

УДК 629.113 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.67.13

**В.Г. Мазанов, А.І. Самсоненко, С.С. Лукашенко***Національна академія Національної гвардії України***ПРОБЛЕМИ ПОБУДОВИ АДЕКВАТНИХ МОДЕЛЕЙ РОБОЧИХ ГАЛЬМІВНИХ СИСТЕМ АВТОМОБІЛІВ З АБС**

*У статті досліджується модель системи антиблокування коліс автомобіля при різних умовах експлуатації. Запропоновано шляхи вирішення проблеми відповідності математичної моделі реальним умовам експлуатації антиблокувальної системи гальм автомобіля.*

*Ключові слова:* автомобіль, антиблокувальна система гальм, модель, Simulink, колесо.

**В.Г. Мазанов, А.І. Самсоненко, С.С. Лукашенко***Национальная академия Национальной гвардии Украины***ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ АДЕКВАТНЫХ МОДЕЛЕЙ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ АВТОМОБИЛЕЙ С АБС**

*В статье исследуется модель системы антиблокировки колес автомобиля при различных условиях эксплуатации. Предложены пути решения проблемы адекватного соответствия математической модели реальным условиям эксплуатации антиблокировочной системы тормозов автомобиля.*

*Ключевые слова:* автомобиль, антиблокировочная система тормозов, модель, Simulink, колесо.

**V.G. Mazanov, A.I. Samsonenko, S.S. Lukashenko***National Academy of National Guard of Ukraine***PROBLEMS OF BUILDING ADEQUATE MODELS OF BRAKING SYSTEMS OF CARS WITH ABS**

*The article examines the model of the anti-blocking system of the car wheels under various operating conditions. The ways of solving the problem of adequate compliance of the mathematical model with the actual operating conditions of the anti-lock braking system of the car are proposed.*

*Keywords:* car, anti-lock brakes, model, Simulink, wheel.

**Постановка проблеми.** За останній час Національна гвардія України активно оновлює і модернізує парк автотранспортних засобів. При їх експлуатації значна увага звертається на сектор безпеки дорожнього руху. Однією з важливих систем управління, що відповідає за безпеку експлуатації автотранспортних засобів є система ABS (Anti-lock braking system) - антиблокувальна система гальм. За оцінками зарубіжних фахівців, системи ABS і ESP здатні скоротити загальне число ДТП з тілесними ушкодженнями на 32%, а в умовах обмерзання та снігових заметів - на 38%. Завдяки цим системам істотно вдалося підвищити загальний рівень безпеки дорожнього руху. Це щорічно рятує життя кільком десяткам тисяч людей у всьому світі [12]. Тому дослідження алгоритмів роботи даної системи при експлуатації автомобілів з ABS і модернізація старих моделей шляхом її установки є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При проведенні випробувань моделей робочих гальмівних систем автомобілів з використанням віртуально-фізичною технології моделювання [1-10], виникає питання його оцінки, тобто тотожності створеної моделі та фізичного об'єкту. Для цього застосовуються різні способи, математичного та фізичного моделювання процесу гальмування автомобіля обладнаного системою ABS. Не завжди в цих моделях робота система ABS співпадає з реальним процесом гальмування автомобіля.

Правильною моделлю системи можна вважати модель, яка дозволяє максимально точно відобразити реальний процес. Для досягнення такого рівня точності необхідно мати чітку мету моделювання.

Дана стаття досліджує основні проблеми моделювання системи ABS автомобіля, які допоможуть забезпечити адекватність моделі, що розробляється. У статті розглянуті наступні питання:

- вибір середовища і методу моделювання;
- фізика роботи модельованої системи;
- можливість виявлення та відкидання неприйнятних результатів моделювання;
- перевірка результатів моделювання;
- перелік обмежень та допусків в розробленій моделі.

У статті для аналізу розглядаються моделі, вибір і допущення в яких зроблені на ранніх стадіях моделювання антиблокувальної системи автомобіля [1-3]. Також показані методи обробки даних в різних режимах роботи антиблокувальної системи автомобіля.

**Мета статті** – дослідити можливість максимально наближеного до реального процесу побудови математичної моделі системи ABS автомобіля при різних режимах експлуатації.

