

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.9

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.100.0.37

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ШВИДКІСТЮ АВТОМОБІЛЯ

Біньковська А. Б.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Основною метою системи управління швидкістю є забезпечення безпеки на дорозі, підвищення ефективності транспортних засобів і зменшення негативного впливу транспорту на довкілля шляхом контролю швидкості руху. У роботі проведено математичне моделювання системи управління швидкістю.

Ключові слова: автомобіль, математичне моделювання, система управління, пропорційний регулятор, ПД-регулятор, швидкість.

Вступ

На сьогодні існує значна кількість моделей автомобілів, які задовольняють потреби різних покупців. Від спортивних автомобілів до вантажівок, від недорогих до розкішних – кожен може знайти автомобіль, що відповідає його потребам і бюджету.

Автомобіль є важливим транспортним засобом, що постійно вдосконалюється й адаптується до потреб ринку та вимог сучасності. Проте важливо знайти баланс між комфортом і безпекою.

Аналіз публікацій

Сучасний автомобіль – це транспортний засіб, що працює на двигуні внутрішнього згорання або на електричному двигуні, обладнаний для комфорту, безпеки та зручності для пасажирів.

Сучасні автомобілі оснащені різними технологіями, що поліпшують комфорт і безпеку пасажирів, зокрема: системи круїз-контролю, системи допомоги в паркуванні, системи попередження про зіткнення, системи допомоги під час руху в колоні, системи розпізнавання дорожніх знаків тощо.

Так, сучасний автомобіль є складним об'єктом, що містить чимало механічних і автоматичних систем.

Ці системи пов'язані між собою та залежать одна від одної.

Однією з основних систем є двигун, що відповідає за створення енергії, необхідної для руху автомобіля.

У роботі [1] викладені результати системних досліджень динамічних процесів безпечного руху автомобіля як керованої системи з розглядом різного типу аварійних ситуацій.

Автомобіль як об'єкт управління є багатовимірною динамічною системою з вектором вхідних керуючих впливів і з вектором змінних стану. Як вихід розглядається деяка узагальнена змінна, що відображає весь процес керування загалом. Отримано висновки прогнозу подальшого безпечного руху й виявлено причини створення аварійних ситуацій.

У роботі [2] запропоновано функціональну схему системи курсової стійкості з функцією розподілу гальмового зусилля, що ґрунтується на безплатформних інерційних системах. Безплатформні інерційні системи використовують обчислення кватерніонів для визначення орієнтації тіла в просторі. Кватерніони мають чотири параметри Родріга-Гамільтона, що можуть бути обчислені з достатньою точністю за допомогою простого алгоритму.

Автори роботи розробили алгоритми оцінювання поточних параметрів збуреного руху корпусу колісної машини в процесі термінового її гальмування. Ці параметри передбачають кут відхилення подовженої осі корпусу від заданого напрямку руху, кутову швидкість обертання корпусу та бічний зсув центру тяжіння корпусу щодо заданої траєкторії руху транспортного засобу.

На основі поточної оцінки перелічених параметрів автори розробили алгоритм стабілізації корпусу колісної машини в режимі термінового її гальмування. Цей алгоритм дає змогу підтримувати стабільну орієнтацію машини в просторі під час гальмування, що може бути важливо для безпеки й контролю машини.

У роботі [3] запропоновано принцип побудови системи керування підвіскою авто-

мобіля на основі феромагнітного амортизатора з використанням мікро-ЕОМ; розроблено модель керування підвіскою автомобіля з використанням феромагнітного амортизатора, що поліпшує параметри руху елементів підвіски в певних режимах із виконанням вимог щодо швидкодії та простоти реалізації. Запропонована модель дозволяє обрати критеріальні показники ефективності системи керування підвіскою автомобіля, що характеризують експлуатаційні властивості автомобіля та дають змогу здійснити вибір раціонального (ефективного) варіанта побудови системи керування.

