РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу **Шиманюка Павла Вячеславовича** "Короткострокове прогнозування вузлових електричних навантажень в розподільних мережах", яка подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка".

Актуальність дослідження.

Дисертаційна робота П.В. Шиманюка присвячена розв'язанню важливої та актуальної задачі – розроблення методів короткострокового прогнозування вузлових електричних навантажень, які можна використовувати для вирішення проблем визначення втрат електричної енергії та планування режимів роботи електричних мереж. У таких мережах необхідно розраховувати усталені режими їх роботи на протязі доби з урахуванням певних прогнозних значень. Для досягнення цієї мети необхідно прогнозувати значення активної та реактивної потужності у вузлах заступної схеми електричної мережі. На сьогоднішній день для вирішення цих задач використовується спрощена методика прогнозування навантажень, за допомогою прогнозу сумарного навантаження, для якого застосовують коефіцієнти залежності вузлових навантажень. Розвиток елементів Smart grid в енергосистемах забезпечує можливість отримання нової та актуальної інформації, яка може бути використана для прогнозування активних та реактивних вузлових навантажень.

Наукова новизна.

В дисертаційній роботі Шиманюком П.В. запропоновано новий метод прогнозування та представлено розробки нових моделей штучних нейронних мереж (ШНМ), розвинуто методи аналізу даних для виявлення та заміни аномальних значень та їх пропусків, запропоновано розв'язання задачі визначення очікуваних значень втрат електричної енергії за допомогою методів на основі ШНМ, що у сукупності дозволило підвищити точність та стабільність результатів прогнозування вузлового навантаження та втрат в електричних мережах.

Вперше розроблено метод багатофакторного короткострокового прогнозування вузлового електричного навантаження з використанням штучної нейронної мережі з модулем довго-короткострокової пам'яті (LSTM – Long-short term memory) та обхідним з'єднанням і паралельною гілкою прихованих шарів для обробки та врахування впливу зовнішніх факторів, що дозволило зменшити похибку прогнозування вузлового навантаження у порівнянні з іншими методами прогнозування.

Розроблено новий метод аналізу даних для виявлення та заміни аномальних значень та пропусків значень вузлового електричного навантаження за рахунок виконання двоетапного аналізу з використанням методу кластеризації даних (DBSCAN – Density-based spatial clustering of applications with noise) та декомпозиції часових рядів, а також заміни

аномальних значень за допомогою лінійної інтерполяції, що дозволило зменшити кількість виявлення хибних значень та в подальшому підвищити точність короткострокового прогнозування вузлових навантажень.

Структура дисертаційної роботи.

За своєю структурою дисертаційна робота Шиманюка П.В. складається з наступних частин: анотації, вступної частини, чотирьох розділів з висновками до них, загальними висновками, списком використаних джерел та додатками.

У вступній частині міститься загальна інформація про визначення теми дисертаційної роботи та її зв'язок з науковими темами. Автором сформульовано мету, об'єкт і предмет досліджень, сформовано наукову новизну, а також наведено відомості про публікації, особистий внесок здобувача та викладено основні одержані результати.

В першому розділі представлено огляд публікацій пов'язаних з особливостями застосування методів прогнозування для задач в галузі енергетики. Розглянуто можливості використання методів прогнозування вузлових навантажень для вирішення поточних та майбутніх задач в новому ринку електричної енергії.

Виконано аналіз та порівняння класичних методів прогнозування та сучасних методів на основі ШНМ. За результатами аналізу було підтверджено ефективність методу на основі ШНМ з модулем довго-короткострокової пам'яті LSTM. Показано, що метод на основі ШНМ дозволяє уникати ефекту зменшення градієнту похибки. На основі математичного моделювання однофакторного прогнозу автором було отримано оцінку похибки прогнозу, яка може бути використана при майбутньому прогнозуванні навантажень. Результати прогнозування демонструють переваги запропонованого методу на основі ШНМ з LSTM у порівнянні з класичним методом однофакторного прогнозування Холта - Вінтерса, зокрема метод ШНМ демонструє покращення точності прогнозу, кращу ефективність та швидкодію.

