = t_1 \dots t_k, \quad (11)$$

Головна відмінність запропонованого методу прогнозування від відомого методу « k – найближчих сусідів» у тому, що при визначенні міри близькості ретроспективних даних та даних, що характеризують прогнозований момент часу, в запропонованому методі враховується додатковий фактор, який характеризує якість ретроспективних даних. Зважаючи на це, бажано щоб назва запропонованого методу враховувала його відмінність від відомого методу. Виходячи з цього, звернемо увагу на підхід, який використовують батьки школярів, рекомендуючи їм вибирати друзів однокласників, не лише близьких за деякими критеріями, а й із високими результатами успішності. Ця непряма аналогія дає підстави назвати новий метод

прогнозування методом *k* – друзів однокласників, скорочено – *k*-FC (*k*-friends classmates) – метод.

Прогноз $W_B^*(t_f)$, одержаний з використанням *k*-FC – методу, об'єднується з прогнозом $W_{MMF}^*(t_f)$, який був одержаний ансамблевим методом

$$W^*(t_f) = E \cdot W_{MMF}^*(t_f) + (1 - E) \cdot W_B^*(t_f), \quad (12)$$

де E – коефіцієнт змішування прогнозів у ансамблі.

Цей коефіцієнт визначено за умовою мінімального середньоквадратичного ухилення прогнозу генерації електроенергії від фактичного рівня її виробітку на вибірці з навчальної послідовності.

Третій розділ присвячений виконанню дослідження розробленої прогностичної моделі на діючих фотоелектричних станціях. Згідно прийнятої гіпотези при побудові прогностичної моделі функція впливу метеорологічних факторів на рівень виробітку електроенергії фотогальванічною станцією має вигляд добутку часткових функцій впливу. Це означає, що вплив кожного фактору на величину виробленої електроенергії враховується незалежно від інших факторів, які присутні у якості аргументів функції впливу.

Для перевірки цієї гіпотези виконано на діючих станціях експериментальні дослідження взаємного кореляційного зв'язку між факторами, які враховуються прогностичною моделлю. Результати цих досліджень представлені у таблиці 1

Таблиця 1 – Результати кореляційного аналізу метеорологічних факторів

Коефіцієнт детермінації	σ	φ	ν	S
σ	1	0,240	0,060	0,000219
φ	0,240	1	0,005	0,068
ν	0,060	0,005	1	0,048
S	0,000219	0,068	0,048	1

Як можна бачити з таблиці 1, взаємна детермінація факторів що впливають достатньо низька. Середньоквадратичний коефіцієнт Пірсона прогностичної моделі за одержаними експериментальними даними дорівнює 0,0702. Низький рівень взаємної детермінації метеорологічних факторів свідчить про низький рівень залежності один від одного факторів, які впливають на виробіток електроенергії, що підтверджує можливість факторизації функції впливу, чим саме і підтверджується гіпотеза факторизації.

Для дослідження залежності рівня виробітку електроенергії фотогальванічною станцією від факторів, які впливають на цей рівень, в роботі проведено експериментальне моделювання розробленим поліноміальним методом, розглянутим у другому розділі, діючих станцій потужністю 0,45 мВт, 1,0 мВт, та 5,7

мВт. За критерієм мінімального середньоквадратичного відхилення для поліномів різних ступенів одержано часткові функції впливу, які саме і характеризують залежність, що досліджується. Часовий інтервал, на якому здійснювалась обробка даних навчальної послідовності дорівнює 10 місяцям. Залежність часткових функцій впливу від факторів, що впливають (рівень хмарності, рівень вологості та швидкість вітру) для станцій, які досліджувалися представлена на рис. 4. Як можна бачити з наведених діаграм, найбільш впливовими факторами являються рівень хмарності та вологості. При цьому з наведених діаграм можна бачити, що функції впливу хмарності майже зовсім не залежать від рівня вологості, а функції впливу вологості також не залежать від рівня хмарності. Ці результати додатково свідчать про взаємну незалежність часткових функцій впливу, що також відповідає гіпотезі факторизації.