Мета та постановка завдання

Застосування системи управління швидкістю може зменшити кількість аварій на дорозі та викиди в атмосферу, зменшуючи обсяг випусків вуглекислого газу від транспортних засобів. Однак важливо мати на увазі, що система управління швидкістю не є панацеєю та не може повністю замінити водія. Для безпечного й ефективного використання системи управління швидкістю водії мають залишатися уважними й дотримуватися правил дорожнього руху.

Мета роботи – провести математичне моделювання системи управління швидкістю автомобіля.

Завдання роботи: виконати моделювання системи управління швидкістю автомобіля з використанням пропорційного регулятора й ПД-регулятора.

Основна частина

Контроль швидкості є важливим аспектом безпеки на дорозі, оскільки швидкість є одним з основних факторів, що впливають на ймовірність виникнення аварії та на її наслідки. Зменшення швидкості руху дозволяє водіям завдяки тому, що є достатньо часу, зреагувати на непередбачувані ситуації, зупинитися на світлофорі та зменшити дистанцію до інших транспортних засобів.

Крім того, системи управління швидкістю допомагають підвищити ефективність транспорту, зменшуючи споживання палива та витрати на технічне обслуговування. Швидкість руху транспортних засобів є основним фактором, що впливає на споживання палива. Зменшення швидкості руху може допомогти знизити витрати на паливо й зменшити викиди шкідливих речовин в атмосферу.

Отже, основна мета системи управління швидкістю полягає в забезпеченні безпеки на

дорозі та підвищенні ефективності транспорту, зменшенні негативного впливу на довкілля шляхом контролю швидкості руху.

Система управління швидкістю автомобіля з використанням пропорційного регулятора

До зовнішніх сил, прикладених до тіла, додамо такі сили: силу тяги двигуна (передану через колеса) або гальмування (F_e) (в останньому випадку F_e негативна), аеродинамічну силу, що містить силу, обумовлену вітровим впливом (F_w), і проекцію сили тяжіння на поздовжню вісь автомобіля (F_h). Рівняння руху автомобіля відповідно до другого закону Ньютона можна записати у вигляді:

$$mx = F_e - F_w - F_h, \quad (1)$$

де m – маса автомобіля; x – переміщення; F_e – величина сили, для якої задані максимальне й мінімальне значення – максимальна сила тяги двигуна й максимальна сила гальмування, відповідно; F_w – аеродинамічна сила; F_h – проекція сили тяжіння.

Припустимо, що виконується співвідношення

$$-2000 \leq F_e \leq 1000 \text{ та } m = 1500 \text{ кг}. \quad (2)$$

Аеродинамічна сила (сила лобового опору) прямо пропорційна коефіцієнту лобового опору C_d , фронтальною площею автомобіля A і швидкісного натиску P , який визначається за формулою

$$P = \frac{\rho V^2}{2}, \quad (3)$$

де ρ – густина повітря; V – швидкість, що містить швидкість руху автомобіля.

Припустимо, що задано співвідношення

$$\frac{C_d A}{2} = 0,001, \quad (4)$$

і власний рух повітряного середовища (вітер) описується рівнянням

$$V_w = 20 \sin(0,01t), \quad (5)$$

так що аеродинамічна сила визначається за формулою

$$F_w = 0,001(x + 20\sin(0,01t))^2. \quad (6)$$

Потім припустимо, що поверхня дороги не є горизонтальною і кут між поздовжньою віссю автомобіля й горизонтальною площиною задається таким рівнянням:

$$\theta = 0,0093\sin(0,0001x). \quad (7)$$

Рівняння проєкції сили тяжіння запишемо у вигляді

$$F_h = 30\sin(0,0001x). \quad (8)$$

Для керування швидкістю автомобіля використовуємо пропорційний регулятор

$$F_c = K_e(x_{зад} - x), \quad (9)$$

де F_c – сила тяги (гальмування) двигуна; $x_{зад}$ – задана величина швидкості (м/с); K_e – коефіцієнт зворотного зв'язку.

