

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора,
завідувача кафедри комп'ютерних систем та мереж
Криворізького національного університету

Купіна Андрія Івановича

на дисертаційну роботу

Карпенка Олега Вікторовича на тему

«Система моніторингу фотоелектричних станцій з системою інтелектуальної
підтримки прийняття рішень на основі прогностичних моделей»

представлену на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук за спеціальністю

05.13.07 – автоматизація процесів керування

1. Актуальність теми дисертації, її зв'язок з державними науковими програмами та відповідність теми дисертації її змісту.

Сучасною світовою тенденцією є поступова відмова від традиційних способів отримання енергії (наприклад, з природного палива, вуглеводнів, атомних реакторів тощо) на користь екологічно безпечних відновлювальних джерел (сонце, вітер, геотермальні явища). Так за даними міжнародного енергетичного агентства (МЕА, <https://www.iea.org/reports/>) станом на 2023 рік близько 27 % світового енергоспоживання було забезпечене з відновлюваних джерел енергії, а до 2040 року заплановано до 40 % світової електроенергії виробляти із відновлюваних джерел. Аналогічні тенденції існують і в Україні. Більш того, зараз в умовах війни та періодичних «блекаутів» такі питання стають стратегічними для безпеки держави. Тому дослідження перспективних шляхів вдосконалення незалежної так званої «зеленої генерації» є дуже важливим для сталого розвитку економіки, екології та суспільства.

Дисертація Карпенка О.В. присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі підвищення ефективності збалансованого функціонування енергосистеми та енергоринку шляхом інтеграції відповідних методів моделювання та прогнозування виробітку «зеленої» електричної енергії мережевими фотоелектричними станціями (ФЕС) з керуючими та інформаційно-вимірювальними системами, які забезпечують моніторинг всієї необхідної для цього інформації.

Зважаючи на те, що фотоелектрична енергія є важливим об'єктом купівлі/продажу на енергетичному ринку, вона має бути передбачуваною щодо обсягів її вироблення. Тому сучасний енергоринок вимагає від виробників фотоелектричної енергії погодинні прогнози на добу наперед. При відхиленні прогнозованих даних від фактичних більш ніж на 5% фотоелектрична станція повинна сплачувати штраф, розмір якого може сягати більш ніж 10% вартості виробленої станцією енергії. Щогодинні прогнози на день наперед потрібні на всіх рівнях керування режимами виробітку фотоелектричної енергії. На рівні диспетчера енергосистеми за цими прогнозами приймаються рішення про

обмеження виробітку електроенергії з метою підтримки сталої роботи енергосистеми. Оператор локальної мережевої станції, отримавши прогноз, який за поточними ознаками буде нижчим за фактичний виробіток, вирішує задачу відносно доцільності зменшення виробітку до рівня прогнозу, якщо ціна такого зменшення буде нижчою ніж штраф за небаланс. Від усіх цих рішень, підтриманих системою прогностичного моніторингу, залежить як стабільність роботи енергосистеми та локальної станції, так і їх економічні показники.

У роботі обґрунтовано доводиться актуальність розробки теоретико-методологічних підходів та практичних аспектів побудови систем моніторингу, прогнозування та аналізу фотоелектричних процесів.

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.

Дисертація 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.

Ця дослідницька робота виконувалась як ініціативна. Її результати одержали впровадження у системах корпорації «Облік» прогнозування виробітку електроенергії "на добу наперед" згідно Правилам ринку "на добу наперед" на мережевих ФЕС, розташованих у різних регіонах України.

Тема дисертаційної роботи повністю відповідає її змісту.

За своїм спрямуванням та фактичним змістом представлена дисертаційна робота є актуальною і відповідає спеціальності 05.13.07 – автоматизація процесів керування.

2. Наукова новизна основних висновків і результатів дисертації.