Станції, на яких проводились дослідження, відрізняються не тільки потужністю, але також координатами геолокації і місцем розташування. Так, станції 0,45 мВт і 1,0 мВт розташовані на дахах будівель, а станція 5,7мВт на землі. Станція 1,0 мВт розміщена на дахах виробничого підприємства, де забрудненість повітря і сонячних панелей значно вище ніж в місцях розташування станцій 0,45мВт та 5,7мВт. Ця особливість розташування станцій відобразилась на результатах їх автоматичного навчання.

Загальна тенденція часткових функцій впливу хмарності для всіх досліджених станцій така, що з ростом рівня хмарності часткові функції впливу зменшують своє значення, що відповідає зменшенню потужності фотогальванічного процесу тим більшому, чим більше захмарено небо над станцією.

Фотогальванічний модуль, який перетворює сонячну енергію в електричну, здійснює це перетворення згідно своїх номінальних характеристик в обмеженому температурному діапазоні. Якщо температура модуля перевищує *термічний поріг зниження потужності* $\Theta_p = 25 \text{ C}^0$, його віддача в електричну мережу знижується пропорційне *температурному коефіцієнту потужності* $k_p = 0,45 \text{ \%/град}$. Цю залежність виробітку електроенергії від температури фотогальванічного модуля, яка, в свою чергу, залежить від метеорологічних факторів, необхідно враховувати в структурі прогностичної моделі. Для цього у її складі необхідно враховувати теплову модель фотогальванічного модуля.

Рівняння теплового балансу PV – модуля в умовах конвективного теплообміну з навколишнім середовищем можна подати у вигляді:

$$cm \frac{dT_M^0}{dt} = S(t) \cdot F(t) \frac{\varepsilon}{\xi} - (T_M^0 - \theta) \cdot \alpha(V), \quad (13)$$