У цьому випадку сила тяги автомобіля прямо пропорційна сигналу неузгодженості. Сила тяги двигуна (c) змінюється між найбільшим і найменшим значеннями та величина $K_e=50$.

Модель, подана у вигляді структурної схеми в системі *Simulink*, показана на рис. 1. Кінцевий час моделювання руху автомобіля задамо рівним 1000 С.

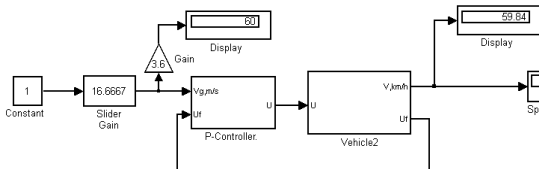


Рис. 1. Система управління швидкістю автомобіля з пропорційним регулятором

Вхідною змінною пропорційного регулятора є необхідна швидкість (м/с).

Рис. 2 зображує модель автомобіля, побудовану на основі залежностей (1)–(8).

Нехай бажана швидкість руху відповідає 60 км/год (близько 16,7 м/с). Розглянемо, як поводитиме себе система підтримки швидкості з П-регулятором.

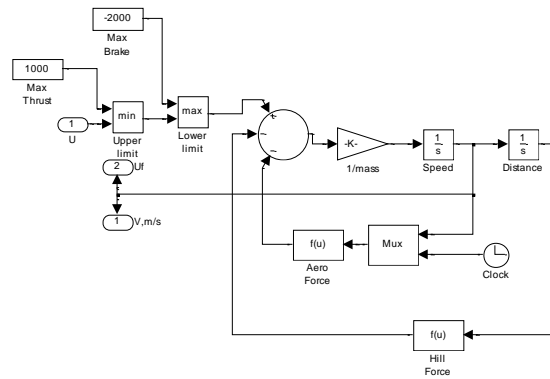


Рис. 2. *Simulink*-модель автомобіля

На рис. 3 наведені графіки, що відображають рух автомобіля, якщо значення коефіцієнта $K_e=40$, $K_e=50$ і $K_e=60$. Подальше підвищення коефіцієнта неможливе через обмеженість сили тяги F_e двигуна. Як видно з рисунка, за умови рівної дороги підвищення коефіцієнта зворотного зв'язку збільшує швидкість та точність системи управління, хоча нульової помилки досягти не вдається: якщо $K_e=100$, помилка дорівнює 1,31 км/год (приблизно 0,36 м/с). Утім, для більшості практичних завдань це досить висока точність.

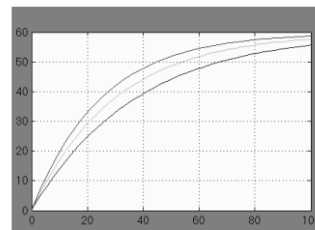


Рис. 3. Залежність швидкості автомобіля від коефіцієнта K_e

Врахуємо тепер, що поздовжній профіль автомобільної дороги не є горизонтальним, а визначається виразом (8). Залежність сили $Fh(t)$ зображена на рис. 4.

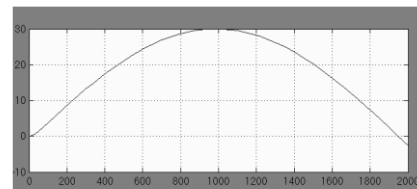


Рис. 4. Залежність сили опору $Fh(t)$

Роботу системи за таких умов ілюструє рис. 5. Як видно з цього рисунка, П-регулятор не справляється зі зміною сили опору руху, викликаним зміною геометрії профілю дороги.

