

## ВІДГУК

офіційного опонента – доктора технічних наук, професора,  
професора кафедри систем штучного інтелекту

Національного університету «Львівська політехніка»

**Виклюка Ярослава Ігоровича**

на дисертаційну роботу **Стеця Сергія Юрійовича**

на тему «Підвищення точності та швидкодії детектування зображень

автомобілів засобами згорткової нейронної мережі YOLO»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 121 – «Інженерія програмного забезпечення»

галузі знань 12 – «Інформаційні технології»

### Актуальність теми дисертаційного дослідження

Сучасні інтелектуальні транспортні системи, системи відеоспостереження та технології автономного водіння генерують колосальні обсяги відеоданих, ефективна обробка яких потребує точних, швидкодіючих та ресурсоефективних алгоритмів комп'ютерного зору. Детектування зображень автомобілів є ключовою базовою задачею для широкого спектра прикладних рішень: моніторингу дорожнього трафіку, автоматизованого контролю паркомісць, дистанційного зондування з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), систем активної безпеки та керування безпілотними транспортними засобами. Попри суттєві успіхи у розвитку архітектур згорткових нейронних мереж (ЗНМ), зокрема сімейства YOLO (You Only Look Once), досягнення задовільного балансу між точністю детектування та обчислювальною складністю залишається актуальним науковим і практичним завданням.

Моделі ЗНМ малого розміру, орієнтовані на розгортання у вбудованих і мобільних системах, як правило, демонструють недостатню точність у складних сценах з оклюзією, різноманітністю ракурсів і умов освітлення. Натомість великі моделі забезпечують високу точність, але потребують

значних обчислювальних ресурсів, що унеможлиблює їх застосування в системах реального часу на апаратних платформах обмеженої потужності. Особливою проблемою є формування спеціалізованих навчальних датасетів: традиційне ручне анотування є надзвичайно трудомістким і слабо масштабується. Таким чином, методики підвищення точності ЗНМ малого розміру через цілеспрямоване донавчання, попередню обробку вхідних зображень та автоматизоване формування навчальних датасетів набувають важливого значення як з точки зору теоретичної науки, так і практичного застосування.

Враховавши зазначені виклики, актуальним науково-прикладним завданням є підвищення точності та швидкодії детектування зображень автомобілів засобами ЗНМ YOLO шляхом попередньої обробки зображень, вибору оптимальної версії мережі та застосування підходу «Вчитель-Учень» для донавчання моделей малого розміру на автоматизовано сформованих датасетах. Все це зумовлює значну актуальність теми дисертаційного дослідження Стеця С.Ю.

### **Аналіз змісту дисертації та основні результати роботи**

Дисертаційна робота складається з переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів і підрозділів, висновків, списку використаних джерел (184 найменування) та восьми додатків. Загальний обсяг роботи – 230 сторінок, обсяг основного тексту – 148 сторінок. Дисертація містить 59 рисунків та 3 таблиці.

У вступі автором дисертаційного дослідження окреслено основну тематику роботи, обґрунтовано актуальність, розкрито мету, завдання та методи дослідження, теоретичне та практичне значення одержаних результатів, апробацію одержаних результатів.

У першому розділі здійснено комплексний аналіз існуючих підходів до розпізнавання та детектування зображень транспортних засобів. Автор обґрунтовує еволюцію від традиційних методів обробки зображень (HOG+SVM, метод Віоли–Джонса, SIFT, SURF) до глибоких нейронних

мереж. Розглянуто архітектурні принципи ЗНМ: глибокі залишкові мережі ResNet, мережі MobileNet з роздільними згортками, детектори з модулем Inception, двостадійний детектор Faster R-CNN та одностадійні детектори YOLO і SSD. Проаналізовано можливості хмарних платформ Google Cloud Vision, Amazon Rekognition та бібліотеки OpenCV. На основі проведеного аналізу обґрунтовано вибір архітектури YOLO як базової з огляду на найкраще поєднання точності та швидкодії.