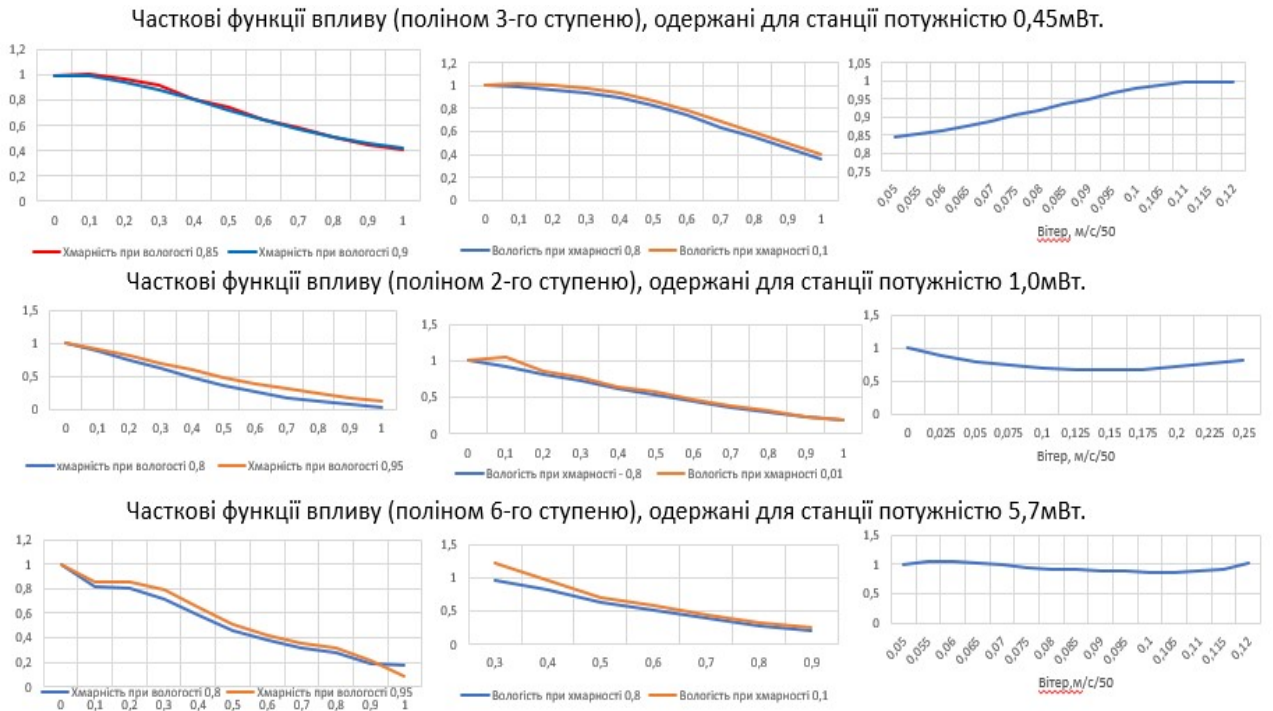


Рисунок 2 – Графіки часткових функцій впливу для станцій різних потужностей

де T_M^0 – температура модуля; $S(t)$ – енергія сонячної інсоляції, яка віднесена до одиниці площини активної поверхні модуля; $F(t)$ – функція впливу метеорологічних факторів; θ – температура повітря; V – швидкість вітру; $\alpha(V)$ – коефіцієнт тепловіддачі модуля, який враховує при заданій швидкості вітру теплопровідність повітря, його кінематичну в'язкість, коефіцієнт теплового розширення, та критерії Прандтля, Релея, Нуссельта; $c = 900 \text{ [Дж/кг/К}^0\text{]}$ – теплоємність модуля; $m = 18/1,42 \text{ [кг/м}^2\text{]}$ – маса модуля, яка віднесена до одиниці площини його поверхні; $\varepsilon = 0,9$ – коефіцієнт чорноти модуля; $\xi = 2$ – коефіцієнт охолодження модуля ($\xi = 1$, якщо охолодження здійснюється з однієї сторони поверхні модуля, $\xi = 2$, якщо охолодження здійснюється з двох сторін). Функціональна схема імітаційної моделі процесу термічного зниження потужності фотогальванічної станції у середовищі Simulink Online показана на рис. 3.

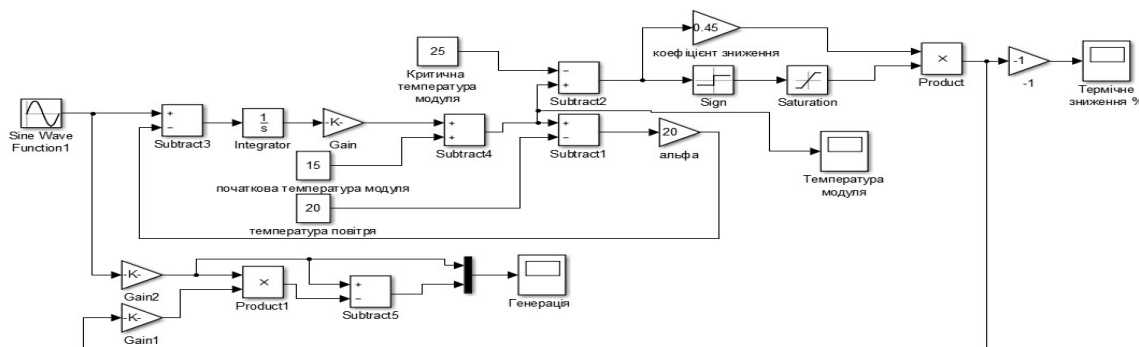


Рисунок 3 – Імітаційна модель процесу термічного зниження потужності фотогальванічної станції

Результати моделювання вказують на те, що, більш за все, на термічне зниження потужності фотогальванічної станції впливає швидкість вітру. Як можна бачити з наведених діаграм, не зважаючи на суттєве підвищення температури повітря, внаслідок підвищення швидкості вітру потужність знижується значно менше. Додаткову до основної модель термічного зниження потужності побудовано у роботі за алгоритмом:

$$\hat{W}(t) = \begin{cases} W^*(t) \left[1 - \frac{k_p}{100} \left(\frac{S(t) \cdot F(t) \cdot \varepsilon}{\alpha(v) \cdot \xi} + \theta - \Theta_p \right) \right], & \text{if } \frac{S(t) \cdot \varepsilon}{\alpha(v) \cdot \xi} + \theta > \Theta_p \\ W^*(t), & \text{if } \frac{S(t) \cdot F(t) \cdot \varepsilon}{\alpha(v) \cdot \xi} + \theta \leq \Theta_p \end{cases}, \quad (14)$$

де $\Theta = 25^{\circ}C$ – термічний поріг зниження потужності модуля;

$k_p = 0,45\%/C^{\circ}$ – температурний коефіцієнт потужності;

W^* – прогнозований виробіток електроенергії без урахування ефекту термічного зниження потужності фотогальванічних модулів.

