УДК 004.775:625.75

Моделювання руху безпілотного транспорту на базі Arduino

Валько Наталія Валеріївна¹, Болгарін Тимофій Олександрович¹,
Валько Катерина Віталіївна²

¹Херсонський державний університет,
Херсон, Україна

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Київ, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ	АНОТАЦІЯ
<p><i>Історія:</i></p> <p>Надійшла: 04.10.2019 Прийнята до публікації: 30.11.2019 Опублікована онлайн: 30.12.2019</p> <hr/> <p><i>Ключові слова:</i></p> <p>автономний транспорт моделі руху система контролю Arduino</p> <hr/> <p>© Валько Н. В. © Болгарін Т. О. © Валько К. В.</p> <p>Стаття ліцензована відповідно до "CC BY 4.0".</p>	<p>Розвиток технологій та їх інтеграція у життя суспільства робить актуальним створення моделей та алгоритмів автоматизації процесів. Однією з таких задач є створення транспорту з автономним керуванням. У статті розглянуто приклад побудови моделі транспорту автономного руху на базі плати Arduino. Модель працює під керуванням датчиків освітленості. Було проведено емпіричне дослідження поняття автономності транспортних засобів: збір інформації про різні реалізації автономного руху та систем, які його підтримують, розробка варіантів реалізації автономного руху з використанням різних апаратних засобів, експериментальна робота з перевіркою гіпотез про придатність того чи іншого варіанту системи автономного керування, тестування і оцінка роботи транспортного засобу.</p>

Creation of a model traffic of autonomous vehicles based on Arduino

Nataliia Valko¹, Tymofii Bolharin¹, Kateryna Valko²

¹Kherson State University,
Kherson, Ukraine

²Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Kyiv, Ukraine

Abstract. The development of technologies and their integration into society makes the creation of models and algorithms of process automation relevant. One of these tasks is the creation of an autonomous vehicle. The article describes an example of creation of a self-driving transport model based on the Arduino board. The

statement of the task is done, the technical characteristics of the model, the conditions of autonomous movement, and also external obstacles, such as traffic lights, pedestrians, traffic signs are determined. The model uses a linear light sensor for controlling itself. An empirical study of the concept of autonomy of vehicles was carried out: collecting information about various implementations of autonomous driving and its supporting systems, analysing the technical characteristics of the hardware for building the system, developing options for autonomous driving using various equipment, experimental testing of hypotheses about the suitability of an autonomous control system, and testing and evaluating car operation. The autonomous movement model was tested on a radio-controlled car (scale 1:10). To control the movement the Arduino MEGA microcontroller was selected.

Keywords: autonomous transport; motion models; control system; Arduino.

Вступ

Постановка проблеми. Робототехніка викликає все більше інтересу, оскільки технології стали доступними не тільки фахівцям, але й широкому колу тих, хто зацікавлений в науково-технічній і дослідно-експериментальній роботі. На сучасному етапі розвитку технологій роботизовані системи використовують в багатьох галузях виробництва, зокрема автомобілебудуванні. Розробки таких компаній як Google, Nissan, Robot Car UK, General Motors, Volvo і Audi вже дають непогані результати і на вулицях міст ведуться випробовування перших безпілотних автомобілів. Роботизовані автомобілі будуть реагувати швидше, ніж люди, уникаючи нещасних випадків, потенційно зберігаючи тисячі життів.

З огляду на практичну потребу створення алгоритмів автономного руху транспорту актуальним є питання про розробку моделей руху автономного транспорту. Побудова такої моделі дасть можливість краще зрозуміти процеси, які відбуваються при створенні реальних роботизованих систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує багато алгоритмів, які реалізують різні математичні моделі руху роботів за заданою траєкторією. Наприклад, в ([Thuilot, Cariou, Martinet, & Berducat, 2002](#); [Fang, Fan, Thuilot, & Martinet, 2006](#)) керування будується на основі кінематичної моделі перетворення системи в цепну форму. В ([Гилимьянов, Пестерев, & Рапопорт, 2008](#)) запропонована заміна змінних, яка буде математичну модель з лінеаризацією оберненого зв'язку. Один з шляхів розв'язування задачі стабілізації руху вздовж шляху – використання