**Виклад основного матеріалу.** Середовище моделювання Simulink дає можливість моделювати на системному рівні поетапно (зверху вниз) або використовувати зворотню деталізацію (від низу до верху). На початковому етапі визначається, яким чином буде організована модель. У моделі системного рівня, інтерфейси між компонентами встановлюють з поступовою розробкою їх функціоналу. При розробці знизу вгору по окремих вузлах, модель збільшується і ускладнюється.

З фізичних елементів складається фізично-обумовлена модель, в графічній мові елементи з'єднуються між собою зв'язками, кожна з яких представляє собою передачу фізичної величини (момент, сила, прискорення і т.д.). Прикладами таких систем є LMS Amesim фірми Siemens, SimulationX, Dymola, OpenModelica, Matlab Simulink (SimScape, SimMechanics, SimDriveLine і т.і.) [12]. Кожна з цих фірм відрізняється набором бібліотек. Всі продукти побудовані на основі мови Modelica і набули широкого поширення. У даних продуктах генерується система алгебро-диференціальних рівнянь, яка потім перетворюється в компільований вихідний текст, для побудови разом з чисельними методами моделі процесів. Недолік цього підходу полягає в тому, що, незважаючи на глибину і детальність моделі, її структура залишається прихованою, що ускладнює вирішення завдання синтезу алгоритмів керування. На підставі подібної моделі, необхідно попередньо лінеаризувати цю модель в області робочої точки. Тому в даній роботі використовується другий підхід, пов'язаний з включенням додаткових блоків контролю результатів моделювання процесу гальмування автомобіля обладнаного системою ABS.

Опис автотранспортного засобу (АТЗ) безпосередньо у вигляді системи рівнянь, де з елементів формується текстовий або графічний опис, і в правій частині вибираються інтегратори для формування системи диференціальних рівнянь. Такий підхід називається математично обумовленим і пропонує безпосередньо вирішувати систему алгебро-диференціальних рівнянь засобами математичних пакетів: Matlab Simulink, VisSim, Scilab, Octave. У даній роботі дослідження проводилися з використанням програми Matlab Simulink.

Для досягнення точності в моделі необхідно налаштувати параметри моделювання так, щоб отримати прийнятні результати. Наприклад, вибравши відповідні налаштування допуску по кроку змінних, потрібно знаходити компроміс між продуктивністю моделі і прийнятною точністю розрахунку. Для точної настройки параметрів потрібно зрозуміти природу і динаміку фізичної системи.

Неможливо знати динаміку складної системи з сотнями або тисячами компонентів, поки не підключені всі компоненти і не змодельована вся модель. В цьому випадку, треба перевірити кожен компонент. Наступним кроком є побудова тестової програми для кожного компонента і його інтерфейсу в складі моделі.

Знання системи передбачає розуміння її динаміки, так щоб параметри моделювання могли бути налаштовані для точної фіксації результатів. Можна визначити частоти системи реагування шляхом створення лінеаризованого представлення моделі з використанням Simulink і Simulink Design Control.

Лінійне уявлення обмежує розуміння поведінки моделі протягом певного діапазону вхідних сигналів і значень його стану. Визначення розмірів кроку моделювання необхідне для захоплення повного діапазону даних системи.

Simulink включає в себе бібліотеку блоків для моніторингу результатів моделювання. Блоки перевірки моделі дозволяють відслідковувати сигнал для його значень, встановлювати статичні або динамічні межі, і робити висновок, коли ці межі порушуються. Наприклад, при моделюванні динаміки системи гальмування автомобіля область моделювання обмежена дорогою. Дане обмеження можна врахувати в блоці Static Range (Рис. 1)

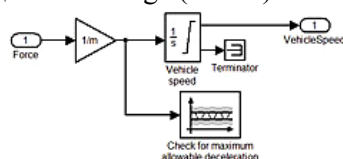


Рис. 1. Загальний вигляд блоку Static Range

Забезпечення того, що модель згенерує значення в очікуваному діапазоні, не завжди гарантує потрібні результати. Наприклад, інтегратори і передавальні функції, як низькочастотні фільтри, часто згладжують їх вихідні сигнали. Цей ефект фільтрації може приховати нереалістичну динаміку в системі. Розглянемо, наприклад, прискорення, швидкість та положення автомобіля. Спостерігаючи положення автомобіля або його швидкість, а не сигнал прискорення, легко випустити з уваги високочастотні зміни в прискоренні.