Експериментальні випробування прогностичної моделі, доповненої моделлю термічного зниження потужності, здійснено на діючій фотоелектричній станції потужністю 8 мВт, яка розташована в Дніпропетровській області.

Завдяки включенню до прогностичної моделі третьої складової, яка враховує ефект термічного зниження потужності фотогальванічного модуля, похибка прогнозу знижується. Експериментальна перевірка моделі на діючій станції потужністю 8 мВт підтвердила зниження похибки прогнозу від 691 кВт без корекції до 280 кВт з корекцією. Цим підтверджується ефективність розробленої моделі.

У **четвертому розділі** розроблено та досліджено систему моніторингу і прогнозування процесів перетворення енергії Сонця в електричну енергію на основі прогностичних моделей. А також проведена експериментальна перевірка роботи прогностичних моделей в реальних умовах на 40 фотоелектричних станціях в різних регіонах України. Узагальнені результати порівняльного аналізу ефективності різних методів прогнозування наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Експериментальні похибки прогнозування на ФЕС потужністю 0,35...8 мВт

Метод прогнозу/Потужність	350 кВт	1800 кВт	8000 кВт
Поліноміальний	7,60%	9,35%	11,62%
Ансамблевий з використанням метода k- найближчих сусідів	8,18%	6,34%	7,43%
Ансамблевий з використанням k-FC – методу	4,86%	4,55%	7,53%

Порівняльний аналіз результатів прогнозування працюючих фотогальванічних станцій показав зниження середньої абсолютної помилки в середньому на 5-7% після включення до прогностичного ансамблю, запропонованих нами: k-FC – методу, методу рефлексивного навчання та підбору за результатами експериментів оптимальної величини коефіцієнта E змішування прогнозів в ансамблі.

Збільшення точності прогнозів вироблення електроенергії фотогальванічними станціями позитивно впливає на їх техніко-економічні показники та сприяє більш точному балансуванню ринку відновлюваних джерел на добу наперед.

Запропоновано комплекс технічних засобів необхідних для реалізації системи керування роботою моторизованого респіратора.

За результатами дослідження розроблено типову структуру системи прогностичного моніторингу процесів фотоелектричного перетворення сонячної енергії мережевою станцією (рис. 4), що включена до балансуєчої групи Гарантованого покупця з автоматичною регулярною передачею прогнозної інформації на фотоелектричну станцію, платформу Гарантованого покупця, та НЕК Укренерго. Для оцінки якості розробленої системи інтегрованого моніторингу виконано порівняння середніх значень MAE у мережі станцій, на яких втілено розроблену систему з середніми значеннями MAE всієї групи генеруючих одиниць Гарантованого покупця.

Враховуючи, що небаланси між прогнозованим та фактичним виробітком електричної енергії у різних станцій мають різні знаки, можна з великою вірогідністю очікувати, що середні небаланси великої групи, якою є група Гарантованого покупця, будуть меншими, ніж небаланси значно меншої групи, що входить до її складу. Але за результатами порівняння значення MAE %, які усереднені на мережі станцій, де втілено розроблену систему інтегрованого моніторингу на базі прогностичної моделі в середньому (28,4%) не перевищують значення MAE (35,6%), що усереднені на всій групі Гарантованого покупця, а в деяких випадках виявляються значно кращими.