геометричних підходів до побудови моделей. Наприклад, зчитування інформації датчиками полігональних форм і побудова шляху, як усереднення між точками центроїдів ([Ahamed, 2006](#)) або побудова траєкторії руху В-сплайнами ([Berglund, 2003](#); [Choset, 2005](#)). Достатньо повний огляд систем навігації і позиціонування мобільних роботів зроблено в роботі ([Borenstein, Everett, Feng, & Wehe, 1997](#)). В ній розглянуто сім категорій систем позиціонування: одометрія, інерціальна навігація, магнітні компаси, діючі маяки, глобальні системи позиціонування, орієнтирна навігація та модель узгодження. Також в цій роботі наведено характеристики кожної з моделей. Проте будь-яка математична модель повинна враховувати інертність систем реагування. Тому потрібно побудову моделі руху розглядати в комплексі побудови всього транспортного засобу.

У рамках створення моделі автономного безпілотного транспорту для руху по лінії необхідно, перш за все, ознайомитися з процесами розробки, створення, налаштування та експлуатації роботизованих систем, які є прототипами систем, що будуть реалізовуватися в реальних умовах з метою скорочення кількості автомобільних аварій.

Автономний рух транспорту базується на аналізі даних, які поступають від датчиків та пристроїв, які сканують навколишнє середовище. Існуючі системи автономних автомобілів провідних виробників (Audi Traffic Jam Pilot, BMW Traffic Jam Assistant, Cadillac Super Cruise, Nissan/Infiniti ProPilot, Mercedes-Benz Drive Pilot, Tesla Autopilot, Volvo Pilot Assist) використовують різні технології, які здійснюють автономне керування. Наприклад:

- Камери спостереження – візуальне виявлення об'єктів, наприклад, дорожньої розмітки та знаків.

- Радари (RADAR – Radio Detection And Ranging) – визначення перешкод і об'єктів попереду і ззаду, а також визначення відстані до них. Це система виявлення, яка використовує радіохвилі для визначення дальності, висоти, напрямку руху і швидкості об'єктів. Випромінююча антена радару передає імпульси радіохвиль, які відбиваються від будь-якої перешкоди на своєму шляху. Об'єкт повертає крихітну частину енергії хвилі в приймаючу антену, яка зазвичай знаходиться поруч з передавачем. Радари дозволяють автомобілю «бачити» досить далеко для того, щоб реагувати на швидкі зміни на автострадах.

- Лазерний далекомір (LIDAR, Light Detection And Ranging) схожий на радар, але є набагато чіткішим і дозволяє виявляти об'єкти навколо автомобіля (повний огляд 360°).

- Штучний інтелект (Artificial intelligence) – обробляє дані з камер і сенсорів, керує автомобілем і приймає рішення.

У визначенні рівня автоматизації спільноти автомобільних інженерів (Society of Automotive Engineers, SAE) «режим водіння» означає «тип сценарію з характерними вимогами до динамічного водіння» (наприклад, злиття швидкісних автомагістралей, крейсерна швидкість, низькошвидкісна пробка, водіння на закритій території тощо) ([рис. 1](#)):

- Рівень 0: Автоматизована система видає попередження та може миттєво втрутитися, але не має постійного контролю над автомобілем.

- Рівень 1 («hands on»): водій та автоматизована система поділяють контроль над транспортним засобом. Наприклад, адаптивний круїз-контроль (ACC, Adaptive Cruise Control), де водій контролює рульове керування та швидкість автоматичного керування системою; та Parking Assistance, де рульове управління автоматизоване, а швидкість руху здійснюється вручну. Водій повинен бути готовий перехопити повний контроль. Система утримання в межах смуги

(LKA, Lane Keeping Assistance) – це ще один приклад автономного водіння на рівні 1.