Особливої уваги заслуговують наукові положення та результати досліджень автора, новизна і достовірність яких підтверджується нестандартністю підходу, теоретичним та експериментальним обґрунтуванням. Висунута автором та підтверджена експериментально гіпотеза щодо факторизації функції впливу метеорологічних факторів (згідно якої кожен фактор впливає незалежно від інших) дозволила створити платформу для побудови поліноміальних прогностичних моделей без обмеження кількості врахованих метеорологічних факторів.

Також досить цікавим є запропонований автором метод рефлексивного навчання прогностичної моделі, який дає можливість виправляти помилки метеорологічного прогнозу у навчальній послідовності моделі.

Наукові положення, що вносяться на захист.

1. Функція впливу вхідних метеорологічних факторів на рівень щогодинного виробітку електроенергії визначається у вигляді добутку

часткових функцій впливу кожного із 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 та 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.

Наукові результати:

1. 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.

2. Вперше 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.

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

4. Вперше на імітаційній моделі досліджено вплив вітру та температури навколишнього середовища на зниження потужності фотогальванічного модуля при досягненні ним надкритичної температури. Одержані результати вказують на домінуючий вплив фактору швидкості вітру у порівнянні з температурою повітря. За результатами цього дослідження до складу прогностичного ансамблю додано важливий компонент, який враховує зниження потужності фотогальванічного модуля.

5. 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.

3. Обґрунтованість та достовірність наукових положень і результатів дисертації.

Наукові положення, новизна та висновки, що представлені в дисертації, обґрунтовані на основі результатів перевірки точності щогодинного «на добу наперед» прогнозу в робочому режимі з передачею оперативної інформації на платформу Гарантованого покупця та операторам мережі станцій (40 генеруючих одиниць у різних регіонах України), де втілено системи прогностичного моніторингу, що розроблені за участю здобувача. Перевірка здійснювалась протягом 2023 року шляхом порівняння усередненої похибки розроблених систем із 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 вибілковими даними є навіть нижчою у понад 1,2 рази.

4. Значимість результатів роботи для науки і практики.

У науковому та практичному плані, дослідження та результати роботи, виконані здобувачем, є корисними для побудови прогностичних моделей та систем прогностичного моніторингу мережевих фотоелектричних станцій. Це підтверджується результатами, отриманими в дисертації:

1. Отримано математичну модель процесу фотогальванічного перетворення сонячної енергії на основі аналітичних методів опису процесу інсоляції фотогальванічних панелей у залежності від часу дня і сезону як об'єкта автоматичного прогнозування з самонавчанням на основі статистичних методів врахування впливу метеорологічних факторів на рівень виробітку фотоелектричної енергії.

2. Запропоновано нові методи зменшення залежності прогнозів виробітку фотоелектричної енергії від похибок метеорологічних прогнозів погоди.

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

5. Використання результатів дисертаційної роботи.

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 прогнозованої інформації на ФЕС, платформу Гарантованого покупця та НЕК УКРЕНЕРГО.

2. 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.

3. Точність розробленої системи інтегрованого моніторингу перевищує точність значної кількості інших систем, які функціонують у складі групи Гарантованого покупця. Використання в програмному забезпеченні

прогностичної моделі нових розроблених методів прогнозування дозволяє знизити абсолютну середню помилку прогнозів на 5–7%.

Практичне використання результатів підтверджується актом впровадження.

6. Структура роботи та її зміст.

Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи 147 сторінок, з них 124 основний текст. Дисертація містить 38 рисунків, 21 таблицю, список використаних літературних джерел із 66 найменувань.

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульована мета і завдання досліджень. Наведено відомості про наукову новизну і практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі проведено аналіз процесу виробітку електроенергії фотоелектричними станціями, а також здійснено ретроспективний огляд та критичний аналіз основних методів побудови прогностичних моделей цього процесу. Висновок, який робить автор за результатами оглядового аналізу, полягає в тому, що головним напрямком досліджень у даній роботі має бути розробка теоретико-методологічних підходів до зменшення негативного впливу помилок метеорологічних прогнозів на результати прогнозування виробітку фотоелектричної енергії.

