

УДК 629.017

Д.І.Петренко, М.В.Дячук
РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ЕКСТРЕНОГО ГАЛЬМУВАННЯ
ЛЕГКОВОГО АВТОМОБІЛЯ

Розглядаються питання побудови імітаційної моделі системи екстреного гальмування (система типу BAS) легкового автомобіля в середовищі імітаційного моделювання Simulink/Simscape. Головним виконавчим елементом є активний підсилювач гальм з електромагнітним клапаном. Виконано тестування імітаційної моделі та порівняні результати гальмування при натисканні на гальмівну педаль водієм та при роботі системи екстреного гальмування.

Ключові слова: система екстреного гальмування, імітаційне моделювання.

Рис 16. Літ 6.

Д.И.Петренко, М.В.Дячук
РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭКСТРЕННОГО
ТОРМОЖЕНИЯ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Рассматриваются вопросы построения имитационной модели системы экстренного торможения (система типа BAS) легкового автомобиля в среде имитационного моделирования Simulink / Simscape. Главным исполнительным элементом является активный усилитель тормозов с электромагнитным клапаном. Выполнено тестирование имитационной модели и сравнение результаты торможения при нажатии на тормозную педаль водителем и при работе системы экстренного торможения.

Ключевые слова: система экстренного торможения, имитационное моделирование.

D.Petrenko, M.Dyachuk
SIMULATION MODEL DEVELOPMENT OF CAR'S SYSTEM EMERGENCY BRAKING

The questions of car's emergency braking system's (system type BAS) simulation development by means Simulink/Simscape software are considered. The problem of vehicle's automated braking drive simulation's development consists in the necessity to integrate and concordance it with a model of vehicle's dynamics. In this case a vehicle's braking system should run either from the driver's feet either with activated emergency braking system.

The research aim is methodological and consists in general approaches development of modern mechatronic devices' design in automotive industry, and also, actually, in simulation development of universal emergency braking system where the active brake booster may be used in ESP system simulation.

The Emergency Braking System simulation is performed for an example of car Audi A4. Imitations of car's braking are performed in two modes: the first is what a driver presses the pedal system when BAS is switch off, the second case regards an activated BAS system. The test conditions are: maximum pedal force is about 30 N, initial speed is 80 km/h and the coefficient of tire grip is 0.9.

The results demonstrate simulation efficiency of car's braking dynamics with BAS system. Braking distance reduced by 2.2 m in comparison with braking without emergency braking system. Also, the BAS-typical system can functioning without driver's intervention by ESP system's sensor activation (or other active safety systems).

Before the model's analysis it's necessary to accent that each basic block may consist of structural elements with a few parameters. A multiparametrical model can be a disadvantage in case of necessity of agreement all the subsystems among themselves, and an advantage simultaneously. The model's parameterization could create conditions for improvement and acceleration of engineering in the field of motor car's active safety systems.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день системи безпеки стали невід'ємною частиною автомобіля. Системи типу ABS/ESP стали обов'язковими для всіх нових автомобілів. Тенденція інтелектуалізації автотранспортних засобів призвела до появи нових систем безпеки (системи типу ADAS –Advanced Driver Assistance Systems). За складом системи майже однакові, але алгоритми роботи визначають функціональність та надійність всієї системи.

Розробка та тестування алгоритмів мехатронних систем керування пов'язано з використанням точних та швидких імітаційних моделей контрольованих об'єктів. Таким чином, модель гальмівної динаміки автомобіля з системою екстреного гальмування повинна бути універсальною, тобто мати можливість параметризації і можливість інтеграції з іншими системи активної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У вітчизняних роботах [1, 2] представлені математичні моделі гальмівних апаратів та результати експериментальних досліджень. Щодо, систем активної безпеки, то на вітчизняному просторі не спостерігаються розробки в даному напрямку. Зарубіжні науковці представляють свої розробки досить стисло, не розкриваючи в повній мірі теорію [3, 4], що не дозволяє в повній мірі оцінити роботу.