- Рівень 2 («hands off»): автоматизована система повністю контролює транспортний засіб (прискорення, гальмування та рульове управління). Водій повинен стежити за рухом і бути готовим негайно втрутитися в будь-який момент, якщо автоматична система не зможе правильно зреагувати. Скорочення «hands off» не є буквальною, фактично, контакт між рукою та рульовим колесом часто є обов'язковим під час водіння на рівні SAE 2, щоб підтвердити, що водій готовий втрутитися, перехопити управління.

- Рівень 3 («eyes off»): водій може безпечно відволіктися від задач керування. Транспортний засіб буде обробляти ситуації, що вимагають негайної реакції, наприклад, екстреного гальмування. Водій все ще повинен бути готовим до втручання протягом певного обмеженого часу, зазначеного виробником, коли отримає сигнал до цього від автомобіля. Як приклад, 2018 Audi A8 Luxury Sedan був першим комерційним автомобілем, який претендував на здатність до 3-го рівня автономного водіння. У цьому автомобілі є так званий Traffic Jam Pilot. Після активації водієм, автомобіль повністю контролює всі аспекти водіння при повільному русі на швидкості до 60 кілометрів на годину. Ця функція працює лише на автомагістралях із фізичним бар'єром, що розділяє зустрічні потоки.

- Рівень 4 («minds off»): аналогічний рівню 3, але тут увага водія не потрібна для забезпечення безпеки, наприклад, водій може сміливо йти спати або залишити водійське місце. Автономне водіння підтримується лише в обмежених просторових областях (геофізичних) або за особливих обставин, таких як пробки. За межами цих областей або обставин транспортний засіб повинен мати можливість безпечно завершити поїздку, наприклад, припаркувати машину, якщо водій не перехопить контроль.

- Рівень 5 («steering wheel optional», «рульове колесо необов'язкове»): взагалі не потрібно втручання людини. Прикладом може бути роботаксі ([SAE Standards Development, 2019](#)).

Рис. 1. Рівні автономності керування автомобілем (за [SAE Standards Development, 2019](#))

На сьогоднішній день розробники ще не змогли повністю виключити необхідність знаходження людини в водійському кріслі. Однак лідери авторинку вже випускають напівавтономні системи, які дозволяють водію все менше і менше приймати участь в керуванні автомобілем. Водночас вони повідомляють, що вже зовсім скоро з'явиться модифікація автомобіля, яка зможе повністю автономно подолати відстань між двома американськими узбережжями, причому процедура зарядки також буде автоматичною.

У наведеному формальному стандарті SAE особливу увагу слід звернути на те, що відбувається при переході від рівня SAE 2 до SAE 3: водій (людина) більше не повинен контролювати навколишнє середовище. У SAE 3 водій все-таки несе відповідальність за втручання, коли його просила зробити це автоматизована система. У SAE 4 водій звільняється від цієї відповідальності, а в SAE 5 автоматизована система ніколи не буде вимагати втручання.

Оскільки рівень SAE 5 ще не реалізовано у сучасних автомобілях, то проектування таких систем і створення їх моделей є актуальним і перспективним.

Мета і завдання статті. Метою статті є побудова моделі руху вздовж лінії колісного мобільного робота з автономним керуванням. Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання: зробити постановку

завдання і визначити умови в яких відбувається рух транспорту; на основі огляду сучасних систем автономного керування визначити пристрої системи керування і розробити модель руху.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В рамках участі у змаганнях Robotraffic була виконана проектна робота по створенню моделі автономного транспортного засобу, який є учасником дорожньо-транспортного руху в умовах міського транспортного руху ([Всеукраїнські змагання «Роботрафік 2019»](#), 2019; [Морзе, Гладун, & Дзюба, 2018](#)). Розробка проекту мала етапи проектування, конструювання, дослідне створення та випробовування. На етапі проектування було зроблено постановку задачі і визначення початкових умов моделювання.

1. Постановка завдання і визначення початкових умов моделювання.

Технічне завдання полягає у створенні автономного роботизованого транспортного засобу (ТЗ), який буде без участі людини пересуватися вздовж лінії, не покидаючи її, і бути частиною моделі міського транспортного руху, дотримуючись правил дорожнього руху (ПДР).