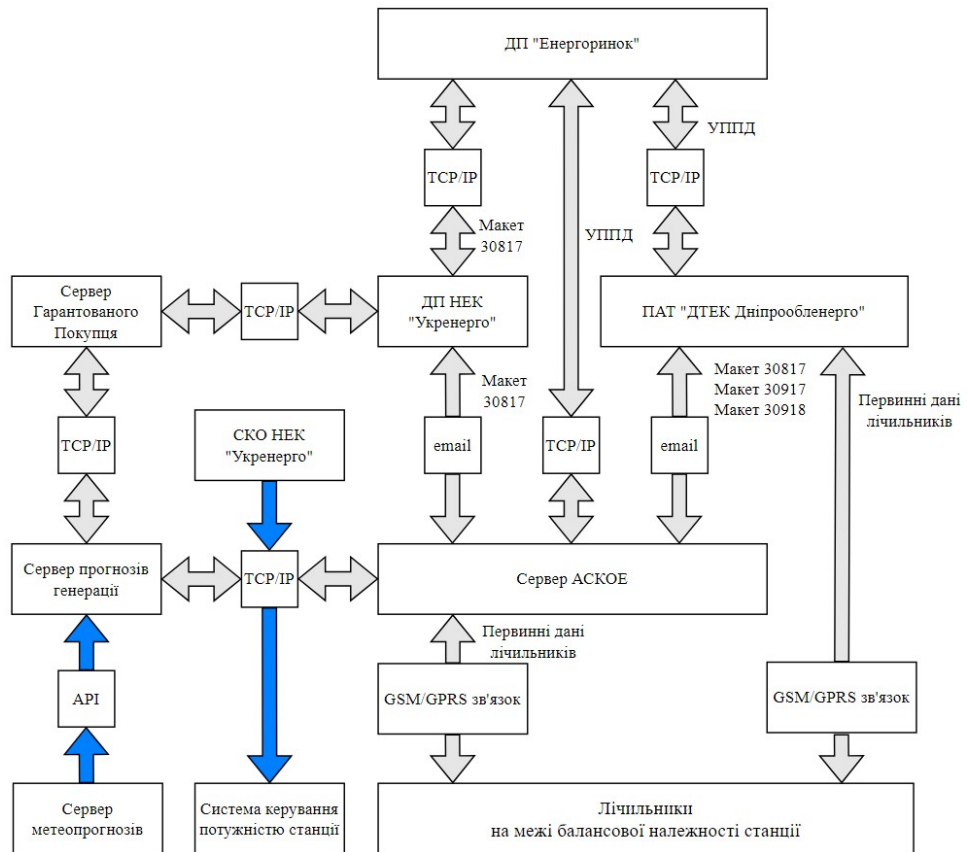


Рисунок 4 – Структурна схема системи прогностичного моніторингу

Це свідчить про те, що точність, розробленої системи інтегрованого моніторингу перевищує точність значної кількості інших систем, які функціонують у складі групи Гарантованого покупця, чим забезпечується ефективність прийняття рішень щодо керування режимами генерації/споживання контрольованих об'єктів енергосистеми та операціями на енергоринку.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеною науково-дослідною роботою і присвячена дослідженню процесу автоматичного прогнозування щогодинного виробітку «на добу наперед» фотоелектричної енергії, вирішена важлива наукова задача побудови прогностичної моделі зі зниженою чутливістю до негативного впливу метеорологічних похибок у її навчальній послідовності шляхом розробки нових системотехнічних принципів побудови моделі та нових методів її машинного навчання.

Виконані у дисертаційній роботі розрахунки, дослідження та експерименти дали змогу зробити наступні висновки щодо результатів:

1. Аналіз огляду існуючого досвіду створення систем прогностичного щогодинного моніторингу з прогнозуванням "на добу наперед" процесів виробітку фотоелектричної енергії показав недостатній рівень інваріантності існуючих принципів побудови прогностичних моделей від похибок метеорологічних прогнозів погоди, особливо у навчальній послідовності моделі.

2. За результатами дослідження поліноміального методу побудови прогностичної моделі фотогальванічного процесу перетворення сонячної енергії в електричну, спираючись на запропоновану у роботі гіпотезу факторизації, вдосконалено аналітичну платформу та розроблено методику і відповідне програмне забезпечення для побудови моделей за алгоритмом поліноміальної складності з використанням для навчання ретроспективної бази даних будь якого об'єму

3. Використання псевдо-інверсної теорії Мура - Пенроуза при обчисленні поліноміальних коефіцієнтів моделі надало можливість побудови коректних моделей за умов сингулярності характеристичної матриці моделі, що має місце при великих об'ємах ретроспективної бази даних.

4. Розроблено нові методи зменшення впливу помилок метеопрогнозів на результати навчання прогностичних моделей. Згідно цих методів здійснюється: децимація недостовірних даних навчальної послідовності та виправлення недостовірних даних запропонованим у роботі методом рефлексивного навчання.

5. Для підвищення точності прогнозування вперше розроблено структуру та принцип побудови кумулятивного ансамблю прогностичних моделей, в якому за рахунок послідовних децимацій недостовірних даних, рефлексивного навчання, цілеспрямованого відбору та усереднення параметрів моделей здійснюється побудова оптимальної прогностичної моделі.