Невирішені раніше частини загальної проблеми. Проблема розробки моделі автоматизованої гальмівної динаміки автомобіля полягає у необхідності інтегрування та узгодження її з моделями апаратів гальмівної системи. Гальмівна система автомобіля в даному випадку повинна працювати як від ноги водія, так і з активованою системою екстреного гальмування.

Дана розробка базується на раніше розробленій моделі гальмівної динаміки легкового автомобіля з урахуванням технічних параметрів гальмівної системи [5].

Мета дослідження. Головною метою даної роботи є складання Simscape-моделі гальмівної динаміки легкового автомобіля з системою екстреного гальмування (типу BAS – Brake Assist System). Додаткова мета - розробити алгоритм керування соленоїдом.

Матеріали досліджень. Загальна Simulink/Simscape модель гальмівної динаміки з урахуванням моделі гальмівної системи представлена на рис. 1. У блоці 1 формуються умови гальмування, що передбачають вид закону зусилля на гальмівній педалі, активацію системи BAS та сигнал від сенсору системи активної безпеки. Блок 2 вміщує поточні результати та вихідні дані. Налаштування розрахункової точності забезпечується блоком конфігурації вирішувача 3. Центральним блоком, що описує динамічний стан транспортного засобу, є блок 4 - кузов автомобіля. Порт **H** блоку під'єднується до аналогічних портів блоків 6-9 шин коліс, завдяки чому утворюється плоска чотириколісна модель. Порт **NF** передає фізичний сигнал нормальної сили до портів **N** на колеса 6, 7 передньої осі; аналогічно порт **NR** - до портів **N** на колеса 8, 9 задньої осі. Порт **beta** призначений для вводу кута підйому, який задається у блоці 18 - константа - та через блок 19 конвертується у фізичний сигнал. Порт **W** дозволяє вводити швидкість потоку аеродинамічного опору, що у даному випадку дорівнює швидкості руху автомобіля з порту **V**. Вирахуваний фізичний сигнал швидкості транспортного засобу конвертується блоком 20 у Simulink-сигнал. Блок похідної 21 дозволяє сформувати у блок бездротової передачі 22 сповільнення, у блок 23 - швидкість руху, через інтегратор 24 - зупинний шлях у блок 25. Досягнення значення швидкості, близького до 0, перевіряється блоком 26, та у разі виконання умови блок 27 зупиняє калькуляції. Ковзання шин коліс передньої та задньої осей передаються з портів **S** блоків 7, 9 через конвертори 10, 12 до блоків 11, 13 бездротової передачі даних. Зусилля нормальних реакцій осей передаються з портів **N** блоків 6, 8 через конвертори 14, 16 до блоків 15, 17 бездротової передачі даних. Порти **A** блоків коліс 6-9 сходяться до відповідних портів блоку 5, яким представлено гальмівну систему.

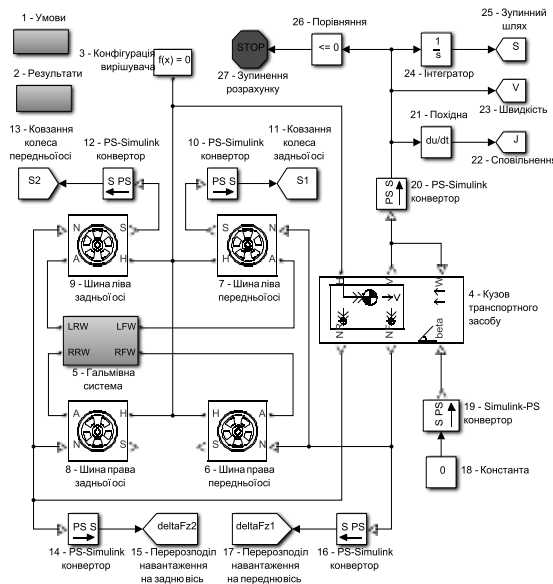


Рис. 1. Загальний вид Simscape-моделі системи екстреного гальмування (BAS) легкового автомобіля.

