

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 004.9:629.13

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-25>

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ АВТОМАТИЧНОГО НАЛАШТУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Налобіна Олена Олександрівна,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-1661-7331

Голотюк Микола Віталійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-3661-4437

Бундза Олег Зіновійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-3770-0273

Шимко Андрій Володимирович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри агроінженерії
Національного університету водного господарства та природокористування
ORCID ID: 0000-0002-2525-2787

Пилипака Тарас Сергійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри агроінженерії
Національного університету водного господарства та природокористування
ORCID ID: 0009-0000-5582-1859

У статті розглядаються методи автоматичного налаштування траєкторії руху транспортних засобів, що є одним із ключових складників сучасних інтелектуальних транспортних систем. Актуальність теми зумовлена дедалі вищими вимогами до безпеки, ефективності та енергоефективності руху транспортних засобів у складних умовах дорожнього руху. У роботі розроблено математичні моделі, які описують рух транспортного засобу на площині з використанням класичних рівнянь динаміки, де положення задається як функція часу, а напрямок руху описується кутовою функцією. В основі дослідження лежить задача оптимізації траєкторії, яка полягає в мінімізації цільової функції, що враховує витрати енергії, зусилля керування та інші параметри, які впливають на ефективність руху. Для розв'язання цієї задачі застосовано метод Лагранжа, що дає змогу отримати систему рівнянь Ейлера – Лагранжа, завдяки яким визначаються оптимальні параметри руху транспортного засобу в режимі реального часу.

У статті проаналізовано вплив ключових параметрів, як-от швидкість, кут напрямку та інші змінні, на якість і безпеку руху. Результати математичного моделювання підтверджуються побудовою графічних залежностей, зокрема гістограм та 3D-поверхневих графіків, що демонструють взаємозв'язок між параметрами моделі, зокрема вплив швидкості й кута напрямку на питомі витрати електроенергії та значення цільової функції. Отримані результати свідчать про можливість застосування оптимізаційних алгоритмів для корекції траєкторії руху з метою мінімізації енергетичних витрат і забезпечення максимальної стабільності керування транспортними засобами.

Практична значущість дослідження полягає в розробці методології, яка може бути інтегрована в сучасні системи автоматичного керування транспортними засобами. Це дасть змогу адаптувати їх рух до змінних умов дорожнього руху, знижуючи ризики аварій та покращуючи експлуатаційні показники. Також результати дослідження сприятимуть зниженню витрат пального й мінімізації впливу транспортних засобів на навколишнє середовище.

Ключові слова: автоматичне налаштування траєкторії, інтелектуальні транспортні системи, оптимізація руху, математичне моделювання, алгоритми оптимізації, динаміка транспортних засобів, системи керування, енергоефективність, автономні транспортні засоби, безпека руху.

Nalobina Olena, Holotiuk Mykola, Bundza Oleg, Shymko Andrii, Pylypaka Taras. Study of methods of automatic adjustment of vehicle movement trajectory

The article discusses the methods of automatic adjustment of the trajectory of vehicles, which is one of the key components of modern intelligent transport systems. The topicality of the topic is due to the growing requirements for the safety, efficiency and energy efficiency of the movement of vehicles in difficult traffic conditions. The paper developed mathematical models that describe the movement of a vehicle on a plane using classical dynamics equations, where the position is given as a function of time, and the direction of movement is described by an angular function. The research is based on the problem of trajectory optimization, which consists in the minimization of the objective function, which takes into account energy consumption, control effort and other parameters affecting the efficiency of movement. To solve this problem, the Lagrange method is applied, which allows obtaining a system of Euler–Lagrange equations, thanks to which the optimal parameters of the vehicle movement are determined in real time.

