

Голові разової спеціалізованої вченої ради PhD15086
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя
д.т.н., професору Литвиненку Ярославу
Володимировичу

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук, доцента **Коноваленка Ігоря Володимировича**
на дисертаційну роботу **Тимощука Дмитра Івановича**
«Методи та моделі машинного навчання для прогнозування гістерезисної
поведінки сплавів з пам'яттю форми»,
подану до захисту на здобуття
ступеня доктора філософії з галузі знань 12 «Інформаційні технології»
зі спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»

Актуальність теми дисертації

Сучасний розвиток комп'ютерних наук значною мірою пов'язаний із застосуванням методів машинного навчання для аналізу складних експериментальних даних та прогнозування поведінки технічних систем і матеріалів. У цьому контексті дисертаційна робота Тимощука Дмитра Івановича є актуальною, оскільки спрямована на розроблення моделей прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми, які мають важливе практичне значення для біомедичних, робототехнічних, авіакосмічних та інших інженерних застосувань. Складність досліджуваної задачі полягає в нелінійному характері залежності між напруженням і деформацією, впливі історії навантаження, кількості циклів та накопичення функціональної втоми матеріалу. Використання моделей машинного навчання дає змогу скоротити обсяг тривалих і ресурсомістких експериментальних досліджень, забезпечити прогнозування поведінки матеріалу та підвищити обґрунтованість отриманих результатів завдяки застосуванню методів пояснюваного штучного інтелекту.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи полягає в такому:

- вперше запропоновано математичну модель прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми, у якій номер циклу навантаження-розвантаження використано як незалежну вхідну змінну;
- вперше обґрунтовано критерії перевірки фізичної узгодженості моделей машинного навчання шляхом зіставлення результатів SHAP та Integrated Gradients із відомими закономірностями фазових перетворень, гістерезисної поведінки та накопичення функціональної втоми;
- удосконалено метод оцінювання моделей прогнозування шляхом застосування групового розбиття даних за номером циклу навантаження-розвантаження, що унеможливило витік інформації між вибірками;
- удосконалено метод побудови ансамблевої Voting-моделі шляхом визначення ваг базових моделей на основі величини, обернено пропорційної до середнього значення MSE, отриманого під час групової крос-валідації;
- удосконалено метод побудови ансамблевих моделей VotingRegressor і StackingRegressor та моделей глибокого навчання SimpleRNN, LSTM, GRU і TCN для екстраполяційного прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми шляхом введення номера циклу навантаження-розвантаження як незалежної вхідної змінної, що дало змогу врахувати зміну деформації матеріалу та прояви функціональної втоми в умовах циклічного навантаження.

Практична цінність одержаних результатів

Практична цінність одержаних у дисертаційній роботі результатів полягає в тому, що розроблені та досліджені моделі машинного навчання дають змогу прогнозувати гістерезисну поведінку сплавів з пам'яттю форми за умов циклічного навантаження, зокрема на циклах, що виходять за межі навчального діапазону даних. Це дає можливість скоротити обсяг тривалих і ресурсомістких експериментальних випробувань та отримувати прогнозні оцінки зміни деформації матеріалу.

Отримані результати можуть бути використані для прогнозування форми гістерезисних петель, оцінювання впливу функціональної втоми на властивості

матеріалу, аналізу демпфувальної здатності SMA-елементів, а також під час проєктування актуаторів, сенсорних, демпфувальних і конструкційних елементів на основі сплавів з пам'яттю форми. Додаткову практичну цінність має розроблена програмна система побудови, оцінювання та інтерпретації моделей, яка забезпечує відтворюваність обчислювальних експериментів і може бути розширена для інших наборів даних та режимів навантаження.