Розглянемо структуру модель гальмівної системи (рис. 1, поз. 5). Гальмівний вузол 1 об'єднує у собі гальмівну педаль, вакуумний підсилювач, головний гальмівний циліндр (ГГЦ). Секції ГГЦ через блок 2 X-з'єднання роздають тиск у гідравлічні контури діагональної системи.

Елементи 3, 11, 17, 19, 27, 29 – гідравлічні трубопроводи – дозволяють враховувати властивості руху рідини та представляють частину металевих трубопроводів. Блоки 4, 12, 18, 20, 28, 30 дозволяють врахувати місцевий опір, обумовлений закругленням трубопроводів. Елементи 5, 13, 21, 31 – гідравлічні трубопроводи – мають еластичні стінки та представляють гнучкі трубопроводи, що під'єднуються до колісних дискових гальмівних механізмів 6, 14, 22, 32. Обертальні демпфери 7, 15, 23, 33 імітують опір у підшипниках кочення відносно механічних обертальних систем відліку 8, 16, 24, 34. Порт **W** блоків дискових гальмівних механізмів 6, 22 дозволяє виводити фізичний сигнал кутової швидкості коліс: передніх – через конвертор 9 у блок 10, задніх – через конвертор 25 у блок 26. Під'єднання до осей коліс забезпечується вихідними портами: 1 – LFW – ліве переднє колесо, 2 – RFW – праве переднє колесо, 3 – LRW – ліве заднє колесо, 4 – RRW – праве заднє колесо.