6. На основі статистичних досліджень з використанням кореляційного аналізу взаємозалежності вхідних метеорологічних даних моделі встановлено досить низький рівень їх взаємної детермінації, чим обґрунтовується гіпотеза факторизації функції впливу вхідних факторів. Оскільки математична структура моделі спирається на цю гіпотезу, її обґрунтування означає верифікацію прогностичної спроможності моделі.

7. Дослідження факторизованої функції впливу вказує на те, що незалежно від ступеню прогностичного поліному зберігається загальна тенденція часткових впливів. При цьому, найбільш впливовими являються рівень хмарності та вологості.

8. За результатами дослідження залежності ефекту термічного зниження потужності фотогальванічного модуля від вхідних даних прогностичної моделі виявлено домінуючий над температурою повітря вплив швидкості вітру. При цьому, вже при швидкості вітру до 2м/с постійна часу нагріву модуля знижується настільки, що усереднена на годині температура модуля може бути обчислена за умови його теплової рівноваги з навколишньою середою.

9. Експериментальне порівняння на діючих фотоелектричних станціях різних методів щогодинного прогнозування виробітку фотоелектричної енергії «на добу наперед» виявило перевагу ансамблевого з використанням розроблених за участю автора k-FC – методу, а також методу рефлексивного навчання і змішування прогнозів в ансамблі. Використання запропонованих методів дозволяє знизити абсолютну середню похибку прогнозів на 5-7%.

10. За результатами проведених досліджень розроблено типову структуру системи прогностичного моніторингу процесів виробітку фотоелектричної енергії для втілення на діючих фотоелектричних станціях.

11. За результатами аналізу досвіду промислової експлуатації розробленої системи прогностичного моніторингу, яка втілена у різних регіонах України на 40 мережевих фотоелектричних станціях загальною потужністю 56 мВт (додаток Б), виявлено, що її точність перевищує точність значної кількості інших систем, які функціонують у складі групи державного підприємства «Гарантованого покупця», що відповідає вимогам до ефективності рішень щодо керування режимами генерації/споживання контрольованих об'єктів енергосистеми та операціями на енергоринку.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у періодичних міжнародних виданнях, які індексуються у наукометричній базі Scopus

1. Zaslavskiy, A., Karpenko, O.: Prognostic model of a photovoltaic power plant. In: Shkarlet, S., et al. (eds.) Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2021. LNNS, vol. 344, pp. 91–103. Springer, Cham (2022). https://doi.org/10.1007/978-3-030-89902-8_7

2. Karpenko, O., Zaslavskiy, A., Tkachev, V. (2024). On the Issue of Reducing the Negative Impact of Erroneous Data in the Training Sequence of a Predictive Model. In: Kazymyr, V., et al. Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1091. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67348-1_27

Публікації у періодичних фахових виданнях України

3. О.М. Заславський, О.В. Карпенко, С.М. Проценко, В.В. Ткачов, Принципи побудови технічних засобів моніторингу енергетичних та матеріальних потоків. Науково–технічний збірник «Гірнична електромеханіка та автоматика». 2019 №102, с. 37–42. https://gea.nmu.org.ua/ua/ntz/archive/102/102_7.pdf

4. О.М. Заславський, В.В. Ткачов, С.М. Проценко, О.В. Карпенко, Принципи побудови програмних засобів моніторингу неелектричних енергетичних та матеріальних потоків. Енергозбереження та енергоефективність. 2020. №103, с. 115–120. <https://journals.politehnica.dp.ua/index.php/eis/article/view/352>

5. О.В. Карпенко, О.М. Заславський, Прогностична модель фотоелектричної станції з урахуванням термічного зниження потужності фотоелектричних модулів. – ISSN 1997–9266. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2024. №2, с. 47–52. <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/3009>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Заславський О.М, Карпенко О.В, Проценко С.Н., Ткачов В.В. Автоматизований комплекс моніторингу енергоносіїв на Дніпровському коксохімічному заводі. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні імені професора Михальова О.І.: – матеріали Міжнар. наук.–техн. конф. Національна металургійна академія України, ІВК «Системні технології», 2020, с. 321 – 324. <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/article/view/306/216>.