Отримано довідки та акти впровадження дисертаційної роботи, які засвідчують, що результати використано на практиці наступним чином:

- у навчальному процесі кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій ТНТУ під час викладання дисципліни «Методи та системи штучного інтелекту»;
- у навчальному процесі кафедри систем штучного інтелекту та аналізу даних ТНТУ під час викладання дисципліни «Машинне навчання»;
- у діяльності ТОВ «Ново-Ком» під час розроблення інформаційно-аналітичних систем із використанням методів пояснюваного штучного інтелекту;
- у діяльності ТОВ «СЕЙСМО АНАЛІТИКС» при вдосконаленні підходів до аналізу експериментальних даних, прогнозування поведінки досліджуваних об'єктів та інтерпретації результатів машинного навчання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота Тимощука Дмитра Івановича пов'язана з виконанням науково-дослідної теми ВК 76-24 «Розв'язування задач науки методами штучного інтелекту», номер державної реєстрації 0125U000584.

Тематика дисертації відповідає змісту зазначеної науково-дослідної роботи, оскільки спрямована на застосування методів штучного інтелекту та машинного навчання для розв'язання складної науково-практичної задачі прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми за умов циклічного навантаження.

Повнота викладення результатів дослідження у наукових публікаціях, дотримання вимог академічної доброчесності

Основні наукові результати дисертаційної роботи достатньо повно відображені у наукових публікаціях здобувача. За темою дисертації

опубліковано 2 наукові праці у фахових виданнях України та 6 наукових праць у виданнях, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus. Крім того, результати дисертаційного дослідження пройшли апробацію на міжнародних наукових конференціях, що підтверджує їхню наукову обґрунтованість і відповідність тематиці дисертації.

Зміст опублікованих праць відповідає основним положенням дисертаційної роботи та охоплює питання побудови ансамблевих і нейромережевих моделей машинного навчання, прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми, оцінювання точності моделей та інтерпретації результатів засобами пояснюваного штучного інтелекту. Це дає підстави вважати, що результати дисертаційного дослідження належним чином оприлюднені в наукових виданнях.

У дисертаційній роботі дотримано вимог академічної доброчесності. Використані ідеї, результати та тексти інших авторів мають відповідні посилання на джерела. У роботі зазначено особистий внесок здобувача у виконання дослідження, розроблення моделей, проведення обчислювальних експериментів, аналіз та інтерпретацію отриманих результатів. Ознак порушення академічної доброчесності в дисертаційній роботі не виявлено.

Оцінка змісту дисертації

Дисертаційна робота Тимощука Дмитра Івановича має логічну та послідовну структуру, що відповідає поставленій меті та завданням дослідження. У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, сформульовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан досліджень у галузі прогнозування властивостей сплавів з пам'яттю форми, розглянуто фізичні основи формування гістерезисної поведінки, а також обґрунтовано доцільність застосування методів машинного навчання та пояснюваного штучного інтелекту.

У другому розділі наведено експериментальну базу дослідження, описано формування набору даних, методи попередньої обробки, стратегію групового

розбиття даних, математичну модель прогнозування, використані моделі машинного навчання, метрики оцінювання та програмну систему дослідження.

У третьому розділі подано результати побудови, навчання та оцінювання ансамблевих моделей VotingRegressor і StackingRegressor, рекурентних нейронних мереж SimpleRNN, LSTM, GRU та темпоральної згорткової мережі TCN. Проведено порівняльний аналіз точності моделей за основними метриками якості прогнозування.

У четвертому розділі наведено результати прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми на віддалених циклах навантаження, проаналізовано екстраполяційну здатність моделей та виконано інтерпретацію прогнозів із використанням методів SHAP та Integrated Gradients. Отримані результати узагальнено у висновках, які відповідають поставленим завданням і відображають основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи.

Загалом зміст дисертації є цілісним, науково обґрунтованим і достатньо повно розкриває тему дослідження. Матеріал викладено послідовно, із належним поєднанням теоретичного аналізу, експериментальних даних, методів машинного навчання, кількісного оцінювання та інтерпретації результатів.