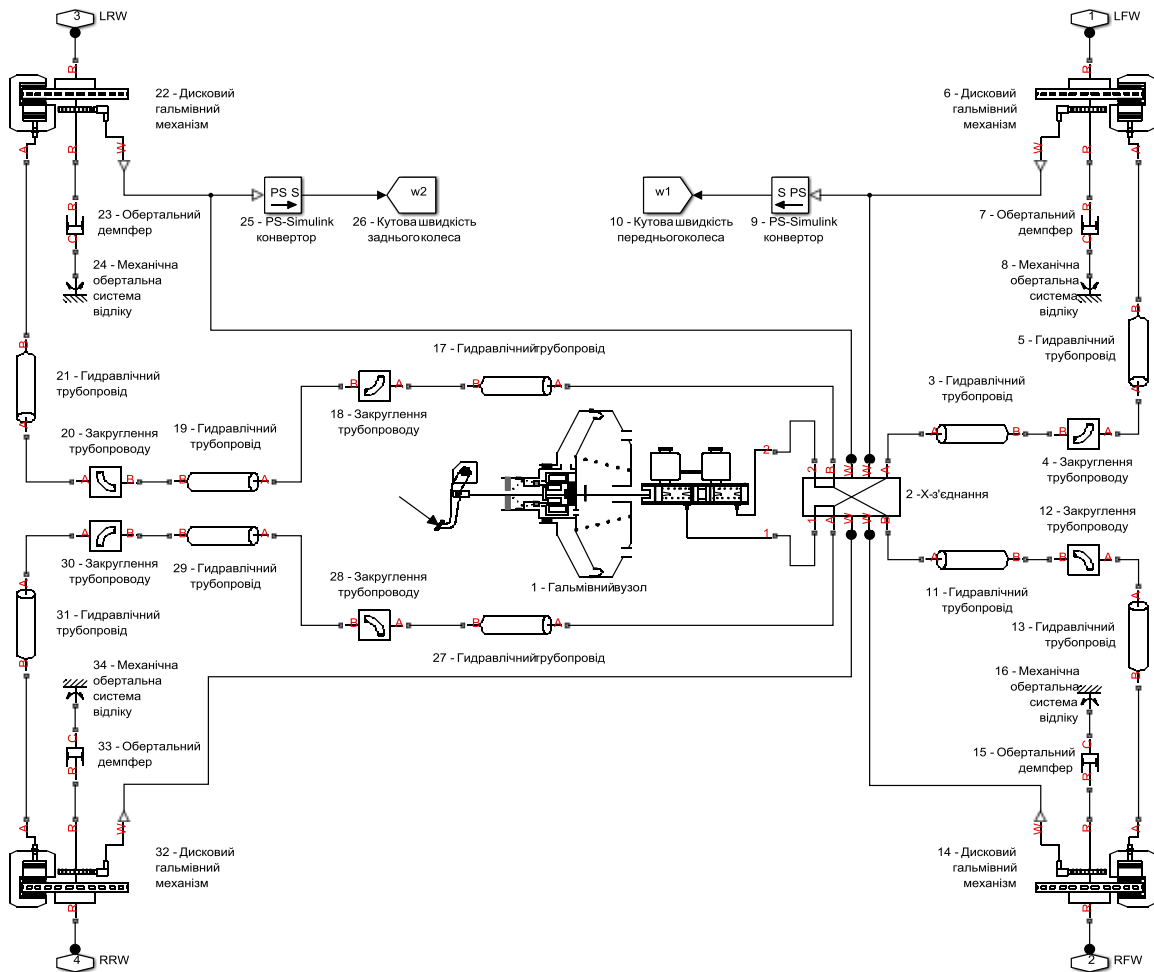


Рис. 2. Simscape-модель гальмівної системи з BAS.

На рис. 3 представлена структурна Simscape модель дискового гальмівного механізму з плаваючою скобою (рис. 2, поз. 6, 14, 22, 32). Рідина подається через вхідний порт 1 до колісного циліндру. Локальні втрати тиску з-за миттєвої зміни площини враховуються блоком 2. Після цього рідина надходить до порту **A** циліндру 3, а також до порту **A** блоку 6 – тертя у циліндрі, що імітує роботу манжети. Порт **B** блоку 6 під'єднаний до гідравлічної системи відліку 4, що забезпечує атмосферний тиск [6]. Зсув відбувається завдяки з'єднанню однойменних механічних портів **C** та **R** відповідно блоків циліндру 3 та тертя 6. Поступальна пружина 7 забезпечує повернення поршню у нейтральний стан, а поступальний жорсткий зупинник 8 обмежує його граничні позиції. Маса поршню задається у блоці 5. Через конвертор 9 сигналу хід поршню бездротовою передачею транслюється у вихідні дані через блок 10. Гальмівні колодки з накладками представлені у

моделі симетрично. Поступальні жорсткі зупинники 11 та 34 забезпечують зазори між натискними елементами та колодками. Механічні поступальні системи відліку 12, 27, 29, 30, 33, 35, 53 - позначають нерухливий супорт гальмівного механізму. Поступальні жорсткі зупинники 13 та 36 обмежують відхід колодок при розгальмуванні механізму. Власне колодки з накладками позначаються масами 14 та 37. Ідеальні сенсори поступального руху 15 та 38 дозволяють відстежити деформації накладок (через конвертор 16 до блоку запису сигналу 17) та проконтролювати симетричність навантаження. Пружні властивості накладок моделюються блоками 20 та 41 – поступальна пружина, поглинаючі властивості – блоками 18 та 39 – поступальний демпфер, а блоки 19, 40 – поступальний жорсткий зупинник – обмежуються деформації накладок.