Під транспортним засобом будемо розуміти модель колісної машини, яка має електродвигун, рульове управління керованих

коліс та мікроконтролер, що керує роботою системи.

Автономний режим – властивість ТЗ функціонувати самостійно, без участі у керуванні людини. при цьому є можливість використовувати будь-які датчики контролю стану навколишнього середовища.

Транспортний засіб повинен відповідати наступним технічним вимогам:

- Колеса повинні бути керовані рульовим керуванням.
- Модель повинна мати диференціал в трансмісії.
- У моделі має бути присутня можливість регулювання коліс (схід-розвал), а також амортизатори, ресори, незалежна підвіска коліс, два і більше незв'язаних механічно валів, з яких передається крутний момент на трансмісію.

Транспортний засіб має працювати відповідно до правил дорожнього руху в умовах міського транспортного руху:

- дотримуватись безпечної дистанції з іншим транспортом;
- рухатись відповідно до розмітки «дороги», дорожніх знаків, сигналів світлофорів;
- враховувати поточну ситуацію на «дорозі» і появу можливих «пішоходів»;
- не допускати невинуватої дорожньою ситуацією зупинки на перехресті, а за його межами.

Для побудови моделі міського транспортного руху мають бути використані світлофори, дорожні знаки, модель пішохода.

2. Розробка та створення моделі. Конструювання транспортного засобу.

При створенні моделі ТЗ вивчались і використовувались такі апаратні засоби: Arduino Mega, Sensor shield для Arduino MEGA, прийомо-передатчик ІЧ-даних, датчик лінії, датчик Холла, ультразвуковий датчик відстані. Як автомобільну базу було обрано швидкісну радіокеровану модель для дрифту Himoto DRIFT TC HI4123 масштабу 1:10 з повним приводом. Системою управління було обрано

платформу Arduino Mega, оскільки вона має підвищену продуктивність та більшу кількість роз'ємів для роботи з усіма системами автономного транспортного засобу. Також для спрощення підключення датчиків було обрано плату розширення у вигляді Sensor shield for Arduino MEGA.

Загальна модель схеми керування ТЗ представлена на [рис. 2](#).

Рис. 2. Загальна модель схеми керування ТЗ

Швидкість транспортного засобу повинна динамічно змінюватись, відповідно до вимог дорожньої ситуації. Тому автономна система повинна мати можливість регуляції швидкості ТЗ. Для визначення поточної швидкості необхідно фіксувати факт обороту колісної осі датчиком. Було розглянуто кілька варіантів здійснення цієї операції:

- Датчик лінії реагує на чорно-білі маркери на обертовій частині автомобіля (частина ходової частини автомобіля, такі як: колесо, карданний вал).
- Датчик Холла реагує на зміну магнітного поля, яке виникає навколо магніту, закріпленого на обертовій частині автомобіля.
- У випадку з оптичним датчиком використовуються колесо з отворами по периметру та датчик, що зчитує проходження свого сигналу через кожний отвір.

Обчислення швидкості руху опирається на дані, отримані від датчика Холла. Було випробувано декілька варіантів:

1. Обчислювати поточну швидкість, визначаючи час, що пройшов між попереднім та поточним оборотами.

2. Рахувати кількість оборотів та обчислювати поточну швидкість один раз за N секунд.

Кожний з цих варіантів має свої недоліки та переваги. Так, варіант 1 дасть швидкий результат, однак він буде нестабільним, оскільки навіть найменша похибка датчика або затримка можуть призвести до різкої зміни розрахованої швидкості, що, враховуючи автоматичне регулювання швидкості, спричинить ще більшу нестабільність системи. Варіант 2 дає більш стабільний та усереднений результат, однак мінусом є той факт, що маємо паузу між отриманням даних у N секунд.

3. Програмування автономного руху автомобіля по лінії з дотриманням ПДР.