Інтегрування сигналів прискорення призводить до згладжування сигналу швидкості. Таким чином, на даному прикладі видно, як вибір реалізації впливає на точність моделі. Для забезпечення точності моделі в цілому можна запропонувати наступні кроки.

У роботах [1,2] представлена модель АБС (наприклад див.рис. 2).

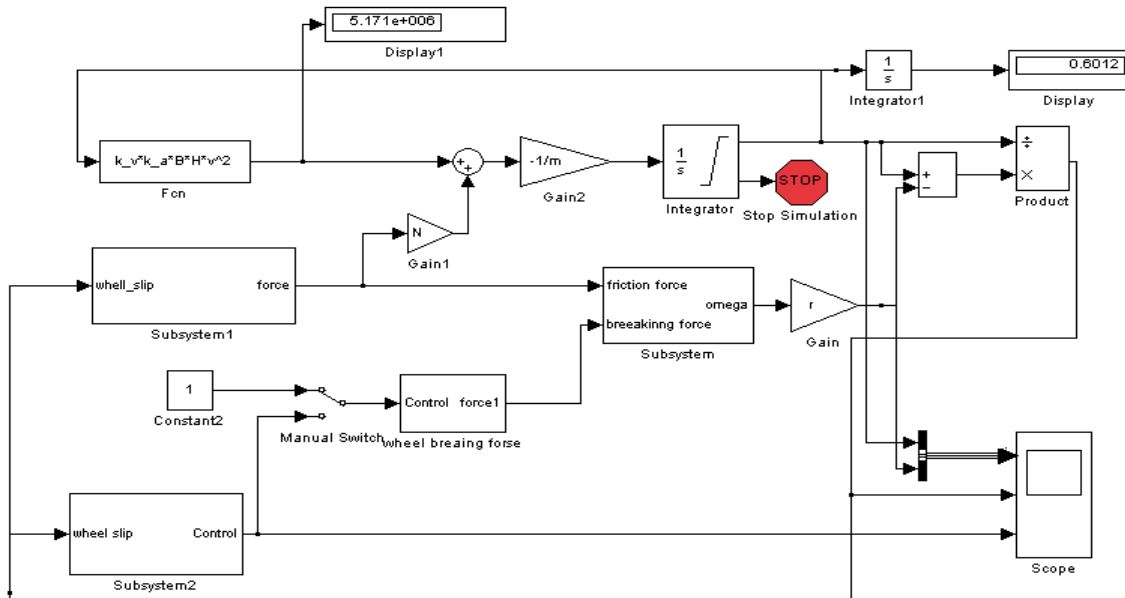


Рис. 3. Simulink модель антиблокувальною гальмівної системи

Антиблокувальна гальмівна система моделі автомобіля в даному випадку показує динаміку роботи системи в часі, змодельовану за принципом використання довідкової таблиці, яка б пов'язала відносно ковзання і коефіцієнт тертя, а також модель еталонного компонента для розрахунку швидкості обертання колеса. Оскільки модель проста, вона була реалізована з використанням підходу знизу вгору, починаючи не з специфікації і проектування систем, а на підставі рівнянь.

Сили, що діють при проковзуванні коліс. Фактична гальмова сила на колесі автомобіля визначається відношенням:

$$P_k = \mu Z_k, \quad (1)$$

де  $Z_k$  – опорна реакція на колесі;  $\mu$  – коефіцієнт гальмової сили.

У цьому випадку рівняння зміни моменту кількості обертального руху, що описує колесо задається формулою:

$$\frac{Jd\omega_k}{dt} = (P_K - P_{зМК})r_k, \quad (2)$$

де  $\omega_k$  – кутова швидкість колеса, рад./с;

$J$  – момент інерції колеса, кг·м<sup>2</sup>;

$P_k$  – фактична гальмівна сила на колесі;

$P_{зМК}$  – гальмівна сила на колесі, що розвиває гальмівним механізмом, Н;

$r_k$  – радіус колеса, м.