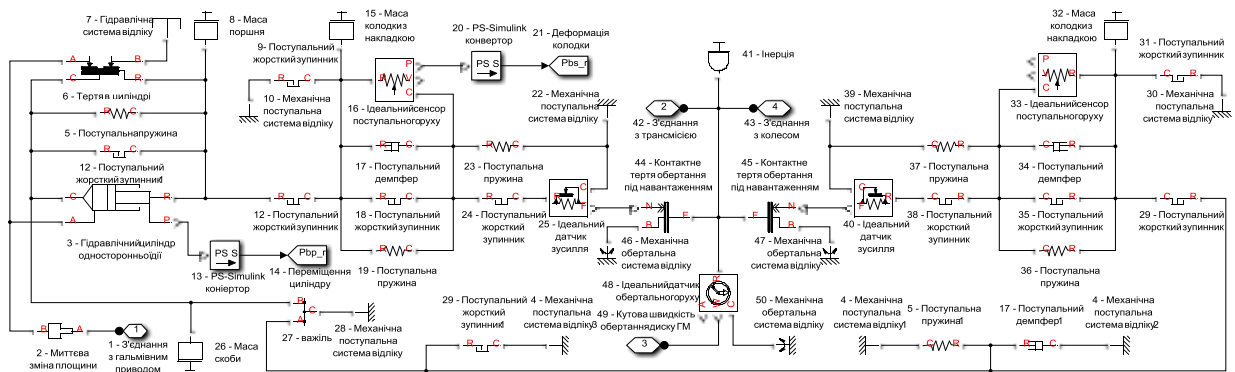


Рис. 3. Simscape-модель дискового гальмівного механізму з плавачою скобою.

Як видно, рух складових дискового гальма відбувається у протилежних напрямках. Тобто, сам циліндр 3 разом зі скобою мають сукупну масу 25. Важіль 26 забезпечує зміну напрямку передачі зусилля на праву сторону. Обмеження пересування скоби відносно супорту забезпечується поступальним жорстким зупинником 28. Поступальна пружина 31 і поступальний демпфер 32 моделюють пружно-дисипативний зв'язок з супортом механізму.

Поступальні жорсткі зупинники 23 та 43 забезпечують наявність зазору між накладками та диском, відведенню накладок слугують поступальні пружини 22 та 42.

Власне диск моделюється сенсорами 24 та 44, фіксованими відносно нерухливих систем відліку 21 та 45. Сигнали нормальних зусиль подаються на порти N блоків 46, 47 – контактне тертя обертання під навантаженням. Порти B фіксовані відносно механічних обертальних систем відліку 48, 49. Порти F об'єднані обертним зв'язком з сенсором обертального руху, з порту W якого через вихід 52 знімається кутова швидкість обертання диску інерцією 50. Елементи трансмісії під'єднуються до порту 54, а з'єднання з колесом відбувається через порт 55.

Модель складного гідравлічного блоку («Гідравлічний вузол»), що позначений позицією 1 на рис. 2, представлений та описаний в іншій статті, як активний підсилювач. Модель складається з моделі гальмівної педалі, головного гальмівного циліндру та активного підсилювача, що приводиться в дію електромагнітним клапаном.

На рис. 4 представлена модель під маскою електронного блоку керування (ECU), що позначений позицією 6 на рис. 4. Через блоки 1, 2, 3, 7 бездротової передачі сигнали від сенсорів переміщення педалі, швидкості переміщення педалі, сенсору системи активної безпеки та активатору системи BAS відповідно передаються до логічного контролеру 8. Блоки 4, 5, 6 затримують вхідні сигнали згідно запізнювання часу на його отримання та опрацювання. У логічному контролері згідно з потоком подій приймається рішення про необхідне значення напруги у електричному контурі. У блоці 9 відбувається кодування аналогового сигналу у широкоімпульсну модуляцію (ШІМ). Електричний контакт "+" 10 дозволяє підключитися безпосередньо до ланцюга соленоїду.

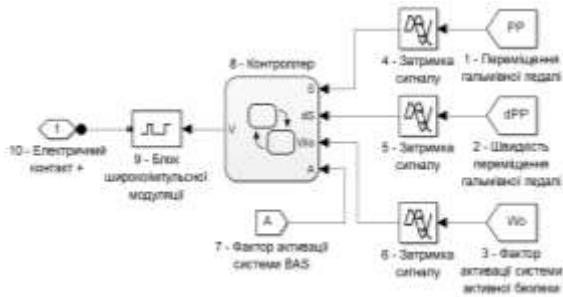


Рис. 4. Модель блоку ЕБК (ECU) соленоїду.



Рис. 5. Структурна Stateflow модель логічного контролера (рис. 4, поз. 9).