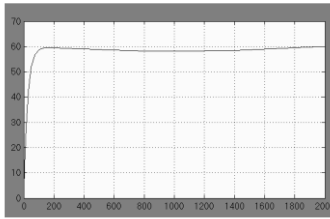


Рис. 5. Швидкість автомобіля за умови $K_e=60$ і $F_h(t)$, що визначається (8)

Синтез ПІД-регулятора для системи управління швидкістю

Недостатня якість роботи системи керування швидкістю руху автомобіля, що забезпечується П-регулятором, призводить до необхідності використовувати ПІД-регулятор.

ПІД-регулятори є найпоширенішими типами регуляторів у промисловій практиці. Така аббревіатура пояснюється тим, що ці регулятори містять канали, реалізують пропорційний, інтегральний і диференціальний закони регулювання.

ПІД-регулятор реалізує такий закон регулювання:

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (10)$$

і передавальну функцію

$$W(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (11)$$

Коефіцієнти K_p , K_i та K_d підлягають визначенню в процесі синтезу системи управління.

Розглянемо роботу системи з ПІД-регулятором.

Регулятор пропорційної дії формує вихідну змінну, яка пропорційна сигналу v і дорівнює

$$u_p = K_p \varepsilon. \quad (12)$$

Інтегральний складник ПІД-регулятора пов'язаний з точністю САУ в усталеному режимі та формує вихідну змінну у вигляді

$$u_i = K_i \int_0^t \varepsilon(t) dt. \quad (13)$$

Диференціальний складник ПІД-регулятора забезпечує випередження по фазі. Вихідна

мінлива цього складника пропорційна величині швидкості зміни сигналу помилки $\varepsilon(t)$:

$$u_d = K_d \dot{\varepsilon}. \quad (14)$$

Додамо до *Simulink*-моделі системи управління блок *NCD Output* (рис. 6).

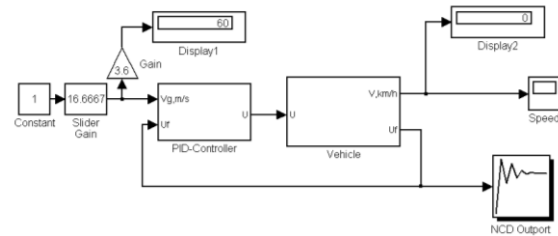


Рис. 6. *Simulink*-модель системи з блоком *NCD Output*

Підбір коефіцієнтів ПІД-регулятора проведемо в блоці *NCD*. Після закінчення процесу підбору коефіцієнтів отримаємо $K_p=300$; $K_i=0,025$; $K_d=150$.

Перехідна функція системи управління із зазначеними налаштуваннями наведена на рис. 7.

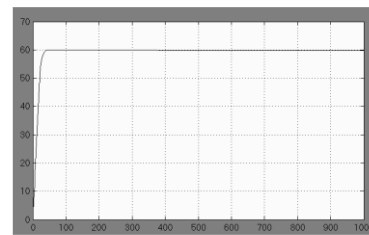


Рис. 7. Перехідна функція системи з оптимальними налаштуваннями

Отже, оптимізовані налаштування ПІД-регулятора забезпечують заданий час регулювання $tr \approx 40$ за умови практично відсутнього перерегулювання, що є повністю задовільною якістю роботи описаної системи.

Висновки

У роботі проведено математичне моделювання системи управління швидкістю автомобіля. Спочатку виконано синтез системи управління швидкістю автомобіля з використанням пропорційного регулятора. На другому етапі проведено синтез із використанням ПІД-регулятора. У процесі синтезу було виявлено, що система управління швидкістю з використанням ПІД-регулятора забезпечує заданий час регулювання за умови практично відсутнього перерегулювання.