Фактична гальмівна сила автомобіля дорівнює:

$$P_T = \sum_{i=1}^N P_{ki}, \quad (3)$$

де  $N$  – кількість коліс автомобіля;  $P_{ki}$  – фактична гальмівна сила на  $i$ -м колесі.

Для простоти припустимо рівність опорних реакцій і коефіцієнтів зчеплення на колесах (у дійсності опорна реакція на колесі залежить від розподілу маси й інтенсивності з), тоді можна записати:

$$P_T = NP_K, \tag{4}$$

$$P_K = \mu(S)Z_K = \frac{\mu(S)mg}{N}, \tag{5}$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння (9,8 м/с<sup>2</sup>).

Величину  $\mu(s)$  можна представити у вигляді:

$$\mu(S) = \mu_{\max} f(s), \tag{6}$$

де  $\mu_{\max}$  – коефіцієнт тертя для пари колесо-дорога (для сухого асфальту  $\sim 0,8$ , для льоду  $\sim 0,2$ );  $f(s)$  – функція проковзування, максимум якої дорівнює 1.

Коефіцієнт гальмової сили визначається виразом:

$$\mu_x = \frac{s_x}{s} \mu(S) = \mu(s) \cos \beta. \tag{7}$$

У цій системі, кутова швидкість поверхні маточини колеса ( $\omega_k$ ) стає менше кутової швидкості транспортного засобу ( $\omega_v$ ) при гальмуванні.

Відносне ковзання ( $1 - \omega_k / \omega_v$ ) змінює величину тертя між колесом і дорогою, яка, в свою чергу, визначає силу гальмування. Дана система прагне забезпечити тиск в гальмівній системі, для максимального гальмівного зусилля при цьому необхідно уникнути блокування коліс.

Результати моделювання наведені на рис. 4.

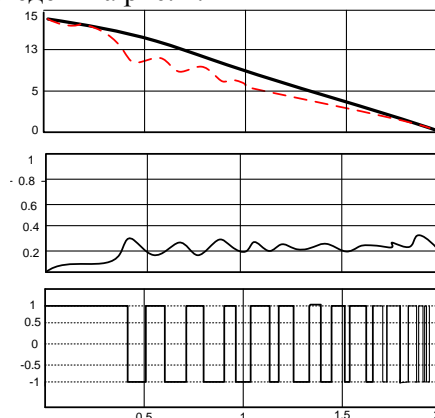
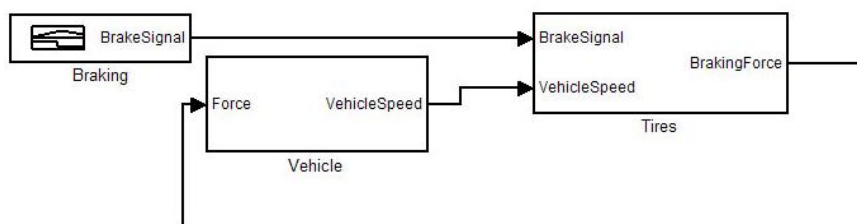


Рис. 4. Результати моделювання гальмування з ABS

На графіках (рис. 4): зверху – швидкість автомобіля і лінійна швидкість колеса, у середині – величина проковзування колеса, знизу – команди системи керування.

Швидкість автомобіля і частота обертання колеса показують коливання швидкості колеса при використанні системами ABS для зниження швидкості руху автомобіля без блокування. Ділянка нормалізованого відносного ковзання в залежності від часу (праворуч) показує інтервал, коли контролер намагається досягти бажаного відносного ковзання рівному 0,2.

Ця проста модель може бути легко інтегрована як самостійний компонент більшої моделі транспортного засобу (Рис. 5).



Copyright 1990-2006 The MathWorks Inc.

Рис. 5. Блок моделі антиблокувальної гальмівної системи АТЗ

Підсистема шини (Рис. 6) функціонально така ж, як і оригінальна модель, але тепер вона враховує сигнал гальмування, який переключється між режимами пригальмовування ( $\text{BrakeSignal} > 0$ ) і при відсутності гальм ( $\text{BrakeSignal} < 0$ ).