Розглянемо логічну Stateflow модель контролера (рис. 4, поз. 8), що розгорнута на рис. 5. При запуску моделі системи блок **Activator** активується, а разом із ним по замовчуванню – стан **Off** (вимкнено), при цьому значення напруги V дорівнює 0. Для переходу у стан **On** (ввімкнено) необхідно, щоб почався хід педалі ($S > 0.001$) або спрацював критерій Wo системи активної безпеки і при цьому система була активованою (фактор $A=1$). Після активації стану **On** одночасно по замовчуванню активується і стан **Low_voltage** (низька напруга), який генерує значення 4 В. Цього достатньо, щоб викликати збудження магнітного поля у котушці соленоїду, але недостатньо для його активації. При умові, що швидкість переміщення педалі $dS > 0,15$ м/с або спрацюванні критерію Wo , здійснюється перехід до активної фази стану **Hi_voltage** (висока напруга), який генерує значення 12 В. Після необхідного часу реагування, якщо швидкості руху педалі майже нема ($dS \leq 0,15$ м/с) та водночас немає перевищення критерію системи активної безпеки, знову активується стан **Low_voltage**. Тільки коли педаль повертається у початкове положення та Wo дорівнює нулю, активується стан **Off** (вимкнено), а стан **On** дезактивується. При цьому вихідна напруга становиться рівною 0.

Таким чином, алгоритм активується двома способами: безпосередньою участю водія при критичній швидкості переміщення педалі, та незалежно від водія при перевищенні граничного значення сигналу від сенсора системи активної безпеки, наприклад ESP.

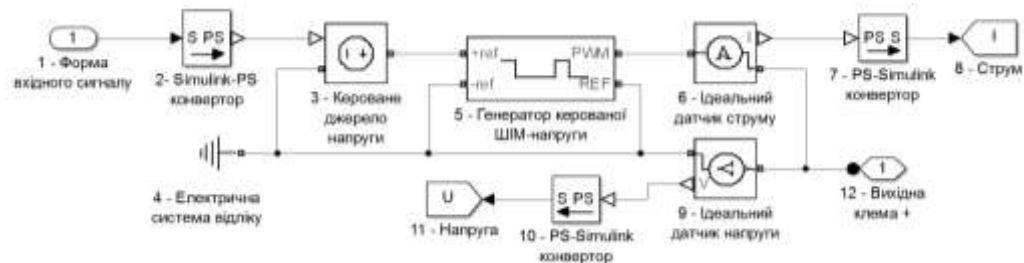


Рис. 6. Структурна Simulink/Simscape модель ШІМ-модулятора (рис. 4, поз. 10).

Розглянемо ШІМ-блок. Необхідна амплітуда напруги від логічного контролера приходить у блок 1 - форма вхідного сигналу. У конверторі 2 сигнал набуває розмірності та подається у порт блоку керованого джерела напруги 3. Порт "-" підключено до маси блоком електричної системи відліку 4. Порт "+" підключений до порту **+ref** блоку генерації ШІМ-напруги 5, а порти **-ref** та **REF** – до маси 4. Порт **PWM** (pulse width modulation) генерує ШІМ-сигнал, струм якого оцінюється сенсором 6, а напруга – сенсором 9. Значення струму та напруги після конвертації у віртуальні сигнали (блоки 7, 10) виводяться до загальних вихідних даних через блоки бездротової передачі 8, 11 відповідно.

Результати досліджень. Для перевірки ефективності запропонованої моделі виконаємо імітацію гальмівної динаміки легкового автомобіля з системою BAS в двох режимах. В якості об'єкту моделювання був вибраний легковий автомобіль Audi A4. Умови тестування: початкова швидкість – 80 км/год; коефіцієнт зчеплення шин з дорогою – 0,9.

Перший тест полягає в імітації екстремного гальмування автомобіля від зусилля водія на педалі. Закон зусилля на педалі представлений на рис. 7. Як видно зусилля в даному випадку має швидкий характер наростання и не перевищує приблизно 30 Н. Цього зусилля достатньо лишу

щоб відкрити атмосферний клапан (рис. 8). Тиск у гальмівних контурах в даному тесті досягає 7 МПа (рис. 9), що дозволяє отримати гальмівний шлях рівний 48,4 м (рис. 10).