Відповідність дисертаційної роботи вимогам МОН України

Дисертаційна робота Тимощука Дмитра Івановича «Методи та моделі машинного навчання для прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми» за своїм змістом, структурою, науковим рівнем, обсягом виконаних досліджень, характером отриманих результатів та повнотою їх висвітлення у наукових публікаціях відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії.

Робота є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальну науково-практичну задачу побудови, оцінювання та інтерпретації моделей машинного навчання для прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми. Дисертація відповідає галузі знань 12 «Інформаційні технології» та спеціальності 122 «Комп'ютерні науки», оскільки

її основні результати пов'язані з розробленням і застосуванням методів машинного навчання, аналізом даних, побудовою програмної системи, оцінюванням якості моделей та використанням методів пояснюваного штучного інтелекту.

Зауваження до дисертації

Попри загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, до неї можна висловити такі зауваження:

1. У назві дисертації та в тексті роботи використовується формулювання «прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми», а також розглядаються різні властивості й параметри матеріалу, зокрема деформація, напруження, цикли навантаження-розвантаження, температури фазових перетворень тощо. Водночас у початковій частині роботи не одразу чітко простежується, що саме прогнозованою величиною є деформація матеріалу, а напруження, номер циклу та індикатор фази навантаження або розвантаження виступають вхідними параметрами моделі. Це дещо ускладнює сприйняття постановки задачі на початкових етапах ознайомлення з дисертацією.

2. У першому розділі автор наводить твердження про активне зростання кількості наукових робіт, присвячених застосуванню методів машинного навчання для дослідження сплавів з пам'яттю форми, що ілюструється рисунками 1.3 та 1.4. Оскільки інтенсивне поширення методів машинного навчання й штучного інтелекту в різних галузях науки є загальновідомою тенденцією, наукову цінність цього фрагмента більшою мірою визначає не сама динаміка кількості публікацій, а аналіз конкретних робіт, їх результатів, обмежень і відмінностей від дослідження автора.

3. У тексті дисертації поняття узагальнювальної здатності, прогнозування в межах діапазону навчальних даних та екстраполяційного прогнозування інколи вживаються в близькому контексті. Зміст цих понять у роботі загалом розкрито, однак їх більш чітке термінологічне розмежування могло б зробити виклад результатів однозначнішим.

4. У розділах, присвячених застосуванню методів SHAP та Integrated Gradients, основну увагу приділено перевагам цих підходів та отриманим

результатам інтерпретації. Водночас обмеження цих методів висвітлено недостатньо розгорнуто, зокрема чутливість SHAP до вибору фонові вибірки та залежність Integrated Gradients від вибору базового стану baseline.

5. У тексті дисертації трапляються окремі стилістичні, технічні та термінологічні неточності, зокрема щодо уніфікації написання назв моделей, метрик, позначень і термінів українською та англійською мовами. Вони не впливають на зміст отриманих результатів, однак дещо знижують редакційну цілісність викладу.

Вважаю, що висловлені зауваження не применшують загальну наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження здобувача і не мають істотного впливу на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновки:

1. Дисертаційна робота Тимощука Дмитра Івановича на тему «Методи та моделі машинного навчання для прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми» є завершеною кваліфікаційною науковою працею, у якій розв'язано важливу науково-практичну задачу побудови, оцінювання та інтерпретації моделей машинного навчання для прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми за умов циклічного навантаження.

2. За тематикою, змістом та науковими результатами дисертаційна робота відповідає спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» галузі знань 12 «Інформаційні технології».

3. Вважаю, що дисертаційна робота «Методи та моделі машинного навчання для прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми» відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій» із змінами та Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 р., а її автор, Тимошук Дмитро Іванович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за

спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» в галузі знань 12 «Інформаційні технології».

Рецензент:

доцент кафедри автоматизації

технологічних процесів і виробництв

Тернопільського національного технічного

університету імені Івана Пулюя МОН України

кандидат технічних наук, доцент

 Ігор КОНОВАЛЕНКО