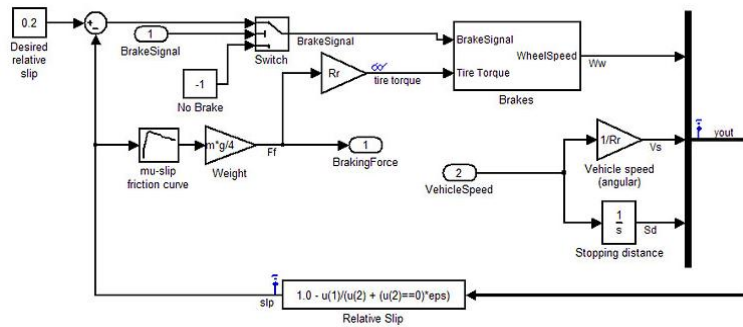


Рис. 6. Блоки підсистеми шини

Даний компонент тепер може стати частиною більш масштабного моделювання транспортного засобу. Можна перевірити, як компонент поводить, використовуючи генерований сигнал для блоку перевірки гальм.

Отримані результати показали, що оригінальна модель автомобіля зупиняє моделювання, як тільки транспортний засіб зупиняється. Якщо прибрати блок упору з моделі, то виявимо, що швидкість руху автомобіля ніколи не дорівнюватиме нулю.

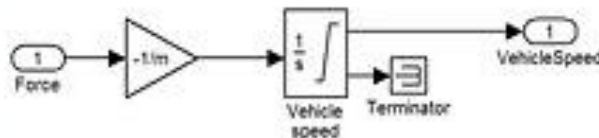


Рис. 7. Блок відстеження швидкості транспортного засобу

Блок інтегратор виконаний з можливістю насичення до нуля, і при виникненні цієї насиченості моделювання зупиняється.

Перемінна кроку в блоці Solver продовжує виявляти проходження сигналу через нуль. Система математичного розрахунку, як правило, видає помилку, перш ніж визначаться причина проблеми. Якщо використовувати фіксованою крок замість змінної кроку моделювання, то процес продовжиться до досягнення даної помилки.

При зміні фіксованого кроку блоку ODE3 (1/S) вирішувача моделювання показує незвичайний стан, коли, після того, як в стані спокою протягом короткого періоду, автомобіль раптово перескакує від 0 до високої швидкості в нульовий момент часу (Рис. 8).

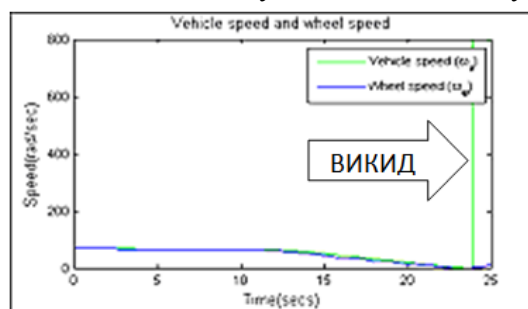


Рис. 8. Антиблокувальна гальмівна модель з викидом в точці зупинки автомобіля

Проблема полягає в тому, що гальма моделі не враховують момент, коли транспортний засіб знаходиться в нерухомому стані. Крутний момент на колесі залишається після того, як деталі знаходяться в стані спокою, що не відповідає реальності. Можна уникнути цієї помилки у вихідній моделі шляхом обмеження моделювання в певному діапазоні, де він був дійсним. Для того, щоб обійти дану помилку, в цій моделі необхідно або виправити модель або внести нові обмеження і правила.

Потрібно передбачити можливість попередження в разі, коли моделювання потрапляє в умови, при яких ця модель не є допустимою (Рис. 9).

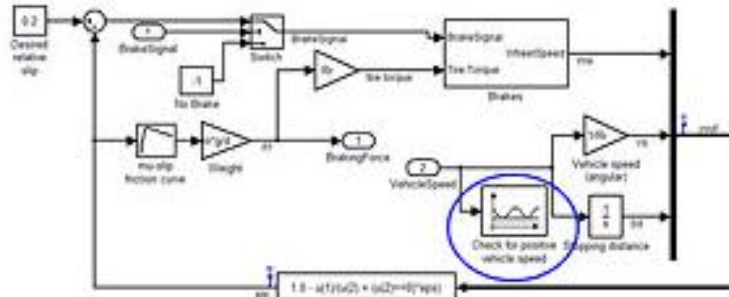


Рис. 9. Підсистема з блоком підтвердження для контролю швидкості руху автомобіля і параметри для перевірки статичності автомобіля

Коли швидкість транспортного засобу дорівнює нулю, то модель більше не працює. Можна зупинити модель, коли швидкість транспортного засобу дорівнює нулю. Тепер в цьому немає необхідності.