The article analyzes the influence of key parameters, such as speed, direction angle and other variables, on the quality and safety of traffic. The results of mathematical modeling are confirmed by the construction of graphic dependencies, in particular histograms and 3D surface graphs, which demonstrate the relationship between model parameters, in particular the influence of speed and direction angle on the specific consumption of electricity and the value of the objective function. The obtained results indicate the possibility of applying optimization algorithms for the correction of the movement trajectory in order to minimize energy costs and ensure maximum stability of vehicle control.

The practical significance of the research lies in the development of a methodology that can be integrated into modern systems of automatic control of vehicles. This will allow them to adapt their movement to changing traffic conditions, reducing the risk of accidents and improving operational performance. Also, the results of the research will help reduce fuel costs and minimize the impact of vehicles on the environment.

Key words: automatic trajectory adjustment, intelligent transport systems, traffic optimization, mathematical modeling, optimization algorithms, vehicle dynamics, control systems, energy efficiency, autonomous vehicles, traffic safety.

Вступ. З розвитком інтелектуальних транспортних систем значно зросла роль автоматизації управлінських процесів у транспортних мережах, що містить безпеку, ефективність та зниження впливу людського фактору. Одним із найважливіших аспектів цих систем є автоматичне налаштування траєкторії руху транспортних засобів, що передбачає здатність транспортних засобів адаптуватися до змінюваних умов руху та навколишнього середовища без втручання водія. Це дає змогу зменшити кількість дорожньо-транспортних пригод, підвищити ефективність руху та забезпечити економію ресурсів.

Автоматичне налаштування траєкторії є складним завданням, що містить численні аспекти: точне вимірювання параметрів руху, взаємодію з іншими транспортними засобами, адаптацію до змінних дорожніх умов, а також прогнозування та врахування можливих небезпек. З огляду на ці фактори, розробка ефективних методів та алгоритмів для автоматичного налаштування траєкторії є необхідною умовою для реалізації таких технологій у реальних умовах.

Актуальність проблеми визначається низкою технічних та організаційних викликів, що постають перед розробниками й користувачами інтелектуальних транспортних систем. Серед основних проблем, що ускладнюють ефективну реалізацію автоматичного налаштування траєкторії, можна виокремити: невизначеність навколишнього середовища, високі вимоги до точності сенсорних систем, складність математичних моделей, інтеграцію з іншими елементами транспортної інфраструктури.

З огляду на зазначені проблеми, мета статті – дослідити методи автоматичного налаштування траєкторії руху транспортних засобів, проаналізувати наявні математичні моделі, а також оцінити ефективність застосування новітніх технологій для реалізації автоматизованого управління рухом. Визначення переваг та недоліків різних підходів до оптимізації траєкторії дасть змогу вдосконалити наявні методи та сприятиме розвитку більш безпечних й економічно ефективних транспортних систем.

Аналіз досліджень і публікацій. Автоматичне налаштування траєкторії руху транспортних засобів є однією з ключових проблем, що

досліджують у межах інтелектуальних транспортних систем. Розвиток цієї сфери базується на інтеграції численних технологій, включно з машинним навчанням, штучним інтелектом, комп'ютерним зором, теорією управління та математичним моделюванням. З огляду на важливість цієї проблеми, останні десятиліття стали періодом активних досліджень і розробок у цій сфері.

Однією з основних проблем в автоматизації траєкторії є адаптація транспортних засобів до змінюваних умов навколишнього середовища. У публікаціях дослідників [1; 2] значну увагу приділено розвитку адаптивних алгоритмів, здатних коригувати рух транспорту в реальному часі в умовах змінних погодних факторів, дорожніх умов і перешкод. Наприклад, роботи [3; 4] показали ефективність використання датчиків LiDAR та радарних сенсорів для визначення перешкод на шляху руху й корекції траєкторії в умовах низької видимості, як-от туман чи дощ. Це дає змогу забезпечити стабільність і точність автоматичного керування навіть у несприятливих умовах.