**Другий розділ** присвячено розробці та програмній реалізації методики попередньої обробки вхідних зображень для підвищення якості їх детектування засобами YOLOv8. Детально описано архітектуру YOLOv8 та механізм інтеграції модуля попередньої обробки. Запропоновано та досліджено три способи підвищення контрасту: глобальне вирівнювання гістограми, адаптивна еквалізація CLAHE та поєднання вирівнювання і центрування гістограми. Оцінку якості детектування проведено за метриками Precision, Recall, F1-score та mAP. Встановлено, що запропонований спосіб вирівнювання і центрування гістограм забезпечує найвищу точність детектування, підвищуючи метрику IoU на 16 %. Для виявлення взаємозв'язків між метриками якості детектування проведено регресійний та кореляційний аналіз результатів.

**У третьому розділі** розроблено методику донавчання різних версій ЗНМ YOLO з використанням спеціалізованого датасету, анотованого у ручному режимі. Описано процес збирання та анотування зображень автомобілів, балансування класів та аугментацію (розширення датасету з 1542 до 3578 зображень). Виконано донавчання моделей YOLO на основі попередньо навченої на датасеті COCO. Встановлено, що донавчання дозволяє підвищити точність за метрикою Recall з 0,58 до 0,91, а за метрикою mAP50-95 – з 0,37 до 0,72. Проведено порівняльний аналіз ефективності версій YOLOv8m та YOLOv11m: при співставній точності ( $mAP50 \approx 0,96$ ) модель YOLOv11m має на 22 % менший розмір файлу ваг. Також розглянуто задачу трекінгу автомобілів засобами ЗНМ YOLO.

**Четвертий розділ** присвячено розробці методики автоматизованого формування датасету зображень автомобілів засобами ЗНМ YOLO великого розміру. Методика ґрунтується на глобальній та локальній селекції унікальних кадрів відеопотоку з використанням перцептивного хешування (pHash), що дозволяє скоротити надлишковість даних на 88 % (з 993 до 121 кадра у тестовому експерименті). Для ідентифікації схожих об'єктів на зображеннях застосовано угорський алгоритм з урахуванням метрики IoU та RMSE між дескрипторами. Розроблено методику донавчання з архітектурою «Вчитель-Учень», в якій модель YOLO малого розміру (YOLOv8n) навчається на автоматизовано сформованому датасеті, що мітиться мережею YOLO середнього розміру (YOLOv8m). Експериментально підтверджено підвищення точності моделі «Учень» за метрикою mAP50 з 0,6864 до 0,9292. Розроблену систему реалізовано мовою Python та розгорнуто на апаратній платформі Raspberry Pi 5 з Docker-контейнеризацією. Веб-інтерфейс забезпечує зручне керування та моніторинг системи. Розділ також містить опис заходів із забезпечення кібербезпеки для розробленої системи.

Роботу завершують **висновки**, що підтверджують наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів.

Додатки містять список публікацій автора, відомості про апробацію результатів дисертації (акти та довідки про впровадження), а також фрагменти програмного коду розробленого програмного забезпечення.

#### **Наукова новизна, оцінка обґрунтованості наукових положень дисертаційного дослідження та їх достовірності**

Дисертаційна робота містить ряд нових наукових результатів, розробку оригінальних методик та аналіз реальних даних на основі запропонованих методів і підходів. Зокрема, вперше розроблено методику донавчання ЗНМ YOLO малого розміру з автоматизованим формуванням спеціалізованого датасету зображень мережею YOLO більшого розміру в рамках підходу «Вчитель-Учень», що дозволяє підвищити точність детектування до 24 % за метрикою mAP50 при збереженні переваг малорозмірної моделі у швидкодії.

Вперше запропоновано методику попередньої обробки вхідних зображень для ЗНМ YOLO на основі узгодженого застосування еквалізації та центрування гістограм, що забезпечує підвищення точності детектування автомобілів на 16% за метрикою IoU. Також набула подальшого розвитку методика донавчання різних версій ЗНМ YOLO з сформованими у ручному режимі датасетами, доповнена порівняльним аналізом результатів, та методика автоматизованого формування датасетів, розширена механізмом відбору унікальних кадрів через перцептивне хешування.