У другому розділі розроблено математичну модель процесу фотогальванічного перетворення сонячної енергії як об'єкта автоматичного прогнозування з самонавчанням на основі статистичних методів врахування впливу метеорологічних факторів на рівень виробітку фотоелектричної енергії. Ця модель включає два взаємодіючих блоки. Один з яких моделює детермінований процес виробітку фотоелектричної енергії за умови «ясного неба» у залежності від взаємної орієнтації фотоелектричних панелей та Сонця, а другий моделює стохастичний вплив на цей процес екзогенних метеорологічних та інших факторів. Математична модель цього стохастичного впливу представлена в роботі у вигляді поліному від факторів, що впливають на рівень сонячної інсоляції. Ця модель базується на гіпотезі «факторизації», згідно якій функція стохастичного впливу являється добутком часткових функцій впливу кожного з врахованих факторів. Коефіцієнти поліному знаходяться у процесі навчання моделі шляхом математичної обробки ретроспективної навчальної послідовності факторів впливу за методом найменших квадратів з використанням псевдоінверсної теорії Мура-Пенроуза.

Гіпотеза «факторизації», яка була запропонована в даній роботі, дає практичну можливість будувати поліноміальні моделі фотоелектричного процесу за рівнем поліноміальної, а не експоненціальної складності. Такий підхід, з одного боку, дозволяє одержувати прогнози не гірші, ніж це можливо очікувати від виключно статистичної методології (нейронні мережі, опорні вектори та інше), а з другого – надає можливість одержувати у явному аналітичному вигляді функції впливу різних факторів. Саме на цю властивість підходу спирається запропонований у роботі метод рефлексивного навчання. Тут за рахунок зворотного математичного перетворення функцій впливу

досягається часткове виправлення помилкових метеорологічних даних у навчальній послідовності моделі.

Цілком обґрунтовано виглядає також підхід до побудови прогностичної моделі у вигляді ансамблю. Завдяки тому, що отриманий прогноз являє собою усереднення результатів багатьох моделей, що входять до складу ансамблю, не тільки підвищується точність прогнозування, але також з'являється можливість підключати до ансамблю додаткові моделі зі зворотнім зв'язком. Це також враховано у запропонованому методі «к – друзів однокласників» (або «k-FC – метод»).

Третій розділ присвячено дослідженню прогностичних моделей, розроблених у розділі 2. Дослідження автора виконувались у реальних умовах діючих мережевих станцій. Кореляційний аналіз взаємозалежності вхідних метеорологічних даних моделей на діючих станціях свідчить про досить низький рівень їх взаємної детермінації. Цим підтверджується гіпотеза факторизації функції впливу вхідних факторів.

Побудовані у розділі 3 графічні залежності часткових функцій впливу від впливаючих факторів свідчать про відсутність перехресного взаємного впливу (що також свідчить на користь гіпотези факторизації). Також незалежно від ступеню прогностичного поліному зберігається загальна тенденція часткових впливів. При цьому, найбільш впливовими являються рівень хмарності та вологості.

За результатами дослідження на імітаційній моделі у середовищі Simulink ефекту термічного зниження потужності фотогальванічного модуля при перевищенні його поверхнею надкритичної температури, визначено домінуючий над температурою вплив швидкості вітру. Побудовано алгоритм додаткової моделі у складі прогностичного ансамблю, яка корегує прогнози з урахуванням ефекту термічного зниження потужності.

Дослідження вказують на перевагу ансамблевого з використанням k-FC – методу, а також рефлексивного навчання із змішуванням прогнозів в ансамблі, що дозволяє знизити абсолютну середню помилку прогнозів на 5-7%.

У четвертому розділі дисертації для втілення результатів дослідження на діючих фотоелектричних станціях розроблено структуру та типовий проект системи прогностичного моніторингу мережевої фотоелектричної станції.