Побудова алгоритмів руху автономного автомобіля заснована на одному з варіантів керування:

- Релейний рух. Алгоритми дискретного керування базуються на керування моторами відповідно до показань датчиків лінії, які налаштовуються в ході емпіричних досліджень. Датчики мають всього два стани, і, відповідно, два керуючих впливи на мотори. Проте, такі алгоритми мають недоліки: при великій кривизні лінії висока ймовірність загубити шлях; «зациклювання» на перехрестях.

- Пропорційне керування. Для реалізації цього алгоритму використовують різницю вхідного сигналу і сигналу зворотного зв'язку (сигнал неузгодженості) а також інтегральну і диференціальну складові сигналу неузгодженості.

Алгоритми пропорційного керування забезпечують здатність побудованої автоматичної системи керування рухом до самоналаштування у відповідності до змін вхідних параметрів. На основі таких алгоритмів будується адаптивний регулятор системи керування який формує керівний сигнал з метою більш якісного управління швидкістю автомобіля. Регулятор порівнює заданий сигнал з сигналами зворотного зв'язку від датчиків і визначає неузгодженість між цими величинами. Якщо неузгодженість

присутня, то регулятор видає керуючий сигнал.

Налаштування параметрів пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора є окремим завданням, яке дасть можливість його ефективного використання. В основі роботи такого регулятора лежить сума трьох показників, перший з яких пропорційний різниці вхідного сигналу і сигналу зворотного зв'язку, другий – інтеграл сигналу за часом від відхилення регульованої величини, третій – похідна сигналу темпу зміни відхилення регульованої величини ([Габрієль, Щур, Паславський, & Ямнюк, 2013](#)).

Кінцеве рівняння значення PID регулятора має вигляд:

$$PIDvalue = (K_p * P) + (K_i * I) + (K_d * D),$$

де:

K_p – константа, яка використовується для варіювання величини зміни, необхідної для досягнення встановленої точки;

K_i – константа, яка використовується для зміни швидкості, з якою відбуваються зміни у фізичній кількості для досягнення встановленої точки;

K_d – константа, яка використовується для зміни стабільності системи.

Для цього рівняння коефіцієнти підбираються таким чином, щоб компенсувати інертність системи. При цьому слід враховувати, що:

- збільшення пропорційного коефіцієнта збільшує швидкодію і зменшує запас стійкості;

- зі зменшенням інтегральної складової помилка керування з часом швидше зменшується;

- зменшення постійної інтегрування зменшує запас стійкості;

- збільшення диференційованої складової збільшує запас стійкості і швидкодії ([Поляков, 2012](#)).

Для прийняття рішень щодо ПДР за результатами датчиків може бути використаний апарат теорії автоматів.

Кінцевий автомат (FSM – Finite-state machine) це модель обчислень, заснована на гіпотетичній машині станів. В один момент часу тільки один стан може бути активним. Отже, для виконання будь-яких дій машина повинна змінювати свій стан.

Кінцеві автомати зазвичай використовуються для організації та подання потоку виконання будь-яких дій. Це особливо корисно при розробці штучного інтелекту у комп'ютерних іграх або у системах керування.

Кінцевий автомат можна представити у вигляді графа, вершини якого є станами, а ребра - переходи між ними. Кожне ребро має мітку, яка інформує про те, коли повинен відбутися перехід.

Цей метод було обрано для реалізації логіки управління транспортним засобом, який має дотримуватись правил дорожнього руху. Система контролю дорожньої ситуації включає:

- Ультразвуковий датчик відстані, розташований на капоті ТЗ. Він потрібен для визначення перешкоди на дорозі або пішохода.

- Датчик стоп-лінії – датчик лінії, що має зчитувати стоп-лінію на трасі. Розташований попереду автомобіля, при цьому зміщений вперед і вправо з метою уникнення помилкового зчитування основної смуги руху, а також з урахуванням того, що ТЗ має ненульовий гальмівний шлях.

- Інфрачервоний прийомо-передавач даних. У цьому проекті використовується для прийому сигналу від дорожньої інфраструктури (світлофорів, знаку стоп та знаку пішохідного переходу).