Дисертаційна робота Стеця С.Ю. має чітку та логічну структуру і є цілісним та завершеним науковим дослідженням. Достовірність одержаних результатів забезпечується використанням стандартизованих метрик оцінювання якості детектування (Precision, Recall, F1-score, mAP50, mAP50-95, IoU), коректним формуванням навчальних, контрольних та тестових вибірок, порівнянням з результатами базових моделей та відомими теоретичними і практичними даними.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами**

Дисертаційну роботу виконано в межах науково-дослідних робіт Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, зокрема згідно з планами кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем за держбюджетною темою «Дослідження, моделювання та розробка програмного забезпечення складних динамічних систем» (номер державної реєстрації 0121U109232). Дослідження, викладені в дисертаційній роботі Стеця Сергія Юрійовича, відповідають напрямам науково-дослідних робіт зазначеної кафедри.

#### **Теоретичне та практичне значення результатів**

Робота має виражений прикладний характер, хоча містить ряд теоретичних положень. Основні положення та наукові (теоретичні) результати дисертаційного дослідження впроваджено в навчальний процес Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича в межах навчальних дисциплін «Методи цифрової обробки зображень», «Комп'ютерні системи

штучного інтелекту» та «Системи комп'ютерного зору», а практичні результати – у діяльність компаній ТОВ «ДВА ВІДРА» та ТОВ «ТРК А.С.С.», про що свідчать відповідні акти впровадження. Розроблені програмні засоби мають широкий потенціал застосування в системах оцінки дорожнього трафіку, аналізу зайнятості паркомісць, дистанційного зондування засобами БПЛА, контролю безпеки дорожнього руху та в технологіях автономного водіння. Важливою перевагою є можливість функціонування розробленої системи на мобільних обчислювальних пристроях (Raspberry Pi 5), що суттєво знижує вартість впровадження.

### **Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях**

Основні положення та результати дисертаційної роботи висвітлено у 10 наукових працях. У публікаціях розкрито теоретичні аспекти, запропоновано методики та описано особливості їх програмної реалізації, серед яких 3 статті у фахових виданнях України, 1 наукова праця, що додатково відображає наукові результати дисертації та індексується в наукометричній базі Scopus, а також 6 тез доповідей у матеріалах міжнародних науково-практичних конференцій. Таким чином, публікаційна активність здобувача відповідає вимогам до захисту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

### **Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертаційного дослідження**

1. У другому розділі встановлено, що спосіб вирівнювання і центрування гістограм забезпечує найкращу точність детектування. Проте відсутній детальний аналіз чутливості запропонованої методики до різних типів умов освітлення (нічні сцени, контражур, туман), що є критично важливим для реальних систем відеоспостереження. Було б доцільним навести кількісне порівняння ефективності методики для різних категорій складності сцен.

2. У роботі запропоновано методику з архітектурою «Вчитель-Учень», де мережа-«Вчитель» формує анотації для навчального датасету. При цьому не проаналізовано потенційне накопичення помилок розмітки від «Вчителя»

при ітеративному застосуванні підходу та не розглянуто механізмів контролю якості автоматично сформованих анотацій. Бажано було б дослідити залежність якості «Учня» від точності «Вчителя» та запропонувати критерії відбору надійних анотацій.

3. Хоча порівняльний аналіз версій YOLOv8m та YOLOv11m проведено на рівні точності детектування та розміру ваг, в роботі бракує системного порівняння за показниками швидкодії (FPS) у режимі реального часу на цільовій апаратній платформі Raspberry Pi 5, що ускладнює обґрунтований вибір версії для конкретних умов розгортання.

Однак, зазначені недоліки є неістотними, не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, не змінюють її наукової новизни та практичної цінності.

### **Загальний висновок**

Оцінюючи дисертаційну роботу в цілому, є всі підстави стверджувати, що за актуальністю теми, обсягом виконаних досліджень і науковою повнотою та цінністю одержаних у ній результатів і науково-теоретичним рівнем їх обґрунтованості дисертаційна робота Стеця Сергія Юрійовича на тему «Підвищення точності та швидкодії детектування зображень автомобілів засобами згорткової нейронної мережі YOLO» є завершеним науковим дослідженням, що вносить значний внесок у розвиток методів детектування зображень автомобілів засобами ЗНМ YOLO шляхом попередньої обробки зображень, автоматизованого формування навчальних датасетів та застосування підходу «Вчитель-Учень» для донавчання нейронних мереж.

Дисертація є завершеною науковою працею, яка цілком відповідає вимогам пунктів 6, 7, 8, 9 «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 від 12 січня 2022 р. №44 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), а її автор