Автором розроблено як апаратне так і уніфіковане програмне забезпечення системи прогностичного моніторингу. Отримано 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».

За результатами проведених у роботі досліджень та інженерних розробок одержана можливість тиражування уніфікованих систем прогностичного моніторингу.

Все це забезпечило можливість підключення до балансуєчої групи Гарантованого покупця з автоматичною регулярною передачею прогнозу інформації на фотоелектричну станцію, платформу Гарантованого покупця та НЕК УКРЕНЕРГО великої кількості фотоелектричних станцій. А саме: 40

діючих мережевих фотоелектричних станцій загальною потужністю 56МВт у Дніпропетровському, Харківському, Миколаївському, Запорізькому та Житомирському регіонах.

У висновку наводяться основні результати досліджень та розробок дисертації. Як показали експериментальні дослідження, точність розробленої кіберфізичної системи інтегрованого моніторингу перевищує точність значної кількості інших систем, які функціонують у складі групи Гарантованого покупця. Використання в програмному забезпеченні прогностичної моделі нових розроблених методів прогнозування дозволяє знизити абсолютну середню помилку прогнозів на 5-7%.

Отже, ця дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена наукова-технічна задача побудови прогностичної моделі та системи прогностичного моніторингу зі зниженою чутливістю до негативного впливу метеорологічних похибок у її навчальній послідовності. На основі запропонованих автором нових системотехнічних принципів побудови моделі та нових методів її машинного навчання здійснено випробування та впровадження системи на вітчизняних ФОС.

7. Оцінка змісту дисертації, її завершеність. Повнота викладення матеріалів дисертації в опублікованих роботах.

Дисертаційна робота Карпенка Олега Вікторовича містить всі необхідні компоненти кандидатських дисертацій. Вона має чітку постановку задач наукових досліджень, аналіз сучасного стану питань автоматизації систем прогностичного моніторингу фотоелектричних станцій, чітку спрямованість, тісний взаємозв'язок теоретичних та практичних досліджень, наукову новизну, цінність для науки та вагоме практичне втілення в мережі діючих фотоелектричних станцій. Дисертація написана в чіткій та логічній формі. Зміст дисертації відповідає спеціальності 05.13.07 – «Автоматизація процесів керування».

В авторефераті дисертації коротко викладені мета та новизна роботи, основний зміст дисертації, наукові положення та результати, що захищаються, загальні висновки до дисертації, а також перелік усіх опублікованих здобувачем робіт за темою дисертації. Зміст автореферату цілком відповідає змісту дисертаційної роботи.

Загалом за темою дисертації двома мовами (українською та англійською) опубліковано 7 наукових праць, з них: дві статті в англійськомовних журналах, включених до наукометричних баз Scopus та/або Web of Science, три статті в періодичних фахових виданнях України, а також дві наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

8. Зауваження по дисертаційній роботі.

1. При формулюванні теми роботи бажано було уникнути тавтології з терміном «система» (наприклад, «... з можливістю інтелектуальної ППР...»).

2. Автором сформульовано 6 задач дослідження у вступі (с.21 у дисертації чи с.2 автореферату), але при цьому дисертація містить лише 4 основних розділи. Тому доцільно було б об'єднати та узагальнити окремі задачі за відповідними розділами для більш кращого сприйняття дисертації.

3. У першому розділі варто було б показати більш розгорнуто саме недоліки існуючих систем і методів прогнозування, і перш за все, систем на базі нейронних мереж, систем, побудованих за сучасними методами прогнозування: градієнтного бустінгу, опорних векторів тощо.

4. У прогностичній моделі не показано, як враховуються втрати енергії в мережах та обладнанні фотогальванічної станції. Вважаю, що до складу моделі слід було б ввести також функцію впливу рівня генерації на рівень втрат енергії.