В результаті математичного моделювання ШНМ автором розроблено архітектуру комбінованої нейронної мережі для прогнозу вузлового навантаження з врахування додаткових факторів яка описана в розділі 2. Особливістю побудованої автором архітектури ШНМ є використання багатошарового персептрону (MPL) та блоку довго-короткострокової пам'яті LSTM в якості прихованого шару з функцією selu, а навчання даної нейронної мережі відбувається за допомогою алгоритму оптимізації ADAM.

Метою розробки даної архітектури є врахування температури повітря при багатофакторному прогнозі вузлового навантаження та за рахунок цього зменшення похибки прогнозу. Врахування температури повітря при прогнозуванні вузлового навантаження демонструє зменшення похибки прогнозу на 0,5% у порівняння з однофакторним прогнозом вузлового навантаження.

Автором розроблено нову комп'ютерну модель короткострокового прогнозування вузлового навантаження. Особливістю моделі є можливість налаштовувати параметри прогнозу в залежності від представлених завдань.

В третьому розділі представлено аналіз методів кластеризації для виявлення аномальних значень, вказано основні набори даних, які використовувались у дослідженнях, представлено алгоритм для виявлення та заміни аномальних значень на основі методу кластеризації даних. В якості новизни представлених наукових внесків за результатами проведених здобувачем досліджень можна віднести розроблений алгоритм двоетапної кластеризації даних на основі методу кластеризації DBSCAN для виявлення та заміни аномальних значень та пропусків в ретроспективних даних вузлового навантаження.

Результатом використання алгоритму є підвищення достовіризації даних часових рядів вузлового навантаження у випадках кібератак на енергетичні мережі, маніпуляцій з даними вимірювань або зовнішньою інформацією. За результатами дослідження було підтверджено, що розроблений алгоритм дозволяє відновити спотворені дані вузлового навантаження енергосистеми. Використання алгоритму двоетапної кластеризації даних для виявлення аномальних значень та їх заміни дозволяє зменшити середні похибки прогнозу з 13.52 % до 11.52%.

В четвертому розділі вперше розроблено моделі прогнозування вузлів навантажень з використанням ШНМ глибинного навчання, прогнозні значення яких використано для оцінки очікуваного значення втрат в електричних мережах. При використанні запропонованого методу було виявлено значне зниження похибки очікуваного значення втрат електричної енергії в розподільних мережах які необхідні для формування їх погодинного графіка закупівлі.

Розроблено моделі прогнозування вузлів навантажень з використанням штучних нейронних мереж глибинного навчання задля визначення очікуваного значення втрат в електричних мережах, що дозволило зменшити похибку визначення очікуваного значення втрат електричної енергії в розподільних мережах.

Автором отримано важливий науковий висновок, який показав, що загалом використання методів прогнозування для визначення втрат електричної енергії має меншу похибку величини втрат ніж при її розрахунку за коефіцієнтами втрат. Також пряме прогнозування втрат та визначення втрат на основі прогнозів кожного вузла навантаження окремо мають меншу похибку ніж при використанні прогнозів усіх вузлів разом. Це може бути зумовлено різними взаємозв'язками між вузлами навантаження. На основі проведених досліджень підтверджено, що зменшення похибки прогнозування навантаження на рівні 5% може сприяти зниженню загальних витрат, пов'язаних з компенсацією небалансів у енергетичній системі.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень дисертаційної роботи.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечується шляхом застосування коректних методик постановки експериментів та обробки експериментальних даних, їх узгодження з теоретичними результатами і результатами моделювання. Результати

виконання досліджень підтверджуються обговореннями на міжнародних конференціях, публікаціями у фахових виданнях і авторським свідоцтвом. Отримані результати без сумнівів є достовірними. Висновки дисертаційної роботи повні, логічні і відображають її сутність.

Публікації та апробація результатів роботи здобувача.

Основний зміст дисертаційної роботи Шиманюка П.В. достатньо повно представлено у 17 наукових працях, 11 з яких опубліковано в наукових фахових виданнях, що індексуються у наукометричній базі SCOPUS та одним авторським свідоцтвом на комп'ютерну програму.

Основні положення та наукові результати дисертаційної роботи розглядались на 5 міжнародних науково-технічній конференціях.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень наведених у роботі отримані особисто або за безпосередньої участі автора.