Щоб вирішити цю проблему, пропонується додати наступні допущення:

Модель враховує буксування і тертя ковзання гальма.

Сила гальмування діє на автомобіль тільки при його русі.

Сила гальмування завжди діє в протилежному напрямку щодо швидкості автомобіля.

Для виконання перерахованих вище умов необхідно внести в модель рівняння для крутного моменту і сили:

$$T_{net} = \begin{cases} w_{wheel} \neq 0, & T_{tire} - T_{brake} \\ w_{wheel} = 0, & T_{tire} - \min(T_{brake}, T_{tire}) \end{cases}$$

$$F_{brake} = \begin{cases} V_{vehicle} \neq 0, & -\text{sign}(V_{vehicle})|F_{brake}| \\ V_{vehicle} = 0, & 0 \end{cases}$$

де  $T_{net}$  – сумарний момент сил, що діють на колесо;

$F_{brake}$  – сила тертя ковзання шини по дорозі;

$T_{tire}$  – момент сили  $F_{brake}$  тертя ковзання;

$T_{brake}$  – момент сил гальмівної системи;

$w_{wheel}$  – кутова швидкість колеса;

$V_{vehicle}$  – швидкість автомобіля.

Для реалізації цих рівнянь додається логіка переходу до підсистеми шин через Signum-блок (Рис. 10).

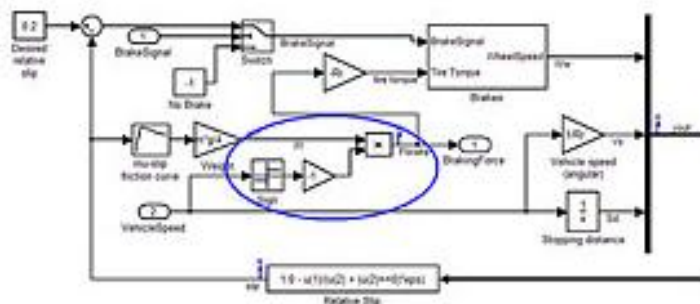


Рис. 10. Удосконалена модель підсистеми ABS

Вихідний сигнал блоку Signum буде дорівнювати 1 для позитивного входу, -1 для негативного входу, і 0 для нульового вхідного сигналу. Тепер сила гальмування завжди буде протилежною до швидкості транспортного засобу.

Додамо перемикач у підсистему Гальма, щоб уникнути повороту колеса за рахунок моменту сил гальмівної системи  $T_{brake}$  в протилежну сторону після його зупинки (Рис. 11).

Блок комутатор має стан перемикачання, коли ми проходимо через вхід 1, якщо вхід 2 не дорівнює нулю. Відстеження величини  $u2 = 0$  дозволяє прибрати нижню межу насичення швидкості колеса.

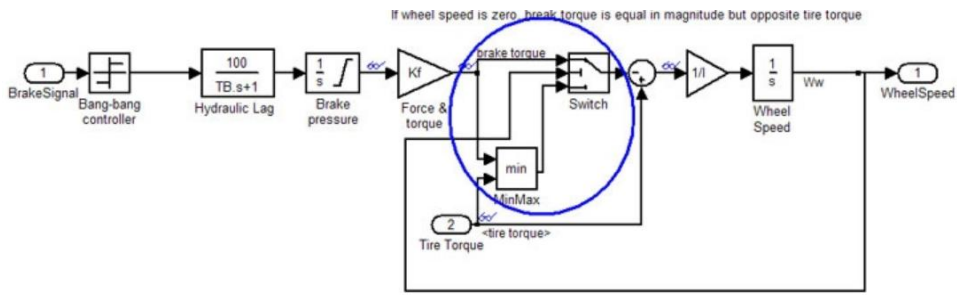


Рис. 11. Гальмівна система підсистема модифікована для перемикання крутять моментів, коли частота обертання колеса дорівнює 0

Результати, отримані при використанні блоку вирішувача ode45, показані на рисунку 12.