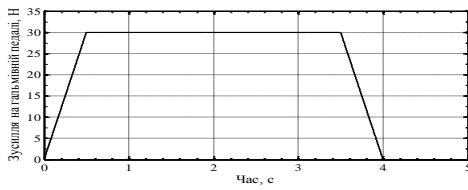


Рис. 7. Графік закон зусилля на педалі.

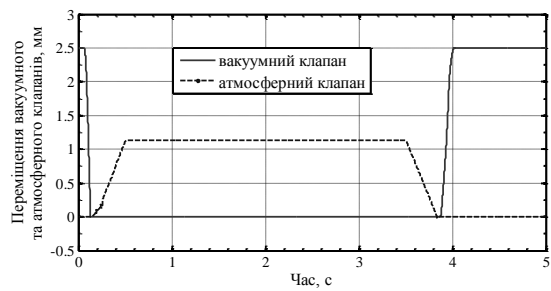


Рис. 8. Графік переміщення вакуумного та атмосферного клапанів.

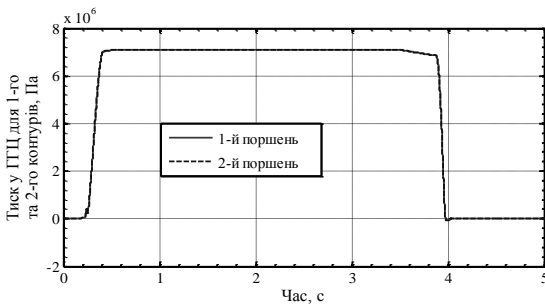


Рис. 9. Графік тиску ГГЦ для 1-го та 2-го контурів.

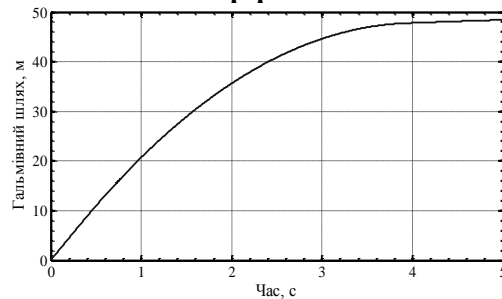


Рис. 10. Графік гальмівного шляху.

Другий тест – з активною системою екстренного гальмування. Закон зусилля на педалі аналогічний. Система екстренного гальмування реагує на швидкість переміщення гальмівної педалі. На графіку (рис. 11) видно, що швидкість переміщення гальмівної педалі досягає 0,15 м/с. На рис. 12 та 14 видно відкриття атмосферного клапану за допомогою переміщення соленоїда. Сила струму досягає 1,5 А (рис. 13) для активації та переміщення соленоїда. При цьому величина тиску у гальмівних контурах не змінилась у порівнянні з першим тестом, але характеристика зростання тиску стала більш різка (рис. 15). Гальмівний шлях становить 46,2 м (рис. 16).

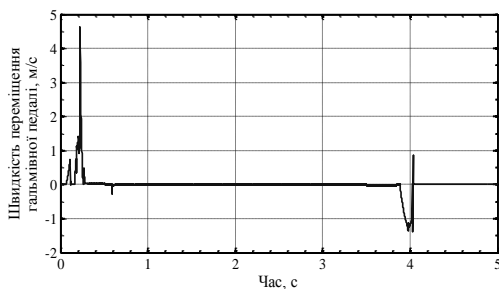


Рис. 11. Графік швидкості переміщення педалі.

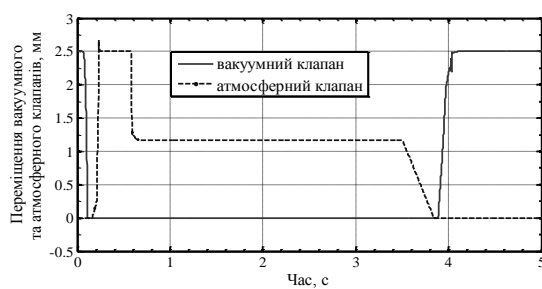


Рис. 12. Графік переміщення вакуумного та атмосферного клапанів

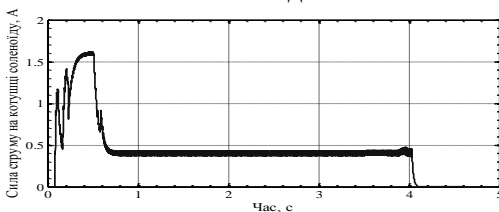


Рис. 13. Графік сили струму на котушці соленоїду.