5. За результатами кореляційного аналізу взаємного впливу метеорологічних факторів, що наведені у третьому розділі, можна бачити, що взаємний вплив рівнів вологості та хмарності значно перевищує взаємні впливи інших факторів. Виходячи з цього бажано було б крім врахованих в роботі функцій впливу, також врахувати функцію впливу сумісно діючих факторів: вологості та хмарності.

6. На функціональній схемі системи інтегрованого моніторингу фотогальванічної станції не показано, де використовується модуль мережевого адаптеру (ММА), який «було розроблено за участю автора для широкого спектру систем моніторингу енергетичних потоків».

7. Автором на с. 70 сформульована доволі нетривіальна оптимізаційна задача (2.38). При цьому не зазначається метод її вирішення, умови та обмеження щодо цього (наприклад, обумовленість).

8. Деякі висновки основних розділів (наприклад, розділ 2, с.71) мають вигляд простих анотації. Крім того у висновках іноді бракує конкретних чисельних показників ефективності (хоча насправді їх отримано чимало в роботі).

9. З опису пп. 3.2 не зрозуміло, чи є методика імітаційного моделювання авторською? Зокрема для типового рівняння теплообміну типу (3.6) відсутні зовнішні посилання.

10. На загальній структурній схемі (рис. 4.5), алгоритмах (рис. 4.6-4.9) мало сенс явно відокремити блоки, що відповідають за «інтелектуальну підтримку прийняття рішень...». Також варто було додати опис такого процесу в цьому розділі та в преамбулі загальних висновків (с. 115).

11. У роботі є окремі неточності в оформленні дисертації та автореферату. Наприклад, доцільність терміну «децимація» (пп.2.2.1, с.58), табл. 4.1 оформлено не за вимогами ДСТУ, «русизми» («таким чином», «наступному», «наступним чином», с.45, с.60, с.108 тощо в дисертації або авторефераті на с.1, с.8), небажані застосування прийменника «по» (с.4, с.45, с.51 тощо в дисертації або авторефераті на с.11), наведені непрацюючі інтернет-посилання (пп. 4.3, с.110), а також у формулах та рисунках автором не завжди наводяться відповідні одиниці вимірювання, наприклад, залежності (3.6) та (3.8), або рис. 3.1 та рис. 3.3.

Разом з тим, зазначені вище зауваження не торкаються суті роботи, її наукового та практичного значення, а тому не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи. Ці зауваження переважно носять уточнюючий характер та/або показують перспективу подальшого розвитку результатів досліджень автора в майбутньому.

9. Висновки.


Вважаю, що дисертаційна робота Карпенка Олега Вікторовича «Система моніторингу фотоелектричних станцій з системою інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі прогностичних моделей» є цілісною та завершеною науковою працею, в якій вирішена важлива для енергетичної галузі задача побудови прогностичної моделі та системи прогностичного моніторингу на її основі зі зниженою чутливістю до негативного впливу метеорологічних похибок у її навчальній послідовності. Стиль викладення та глибина подання матеріалу дозволяють оцінити дисертаційну роботу в цілому, як завершену наукову працю, що по науковій і практичній цінності, отриманому результату, особистому внеску, змісту і оформленню відповідає вимогам, пунктів 9, 11, 12.2 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України (КМУ) від 24.07.2013р. №567 (назва постанови зі змінами, внесеними згідно з постановою КМУ № 656 від 19.08.2015р.), а її автор, Карпенко Олег Вікторович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – «Автоматизація процесів керування».

Офіційний опонент,
 Завідувач кафедри
 комп'ютерних систем та мереж,
 Криворізького національного університету
 доктор технічних наук, професор



Андрій КУПН

*Висновок отримано
 11 грудня 2017 року
 Вчений спеціаліст
 Вчений радник
 Д. 08 080 07
 Член 17 М. Хубенко*




Підпис	<i>Купін А.</i>
ЗАСВІДЧУЮ:	
Ученый секретар Криворізького національного університету	
<i>М. Хубенко</i>	
12	20 24 р.