7. Zaslavskiy Alexandr, Karpenko Oleh, Prognostic model of a photovoltaic power plant. – Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2021: матеріали Міжнар. наук.–техн. конф. – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», с. 61 – 64.

<http://ir.stu.cn.ua/bitstream/handle/123456789/23388/%d0%9c%d0%9e%d0%94%d0%a1%202021V.5%2020.08.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Особистий внесок автора в роботах, що опубліковані у співавторстві, полягає: [1] побудова аналітичної платформи обчислення рівня сонячної інсоляції та функцій впливу метеорологічних факторів на рівень виробітку фотоелектричної енергії; [2] розробка методів зменшення негативного впливу помилкових даних у навчальній послідовності прогностичної моделі, а саме: методу «довірчого прогнозу» та методу рефлексивного навчання; [3] побудова імітаційної моделі процесу термічного зниження потужності фотогальванічного модуля та розробка алгоритму компенсації додаткової похибки прогнозування, пов'язаної з цим процесом; [4] розробка програмного забезпечення розгалуженої системи моніторингу енергетичних потоків; [5] розробка структуроутворюючого компонента системи моніторингу – модульного мережевого адаптера, який забезпечує можливість створювати на об'єктах з великою кількістю комунікаційного обладнання розгалужені мережі RS-485 з топологією «зірки»; [6] розробка програмно-технічних засобів для побудови інтегрованих систем моніторингу у промисловому виробництві; [7] розробка програмного забезпечення системи прогностичного моніторингу фотоелектричних станцій.

АНОТАЦІЯ

Карпенко О.В. Система моніторингу фотоелектричних станцій з системою інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі прогностичних моделей. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування (технічні науки). – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2024.

Дисертація спрямована на вирішення актуальної науково–технічної задачі підтримки необхідних умов збалансованого функціонування енергосистеми та енергоринку шляхом інтеграції відповідних методів моделювання та прогнозування часових рядів виробітку фотоелектричної енергії мережевими фотоелектричними станціями з керуючими та інформаційно–вимірювальними системами, які забезпечують моніторинг всієї необхідної для цього інформації.

В роботі проаналізовано особливості системи управління фотоелектричними процесами, які вимагають інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі прогностичних моделей, а також процес фотоелектричного перетворення сонячної енергії у якості об'єкту автоматичного прогнозування.

За результатами цього аналізу прийнято рішення відносно побудови структури моделі за екзогенним типом, який враховує як ретроспективні дані, так і одночасний з цими даними вектор параметрів, які впливають на рівень генерації. До цих параметрів відносяться метеорологічні дані та дані, що характеризують у часовій послідовності положення сонця на небосхилі відносно позиції геолокації фотогальванічної станції.

Відзначено, що головним недоліком існуючих підходів до побудови прогностичних моделей являється відсутність в них ефективного механізму захисту

результатів прогнозування від помилкових ознак метеорологічного стану довкілля у ретроспективних базах даних, які використовуються для машинного навчання моделей. За наявності таких помилкових ознак модель навчається некоректно, що призводить до значних відхилень прогнозу від факту у подальшому, навіть при якісних, безпомилкових метеорологічних прогнозах на прогнозовану годину.

Запропоновано для подолання цього недоліку побудувати таку структуру моделі, яка б за допомогою зворотного (рефлексивного) математичного перетворення (що означає на фізичному рівні використання фотогальванічних модулів у якості датчиків рівня сонячного випромінювання) могла автоматично коректувати вибіркові ретроспективні метеорологічні дані згідно функціональному зв'язку між ними та іншими даними і фактичним рівнем виробітку електроенергії.

За результатами проведених досліджень розроблено типовий проект системи прогностичного моніторингу процесів фотоелектричного перетворення сонячної енергії мережевою станцією, що включена до балансуєчої групи Гарантованого покупця з автоматичною регулярною передачею прогнозованої інформації на фотоелектричну станцію, платформу Гарантованого покупця, та НЕК УКРЕНЕРГО. Розроблено уніфіковане програмне забезпечення систем прогностичного моніторингу. Ці системи втілено у різних регіонах України на 40 мережевих фотоелектричних станціях загальною потужністю 56 мВт. За результатами аналізу досвіду промислової експлуатації розробленої системи інтегрованого моніторингу виявлено, що її точність перевищує точність ряду інших систем, які функціонують у складі групи державного підприємства «Гарантованого покупця», що відповідає вимогам до оптимальності рішень щодо керування режимами генерації/споживання контрольованих об'єктів енергосистеми та операціями на енергоринку.