У цьому випадку система повинна була приймати дані від трьох датчиків, тобто потрібно було переглянути всі можливі варіанти комбінацій сигналів датчиків.

1. Ультразвуковий датчик видає 3 стани:
 - а. перешкоди для руху відсутні;
 - б. помічена перешкода, але повна зупинка не обов'язкова (відстань не критична);
 - с. помічена перешкода, зупинка обов'язкова (відстань близька до критичної).

2. Датчик стоп-лінії видає всього 2 стани: фіксує або ж не фіксує стоп-лінію.

3. Інфрачервоний датчик для дорожньої інфраструктури видає 7 сигналів: червоний сигнал; червоний з жовтим; жовтий сигнал; зелений сигнал; зелений блимаючий; пішохідний перехід; знак стоп.

Виходячи з цього, можна визначити, що повна матриця станів для системи буде мати розмірність 3x2x7. Однак, враховуючи той факт, що більшість комбінацій станів будуть давати однаковий результат, значну кількість можна спростити.

Висновки

В результаті здійсненого проекту було створено модель транспортного засобу з автономним керуванням, яка пройшла випробовування і прийняла участь у змаганнях. Для регуляції швидкості було налаштовано механізм обрахунку кількості обертань колісної осі з ПІД-регулятором. Такий механізм дозволяє отримати стабілізаційне керування колісним роботом за заданою траєкторією відповідно до кривизни шляху. Було розроблено систему контролю дорожньої ситуації для реагування на знаки і рух за правилами ПДР на основі теорії автоматів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Всеукраїнські змагання «Роботрафік 2019». (2019). Взято з <http://www.ort.org.ua/news/novini-ta-anonsi/vseykrayinski-zmagannya-robotrafik-2019/>.
- Габріель, Ю., Щур, Т., Паславський, В., & Ямнюк, Ю. (2013). Алгоритм управління астатичного регулятора електронно-керованого ПНВТ дизеля. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Серія: Агроінженерні дослідження*, 17, 232-239.
- Гилимьянов, Р. Ф., Пестерев, А. В., & Рапопорт, Л. Б. (2008). Управление движением колёсного робота в задаче следования вдоль криволинейного пути. *Известия РАН. Теория и системы управления*, 47(6), 158-165.
- Морзе, Н. В., Гладун, М. А., & Дзюба, С. М. (2018). Формування ключових і предметних компетентностей учнів робототехнічними засобами STEM-освіти. *Інформаційні технології і засоби навчання*, 65(3), 37-52. DOI: <https://doi.org/10.33407/itlt.v65i3.2041>.