Іншим важливим напрямом є вдосконалення математичних моделей для розрахунку оптимальних траєкторій. У сучасних дослідженнях дедалі більше уваги приділяють використанню методів оптимізації, як-от генетичні алгоритми, методи штучних нейронних мереж та оптимізація на основі машинного навчання. Дослідження [5; 6] показали, що нейронні мережі можуть ефективно прогнозувати зміни в дорожніх умовах, забезпечуючи оперативне коригування траєкторії для збереження безпеки й зниження витрат енергії. Адаптивні методи управління, які автоматично налаштовують параметри руху відповідно до змінних факторів, є важливим кроком у розвитку автономного транспорту.

У роботах [7; 8] підкреслюється важливість інтеграції різноманітних систем у межах єдиної архітектури, що дає змогу враховувати не тільки внутрішні параметри транспортного засобу, а й зовнішні умови, як-от стан дорожнього покриття, сигналізація і взаємодія з іншими учасниками дорожнього руху. Взаємодію між транспортними засобами, а також інтеграція з інфраструктурними елементами (світлофори, дорожні знаки, системи моніторингу) розглядають як важливий складник для забезпечення безпеки й ефективності руху в умовах автоматичного управління [9; 10].

Роботи [11; 12] акцентують на важливості точності сенсорних систем, які відіграють вирішальну роль у визначенні траєкторії руху. Проблеми точності вимірювань і мінімізації помилок

виявляються критичними, оскільки помилки у визначенні положення або швидкості транспорту можуть призвести до серйозних наслідків. Для цього активно використовують комбіновані сенсори, що поєднують дані з радарних, лазерних та оптичних систем для досягнення високої точності й надійності.

Водночас в останніх роботах [13; 14] значну увагу приділено енергоефективності автономних транспортних систем, що особливо важливо для зниження витрат пального та покращення екологічних характеристик транспортних засобів. Використання оптимізованих траєкторій руху не лише дає змогу зменшити ризики аварій та покращити ефективність транспорту, а й сприяє зменшенню викидів CO₂ завдяки раціональному розподілу навантажень і вибору мінімально енергозатратних маршрутів.

Так, останні дослідження в галузі автоматичного налаштування траєкторії руху транспортних засобів показують значний прогрес у напрямі досягнення високої точності, адаптивності та інтеграції з навколишнім середовищем. Однак є численні виклики, які потребують подальших досліджень, особливо в контексті забезпечення безпеки, енергоефективності та точності в складних умовах дорожнього руху.

Результати. Автоматичне налаштування траєкторії руху транспортних засобів є важливим складником розвитку інтелектуальних транспортних систем, що дає змогу досягти більшої ефективності та безпеки руху. Основним завданням є розробка методів і алгоритмів для точного управління рухом транспортних засобів в умовах змінних і складних дорожніх ситуацій. Для цього необхідно забезпечити надійне визначення параметрів руху й автоматичне коригування траєкторії на основі даних сенсорних систем.

Налаштування траєкторії руху транспортного засобу передбачає розробку математичних моделей, які допомагають у реальному часі обчислювати оптимальні траєкторії з урахуванням поточних параметрів дорожнього руху, як-от швидкість, прискорення, зусилля на кермо, а також зовнішніх факторів: стан дороги, погодні умови, наявність перешкод тощо.

Основним методом для реалізації автоматичного керування траєкторією є метод оптимізації, де налаштування траєкторії розглядається як задача оптимізації функції, що описує рух транспортного засобу. Метою є мінімізація функції витрат, яка може містити мінімізацію часу, енерговитрат, зміни напрямку, зусиль на кермо тощо.

Нехай $x(t)$, $y(t)$ – це координати транспортного засобу на площині в момент часу

t . Рух транспортного засобу можна описати рівнянням:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= v(t) \cdot \cos(\theta(t)) \\ \dot{y}(t) &= v(t) \cdot \sin(\theta(t))\end{aligned}\quad (1)$$

де $v(t)$ – швидкість транспортного засобу в момент часу t , $\theta(t)$ – кут напрямку руху відносно осі x .