Практичне значення результатів роботи.

Результати роботи використано під час підготовки аналітичних матеріалів щодо виявлення відхилень в даних з вузлового електричного навантаження для ТОВ «ДТЕК Мережі».

Практичне значення результатів роботи виявлено при розробці комп'ютерної моделі короткострокового прогнозування вузлового навантаження та алгоритму двоетапної кластеризації даних, що базується на методі кластеризації DBSCAN.

Автором запропоновано новий метод використання штучних нейронних мереж глибинного навчання для оцінки очікуваного значення втрат за рахунок використання прогнозів вузлових навантажень і подальшого їх застосування, та врахування цих результатів при створенні погодинного графіка закупівлі операторами систем розподілу на ринку електричної енергії України.

Зауваження по дисертаційній роботі.

1. При наявності значної кореляції між вузлами, число обумовленості збільшується, що дозволяє відібрати прогнозну модель з найменшою кореляцією похибки. Однак автор не надає конкретних вказівок щодо використання прогнозних моделей в даному контексті та не наводить результатів вибору прогнозної моделі з найменшою кореляцією похибки прогнозу вузлів навантаження. У роботі згадується число обумовленості матриці $cond(A)$ (рівняння.2.9).

2. З тексту дисертаційної роботи не зрозуміло, як значна кореляція між вузлами може впливати на результати прогнозування.

3. У розділі 2.1 дисертаційної роботи розглядаються різні методики оцінки якості прогнозів навантажень, проте у розділах 2.4 та 2.5, зокрема, в таблицях 2.4-2.7, наведені результати похибок прогнозів без зазначення методу, що використовувався для їх оцінки.

4. У розділі 3.2. зазначено, що набір даних енергосистеми Туреччини (таблиця 3.2) відзначається значною кореляцією між вузлами. Однак, дані були використані лише на початкових етапах досліджень короткострокового прогнозування. Важливо з'ясувати, чи може розроблений метод ефективно працювати з такими масивами корельованих даних.

5. У розділі 3.1 дисертаційної роботи відсутнє визначення терміну "достовіризація" та його кількісна оцінка, хоча автор постійно користується цим терміном.

6. В розділі 4.3 щодо прогнозування втрат електричної енергії в розподільних мережах не було надане пояснення наскільки різняться реальні добові графіки навантажень від використаних погодинних даних. Також відсутній літературний огляд цього питання. Якщо на інтервалах однієї години мають місце значні коливання навантаження, то прогнозні навантаження будуть усереднюватися, що може призвести до похибок прогнозу та негативно вплинути на процес оптимізації активних втрат в енергомережах з використанням прогнозованих навантажень. Зважаючи на ці обставини, проблема відрізняння реальних добових графіків навантажень від використаних погодинних даних потребує подальшого розгляду.

Усі представлені зауваження не мають принципового характеру, та не зменшують достовірність та важливість науково-практичних результатів дисертаційної роботи.

Висновок. На основі аналізу дисертаційної роботи Шиманюка П.В. за темою "Короткострокове прогнозування вузлових електричних навантажень в розподільних мережах " можна зробити висновок, що представлена робота є повноцінним науковим дослідженням в ході якого отримано нові наукові та практичні результати, що є актуальними для розвитку сучасної силової електроніки. Викладені в дисертаційній роботі наукові положення та висновки переконливі та обґрунтовані як з наукової, так і технічної точок зору. Назва дисертації відповідає її змісту.

Дисертація Шиманюка П.В. виконана на високому рівні. В роботі продемонстровано сучасні рішення короткострокового прогнозування вузлових електричних навантажень електричних мереж.

Вважаю, що дисертація Шиманюка П.В. відповідає спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії …», затвердженого Кабінетом Міністрів України №44 від 12 січня 2022 р., а її автор Шиманюк Павло Вячеславович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії.

Рецензент: к.т.н.,
старший науковий співробітник
відділу моделювання електроенергетичних
об'єктів та систем
Інституту електродинаміки
НАН України Ігор ТРАЧ

підпис І. Трача
Інституту електродинаміки
Нац. Академії наук України
08.05.2023р.

Національна Академія Наук України
Інститут електродинаміки
ідентифікаційний код
№ 05417236
м. Київ