Література

1. Математичне моделювання динамічних процесів безпечного руху автомобіля. URL: <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/3029> (дата звернення: 10.03.2023).
2. Математичне моделювання електронної системи курсової стійкості автомобіля / Є. Александров та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Автомобіля та тракторобудування: зб. наук. пр.* / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків: НТУ «ХПІ», 2021. № 1'2021. С. 3–11.
3. Синтез системи керування підвіскою автомобіля, побудованої на основі феромагнітного амортизатора. URL: <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/3209> (дата звернення: 10.03.2023)
4. Роль автомобіля в житті людини. URL: <http://www.ibra.com.ua/analytics/162164-rol-avtomobilya/> (дата звернення: 10.03.2023).
5. Decision making with the analytic hierarchy process. URL: <https://www.rafikulislam.com/uploads/resources/197245512559a37aadea6d.pdf> (дата звернення: 12.03.2023).
6. Guzzella L., Onder C. H. Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems. Springer Berlin Heidelberg, 2010. 354 p.
7. Cook J. A., Grizzle J. W., Sun J. Engine Control. The Control Handbook / William S. Levine, Ed. CRC Press, 1996. P. 1261–1274.

References

1. Matematychnе modelivannia dynamichnykh protsesiv bezpechnoho rukhu avtomobilia. URL: <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/3029> (last accessed 10.03.2023)
2. Aleksandrov, Y., Klymenko V., Leontiev D., Ternovyi M. (2021). Matematika-tychnе modelivannia elektronnoi systemy kursovoi stiikosti avtomobilia. *Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI». Serii: Avtomobile- ta traktorobuduvannia: zb. na-uk. pr.* Kharkiv, no. 1'2021, pp. 3–11.
3. Syntez systemy keruvannia pidviskoiu avtomobilia, pobudovanoi na osnovi feromagnitnoho amortyzatora. URL: <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/3209> (last accessed 10.03.2023).
4. Rol avtomobilia v zhytti liudyny. URL: <http://www.ibra.com.ua/analytics/162164-rol-avtomobilya/> (last accessed 10.03.2023).
5. Decision making with the analytic hierarchy process. URL: <https://www.rafikulislam.com/uploads/resources/197245512559a37aadea6d.pdf> (last accessed 12.03.2023)
6. Guzzella, L., Onder, C. H. (2010). Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion

Engine Systems. Springer Berlin Heidelberg. 354 p.

7. Cook, J. A., Grizzle, J. W., Sun, J. (1996). Engine Control. The Control Handbook / William S. Levine, Ed. CRC Press, pp. 1261–1274.

Біньковська А. Б., канд. техн. наук, доцент кафедри «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», Харківський національний автомобільно-дорожній університет, binkovska@khadi.kharkov.ua, тел. +380(50)301-87-46.

Mathematical modeling of the car speed control system

Abstract. Problem. Speed control systems are used to ensure road safety and improve vehicle efficiency by controlling traffic speed. The main purpose of the speed control system is to ensure road safety, increase vehicle efficiency and reduce the negative impact of transport on the environment by controlling the speed of traffic. Reducing speed allows drivers to react in time to unforeseen situations, stop at traffic lights, and reduce the distance to other vehicles. In this paper, we have carried out mathematical modeling of a vehicle speed control system. **Goal.** As a result of the analysis, the purpose of the study was highlighted: to carry out mathematical modeling of the car speed control system. Job tasks: to model the speed control system using a proportional regulator and a PID controller. **Methodology.** Initially, we considered a vehicle speed control system using a proportional regulator. In the process of synthesis, it was found that the use of a P-controller provides insufficiently good quality of the vehicle speed control system. It was decided to use a PID controller to synthesize the speed control system. **Results.** The result of the study is: optimized settings of the PID controller provide a given control time $t_p \approx 40$ s with practically no overshoot, which is a completely satisfactory quality of this system. **Originality.** The originality lies in the fact that a PID controller with an NCD block was used to determine the transient function of the system with optimal settings. **Practical value.** The use of the proposed results indicates the possibility of using a PID controller to ensure the set parameters.

Keywords: automobile, mathematical modeling, control system, proportional regulator, PID controller, speed.

Binkovska Anzhela – Associate Professor, PhD, Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Kharkiv National Automobile and Highway University, binkovska@khadi.kharkov.ua, tel. +380(50)301-87-46.