Основним завданням є розрахунок оптимальних значень $v(t)$ і $\theta(t)$ для досягнення заданої траєкторії $\{x(t), y(t)\}$.

Математична модель оптимізації руху транспортного засобу містить задачу оптимального керування, де цільова функція може бути представлена у вигляді:

$$J = \int_0^T (\alpha_1 \dot{x}^2(t) + \alpha_2 \dot{y}^2(t) + \alpha_3 v^2(t) + \alpha_4 \dot{\theta}^2(t)) dt, \quad (2)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – вагові коефіцієнти, що відповідають важливості різних компонентів цільової функції, T – час кінця руху.

Метою є мінімізація цієї цільової функції за умов обмежень на швидкість, зусилля на кермо, а також можливі обмеження на траєкторії (наприклад, щодо перешкод чи дорожніх знаків). Це дає систему рівнянь, яку необхідно розв'язати для отримання оптимальних траєкторій.

Для отримання оптимальної траєкторії застосовуємо метод Лагранжа, що є стандартним підходом у задачах оптимального керування. Для цього вводимо функцію Лагранжа:

$$L = \int_0^T \ell(x, y, \dot{x}, \dot{y}, \theta, \dot{\theta}) dt, \quad (3)$$

де L – лагранжіан, що є функцією стану та швидкості, а також керівних параметрів. Для конкретної задачі ми використовуємо:

$$L = \alpha_1 \dot{x}^2 + \alpha_2 \dot{y}^2 + \alpha_3 v^2 + \alpha_4 \dot{\theta}^2. \quad (4)$$

Задача оптимізації полягає в пошуку таких значень швидкості та напрямку, які мінімізують функцію Лагранжа. Для цього використовуємо варіаційне обчислення й отримуємо систему рівнянь Ейлера – Лагранжа:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} &= 0; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} &= 0.\end{aligned}\quad (5)$$

Ця система рівнянь дає змогу визначити функції $x(t)$, $y(t)$ що описують оптимальну траєкторію руху транспортного засобу.

Для реалізації цього підходу в реальних умовах використовують чисельні методи розв'язання системи рівнянь (рис. 1.).

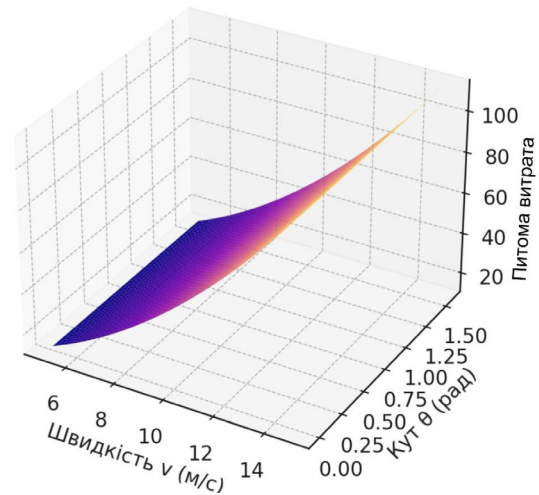


Рис. 1. Залежність зміни питомих витрат енергії від швидкості та кута переміщення

Це дає змогу врахувати складніші умови, як-от зміни дорожнього покриття, перешкоди на шляху, взаємодія з іншими транспортними засобами, а також варіації в дорожньому русі. Математична модель може бути розв'язана за допомогою алгоритмів оптимізації, як-от методи градієнтного спуску, генетичні алгоритми чи методи динамічного програмування.

Висновки. Проведене дослідження методів автоматичного налаштування траєкторії руху транспортних засобів засвідчує, що застосування сучасних математичних моделей та оптимізаційних алгоритмів може суттєво покращити управління рухом у складних умовах експлуатації. Розроблені моделі, базовані на класичних рівняннях руху та методах оптимізації, дають змогу точно визначити оптимальні параметри, як-от швидкість і кут напрямку, що сприяють мінімізації витрат енергії та забезпеченню стабільності траєкторії.