Ключові слова: фотоелектрична станція, енергія Сонця, сонячна інсоляція, метеорологічні фактори, система моніторингового прогнозування, прогностична модель, екзогенна модель, поліноміальна модель, машинне навчання, навчальна послідовність, рефлексивне навчання, ансамбль, абсолютна середня помилка прогнозу, факторизація, кореляційний аналіз, імітаційна модель.

ABSTRACT

Karpenko, O.V. The system for monitoring photovoltaic stations with intelligent decision support system based upon prognostic models – Qualifying scientific work. Manuscript.

Thesis for a Candidate's Degree of Technical Sciences by specialty 05.13.07 – «Automation of control processes» (05 – technical sciences). – Completed a thesis at Dnipro University of Technology of MES of Ukraine, present a thesis at Dnipro University of Technology of MES of Ukraine, Dnipro, 2024.

The thesis deals with solution of the actual scientific and technical problem to maintain the required conditions of the balance operation by energy network and energy market through integration of adequate simulation methods and temporal series of photovoltaic energy generation, using photovoltaic stations with controlling and information and measurement systems monitoring all the necessary information.

The thesis has analyzed features of the system, controlling photovoltaic processes, involving intelligent support to make decisions based upon prognostic models, and the process of photovoltaic conversion of solar energy as an object of the automated predicting.

The analysis results have helped make the decision concerning the development of exogenous model taking into consideration both retrospective data and simultaneous with the data vector of parameters influencing the generation level. Meteorological data as well as data characterizing timely the sun position in the sky relative to geolocation of the photovoltaic station are among the parameters. The exogenous model predictor is based upon mathematical description of the photovoltaic process. In this regard, the mathematical description development has involved a hybrid approach. According to the approach, the prognostic model includes the two functional blocks: analytical predicting block and statistical predicting block with the use of machine learning methods. The analytical predicting block calculates the value of solar radiation energy, achieving photovoltaic station panels if the sky is cloudless, for each hour of each day and a year month depending upon the sun position.

It has been mentioned that lack of efficient mechanism, protecting predicting results from false signs of the meteorological state of the environment in the retrospective databases used for machine learning models, is the key disadvantage of the considered approaches to develop such a statistical predicting block. Due to the false signs, a model is learnt incorrectly which results in significant future deviations of the forecast from reality even if meteorological forecasts at the predicted hour are qualitative and unmistakable.

To overcome the drawback, it is proposed to develop such a model structure, which would apply reverse (reflexive) mathematical transformation (i.e. physical use of photovoltaic modules as solar radiation sensors) for automatic correction of selective retrospective meteorological data in accordance with functional relation between them, other data, and actual level of electric energy generation.

The research results have made it possible to develop the standard design of prognostic monitoring of the processes for the solar energy transformation by a network station included to a balancing group of SC Guaranteed Buyer with the automated regular prognostic data transfer to a photovoltaic station, and NPC Ukrenergo. Standardized software has been developed for the prognostic monitoring systems. The systems have been implemented in different Ukrainian regions at 40 network photovoltaic stations with the total capacity of 56MW. Analysis of practices of industrial operation of the developed system of the integrated monitoring has helped identify that it is more accurate to compare with accuracy of other systems operating as part of SC Guaranteed Buyer group which corresponds to requirements for the best decisions as for management of generation/consumption modes of the controlled power system objects and operations in the energy market.

Keywords: photovoltaic station, solar energy, solar insolation, meteorological factors, monitoring forecasting system, forecasting model, exogenous model, polynomial model, machine learning, training sequence, reflective learning, ensemble, mean absolute forecast error, factorization, correlation analysis, simulation model.

Підписано до друку 20.11.2024. Формат 60x84/16.
Папір офсетний. Друк цифровий. Ум. друк. арк. 1,16.
Наклад 100 пр. Зам. № 88.

Видавництво та друкарня ПП «ЛІРА ЛТД»
Вул. Наукова, 5, м. Дніпро, 49107
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6042 від 26.02.2018.
dnipro.lira@gmail.com | +38 (067) 561-57-05 | lira.dp.ua