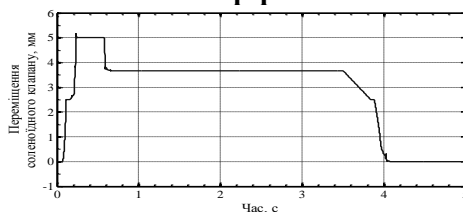


Рис. 14. Графік переміщення соленоїдного клапану.

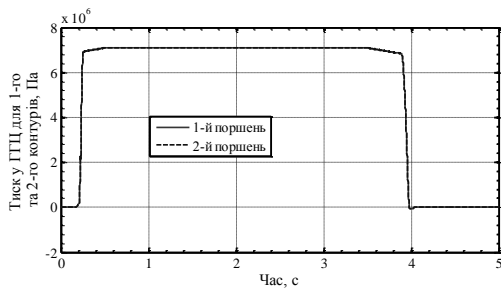


Рис. 15. Графік тиску ГГЦ для 1-го та 2-го контурів.

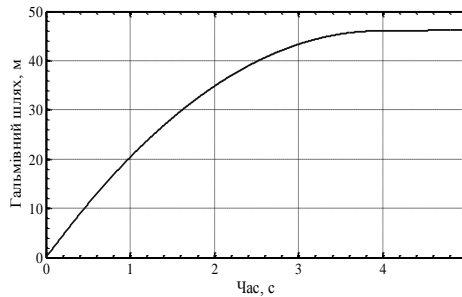


Рис. 16. Графік гальмівного шляху.

Висновки. Результати моделювання демонструють ефективність імітаційної моделі гальмівної динаміки легкового автомобіля з системою типу BAS. Гальмівний шлях зменшився на 2,2 м у порівнянні з гальмуванням без системи екстреного гальмування. Також система типу BAS може функціонувати без втручання водія, за допомогою активації від датчика системи типу ESP (або іншої системи активної безпеки).

При аналізі моделі необхідно помітити, що кожен базовий блок, з яких складаються структурні елементи, має декілька параметрів. Багатопараметричність моделі виступає як недоліком при узгодженні всіх підсистем між собою, так і перевагою – параметризація моделі створить умови для прискорення та удосконалення інжинірингу в сфері систем активної безпеки легкового автомобільного транспорту.

1. Автомобили: Конструкция, конструирование и расчет. Системы управления и ходовая часть: Учеб. пособие для вузов / А.И. Гришкевич, Д.М. Ломако, В.П. Автушко и др.; Под ред. А.И. Гришкевича. – Мн.: Выш. шк., 1987. – 200 с.: ил.
2. Метлюк Н.Ф., Автушко В.П. Динамика пневматических и гидравлических приводов автомобилей. – М.: Машиностроение, 1980. – 231 с., ил.
3. R. Rajamani. Vehicle dynamics and control. Mechanical engineering series. – USA, New York: Springer science + Business Media Inc., 2006. – 485 p. – ISBN 0-387-26396-9.
4. B.T. Fijalkowski. Automotive mechatronics: Operational and practical issues. Volume 1. INTELLIGENT SYSTEMS, CONTROL, AND AUTOMATION: SCIENCE AND ENGINEERING. – Springer science + Business Media B.V. 2011. – 612 p. – ISBN 978-94-007-0408-4.
5. Петренко Д.І. Моделювання гальмівної динаміки легкового автомобіля з урахуванням імітаційної моделі гальмівної системи / Збірник наукових праць: Вісник Севастопольського національного технічного університету. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. Вип. 143 – Севастополь: СевНТУ, 2013, С. 176 – 180.
6. Simscape examples. [Електронний ресурс]. – 2013. – Режим доступу: <http://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/examples/index.html>.

Стаття надійшла до редакції 13.04.2014