Аналіз отриманих графічних результатів, представлений у вигляді гістограм і 3D-поверхневих діаграм, наочно демонструє взаємозв'язок між ключовими параметрами системи, зокрема між швидкістю, кутом напрямку, питомими витратами енергії та значеннями цільової функції. Ці візуалізації підтверджують, що оптимізація керування рухом дає змогу досягти значного зниження енергоспоживання, підвищення безпеки та ефективності транспортних систем.

Отримані результати мають як теоретичне, так і практичне значення. Розроблені математичні моделі можуть бути інтегровані в сучасні інтелектуальні транспортні системи для автоматичного налаштування траєкторії руху, що допоможе адаптувати транспортні засоби до динамічно змінних дорожніх умов та забезпечити

стабільну й безпечну експлуатацію. Подальші дослідження в цій галузі можуть сприяти вдосконаленню алгоритмів оптимізації, інтеграції додаткових сенсорних систем та розробленню більш складних моделей, що враховують широкий спектр зовнішніх факторів.

Отже, впровадження методів автоматичного налаштування траєкторії руху сприятиме створенню ефективних, економічних і безпечних транспортних систем, що є ключовим чинником для подальшого розвитку інтелектуальних транспортних технологій.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ширяєв, О. В. Автоматизовані транспортні системи: навч. посіб. Київ : Вища школа, 2018. – 344 с.
2. Кузьмін В. М. *Інтелектуальні транспортні системи: принципи та технології*. Харків : Вид-во Харківського національного університету, 2020. 298 с.
3. Беляков, В. А., Мартинюк, О. О. Оптимізація руху транспортних засобів за допомогою інтелектуальних систем управління. Київ : НТУУ «КПІ», 2019. 185 с.
4. Лінькова В. О., Кармазін С. П. Розробка алгоритмів автоматичного керування рухом транспортних засобів на основі даних сенсорних систем. Харків : ХНУМГ, 2021. 142 с.
5. Левченко В. О., Бондаренко І. І. Автономні транспортні системи: від концепцій до реалізації. Київ : Видавництво НТУУ «КПІ», 2020. – 255 с.
6. Дубовик І. В. Інтелектуальні системи транспортного управління: монографія. Одеса : ОНУ ім. І. І. Мечникова, 2018. 312 с.
7. Перевозник І. В. Штучний інтелект в управлінні транспортними потоками. Харків : ХТУ, 2019. 180 с.
8. Кравчук С. В. Моделювання та оптимізація траєкторії руху автономних транспортних засобів. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2021. 215 с.
9. Васильєв О. І. Системи безпеки в автономних транспортних засобах. Дніпро : ДНУ, 2020. 197 с.
10. Пальчевський О. В. Оптимізація дорожніх маршрутів для автономного транспорту: монографія. Київ : НТУ, 2019. 162 с.
11. Дьяків С. І., Микитенко В. М. Технічні рішення для інтеграції автомобілів в інтелектуальну транспортну інфраструктуру. Харків : УІТУ, 2020. 220 с.
12. Ковальчук П. М. Інтелектуальні транспортні системи для ефективного управління рухом. Львів : ЛТЕУ, 2018. 148 с.
13. Смирнов В. І. Впровадження автономних транспортних систем в інфраструктуру міського транспорту. Київ : КПІ, 2021. 212 с.
14. Плотников О. І. Автономні транспортні засоби: теорія, методи, практики. Київ : Видавництво Університету, 2021. 320 с.