- Поляков, К. Ю. (2012). *Основы теории автоматического управления: учеб. пособие*. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГМУ.
- Ahamed, T. (2006). *Navigation of an autonomous tractor using multiple sensors*. (Doctor of Philosophy in Agricultural Science Thesis). University of Tsukuba, Tsukuba.
- Berglund, T. (2003). *Path-Planning with Obstacle-Avoiding Minimum Curvature Variation B-splines*. (Licentiate Thesis). Luleå University of Technology, Luleå.
- Borenstein, J., Everett, H. R., Feng, L., & Wehe, D. (1997). Mobile Robot Positioning Sensors and Techniques. Invited paper for the *Journal of Robotic Systems, Special Issue on Mobile Robots*, 14(4), 231-249.
- Choset, H. (2005). *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementation*. Cambridge: The MIT Press.
- Fang, H., Fan, R., Thuilot, B., & Martinet, P. (2006). Trajectory tracking control of farm vehicles in presence of sliding. *Robotics and Autonomous Systems*, 54(10), 828-839. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2006.04.011>.
- Thuilot, B., Cariou, C., Martinet, P., & Berducat, M. (2002). Automatic Guidance of a Farm Tractor Relying on a Single CP-DGPS. *Autonomous Robots*, 13(1), 53-71. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1015678121948>.
- SAE Standards Development. (2019). Retrieved from <https://www.sae.org/standards/development>.
- REFERENCES**
- Ukrainian competitions Robotraffic 2019 Competitions*. (2019). Retrieved from <http://www.ort.org.ua/news/novini-ta-anonsi-vseykrayinski-zmagannya-robotrafik-2019/>. (in Ukrainian)
- Gabriel, Y., Schur, T., Paslavsky, V., & Yamniuk, Y. (2013). Control algorithm of an astatic regulator of electronically controlled PNVТ diesel. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriya: Ahroinzhenerni doslidzhennia*, 17, 232-239. (in Ukrainian)
- Gilimyanov, R. F., Pesterev, A. V., & Rapoport, L. B. (2008). Controlling the movement of a wheeled robot in the task of following along a curved path. *Izvestija RAN. Teorija i sistemy upravlenija*, 47(6), 158-165. (in Russian)
- Morse, N. W., Gladun, M. A., & Dziuba, S. M. (2018). Formation of key and subject competences of students by robotic kits of STEM-education. *Informatsiini tekhnolohii i zasoby navchannia*, 65(3), 37-52. DOI: <https://doi.org/10.33407/itlt.v65i3.2041>. (in Ukrainian)
- Polyakov, K. Yu. (2012). *Fundamentals of the theory of automatic control: textbook*. Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGMTU. (in Russian)
- Ahamed, T. (2006). *Navigation of an autonomous tractor using multiple sensors*. (Doctor of Philosophy in Agricultural Science Thesis). University of Tsukuba, Tsukuba. (in English)
- Berglund, T. (2003). *Path-Planning with Obstacle-Avoiding Minimum Curvature Variation B-splines*. (Licentiate Thesis). Luleå University of Technology, Luleå. (in English)
- Borenstein, J., Everett, H. R., Feng, L., & Wehe, D. (1997). Mobile Robot Positioning Sensors and Techniques. Invited paper for the *Journal of Robotic Systems, Special Issue on Mobile Robots*, 14(4), 231-249. (in English)
- Choset, H. (2005). *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementation*. Cambridge: The MIT Press. (in English)
- Fang, H., Fan, R., Thuilot, B., & Martinet, P. (2006). Trajectory tracking control of farm vehicles in presence of sliding. *Robotics and Autonomous Systems*, 54(10), 828-839. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2006.04.011>. (in English)
- Thuilot, B., Cariou, C., Martinet, P., & Berducat, M. (2002). Automatic Guidance of a Farm Tractor Relying on a Single CP-DGPS. *Autonomous Robots*, 13(1), 53-71. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1015678121948>. (in English)
- SAE Standards Development. (2019). Retrieved from <https://www.sae.org/standards/development>. (in English)

Про авторів:

Валько Наталія Валеріївна, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інформатики, програмної інженерії та економічної кібернетики, Херсонський державний університет (вул. Університетська, 27, м. Херсон, Україна, 73000), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-0720-3217>, valko@ksu.ks.ua

Болгарін Тимофій Олександрович, магістрант спеціальності «Інженерія програмного забезпечення», Херсонський державний університет (вул. Університетська, 27, м. Херсон, Україна, 73000), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-6026-7573>, timofey45.16.95@gmail.com

Валько Катерина Віталіївна, студентка бакалавріату спеціальності «Комп'ютерні науки», Київський національний університет імені Тараса Шевченка (вул. Володимирська, 60, м. Київ, Україна, 01601), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9746-018X>, katerynavalko@gmail.com

About the authors:

Nataliia Valko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Informatics, Software Engineering and Economic Cybernetics, Kherson State University (27 University Str., Kherson, Ukraine, 73000), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-0720-3217>, valko@ksu.ks.ua

Тимofii Bolharin, Student of the master undergraduate, specialty "Software Engineering", Kherson State University (27 University Str., Kherson, Ukraine, 73000), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-6026-7573>, timofey45.16.95@gmail.com

Kateryna Valko, Student of the bachelor undergraduate, specialty "Computer Science", Taras Shevchenko National University of Kyiv (60 Volodymyrska Str., Kyiv, Ukraine, 01601), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9746-018X>, katerynavalko@gmail.com