REFERENCES:

1. Shiryayev, O. V. (2018). *Avtomatyzovani transportni systemy: navchal'nyy posibnyk* [Automated Transportation Systems: A Tutorial]. Vyshcha shkola – High school, 344 p. [in Ukrainian].
2. Kuzmin, V. M. (2020). *Intelektual'ni transportni systemy: pryntsypy ta tekhnolohiyi* [Intelligent Transportation Systems: Principles and Technologies]. Vydavnytstvo Kharkivs'koho natsional'noho universytetu – Kharkiv National University Publishing House, 298 p. [in Ukrainian].
3. Belyakov, V. A., & Martynyuk, O. O. (2019). *Optymizatsiya rukhu transportnykh zasobiv za dopomohoyu intelektual'nykh system upravlinnya* [Optimization of vehicle traffic using intelligent control systems]. Natsional'nyy tekhnichnyy universytet "KPI" – National Technical University "KPI", 185 p. [in Ukrainian].
4. Linkova, V. O., & Karmazin, S. P. (2021). *Rozrobka alhorytmiv avtomatychnoho keruvannya rukhom transportnykh zasobiv na osnovi danykh sensorykh system* [Development of algorithms for automatic vehicle traffic control based on sensor system data]. Kharkivs'kyi natsional'nyy universytet mis'koho hospodarstva – Kharkiv National University of Urban Economy, 142 p. [in Ukrainian].
5. Levchenko, V. O., & Bondarenko, I. I. (2020). *Avtonomni transportni systemy: vid kontseptsiy do realizatsiyi* [Autonomous transportation systems: from concepts to implementation]. Vydavnytstvo NTUU "KPI" – Publishing House of NTUU "KPI" 255 p. [in Ukrainian].
6. Dubovyk, I. V. (2018). *Intelektual'ni systemy transportnoho upravlinnya: monohrafiya* [Intelligent transport management systems: monograph]. Odeskyi natsionalnyi universytet imeni I. I. Mechnikova – Odessa National University named after I. I. Mechnikov, 312 p. [in Ukrainian].
7. Perevoznik, I. V. (2019). *Shtuchnyy intelekt v upravlinni transportnykh potokamy* [Artificial intelligence in traffic management]. Kharkiv, Kharkiv Technical University, 180 p. [in Ukrainian].

8. Kravchuk, S.V. (2021). *Modelyuvannya ta optymizatsiya trayektoriyi rukhu avtonomnykh transportnykh zasobiv* [Modeling and optimization of the trajectory of autonomous vehicles]. Lviv, I. Franko National University of Lviv, 215 p. [in Ukrainian].
9. Vasylyev, O. I. (2020). *Systemy bezpeky v avtonomnykh transportnykh zasobakh* [Safety systems in autonomous vehicles]. Dnipro, DNU, 197 p. [in Ukrainian].
10. Palchevskyy, O.V. (2019). *Optymizatsiya dorozhnikh marshrutiv dlya avtonomnoho transportu: monohrafiya* [Optimization of road routes for autonomous transport: monograph]. Kyiv, Natsional'nyy transportnyy universytet – Kyiv, National Transport University, 162 p. [in Ukrainian].
11. Dyakiv, S.I., & Mykytenko, V.M. (2020). *Tekhnichni rishennya dlya intehratsiyi avtomobiliv v intelektual'nu transportnu infrastrukturu* [Technical solutions for integrating cars into intelligent transport infrastructure]. Kharkiv, UITU, 220 p. [in Ukrainian].
12. Kovalchuk, P.M. (2018). *Intelektual'ni transportni systemy dlya efektyvnoho upravlinnya rukhom* [Intelligent transportation systems for efficient traffic management]. Lvivs'kyi torhovelno-ekonomichnyy universytet – Lviv University of Trade and Economics, 148 p. [in Ukrainian].
13. Smyrnov, V.I. (2021). *Vprovadzhennya avtonomnykh transportnykh system v infrastrukturu mis'koho transportu* [Implementation of autonomous transport systems in urban transport infrastructure]. Natsionalnyy tekhnichnyy universytet “KPI” – National Technical University “KPI”, 212 p. [in Ukrainian].
14. Plotnikov, O.I. (2021). *Avtonomni transportni zasoby: teoriya, metody, praktyky* [Autonomous vehicles: theory, methods, practices]. Kyiv, Vydavnytstvo Universytetu – Kyiv, University Publishing House, 320 p. [in Ukrainian].