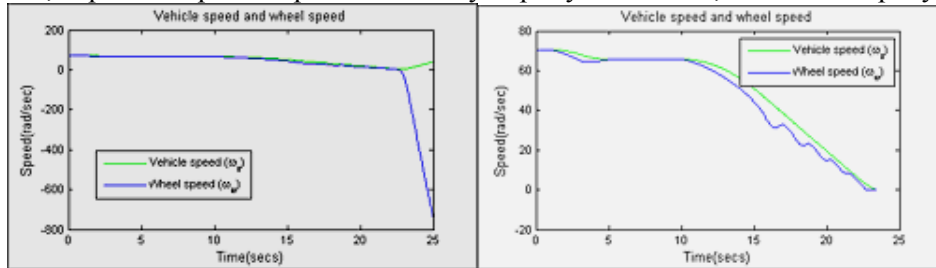


Рис. 12. Швидкість автомобіля і колеса після удосконалення моделі

Якщо додати насичення швидкості колеса в модель, то моделювання виглядає правильно, отримуємо послідовні нульові помилки перетину, і моделювання зупиняється. Вид сигналу, вихід якого безпосередньо обчислюється блоком Signum гальмівної сили показаний на рисунку 13.

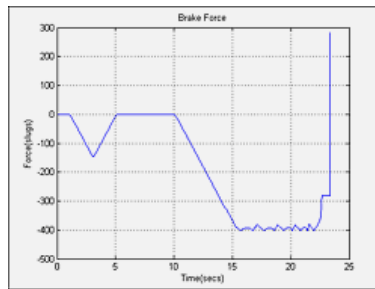


Рис. 13. Графік гальмівної сили в залежності від часу (показаний різкий стрибок сили розриву, коли транспортний засіб приходить в стан спокою)

Аналіз роботи моделі показує, що необхідно вирішити проблему гістерезису при перемиканні режимів. Гістерезис часто зустрічається в фізичних системах, де реакція системи залежить від передісторії системи. Наприклад, термостати розроблені з гістерезисом, щоб уникнути швидкого перемикання між включенням і вимиканням.

Використання блоку реле з бібліотеки розривів замість блоку Signum дозволяє обробляти умови гістерезису з певним допуском (Рис. 14).

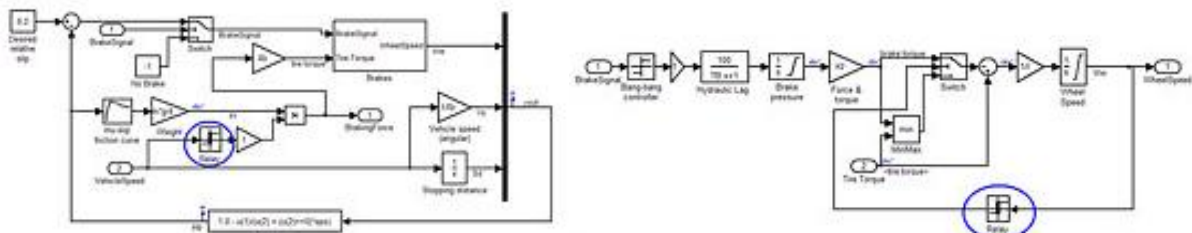


Рис. 14. Релейний блок замінює блок Signum, щоб забезпечити область гістерезису стану вимикача (ліворуч). Блок реле вставляється відповідно до порту управління перемикачем, щоб додати гістерезис стану перемикання на сигнал гальмівного моменту (праворуч).

Модель, як і раніше, передбачає позитивну початкову швидкість транспортного засобу, і ще не повністю узагальнена для обох напрямків руху. Ми також можемо застосувати гістерезис до виходу блоку швидкості шини.

### Висновки

1. Розроблений метод математичного моделювання дозволяє домогтися більш глибокого розуміння динаміки антиблокувальної системи гальм автомобіля, що дозволяє простіше налаштувати початкову конфігурацію моделі і провести моніторинг невірних результатів.

2. Відмінною особливістю запропонованих методів обліку вхідних даних і режимів моделювання є відповідність математичної моделі реальним фізичним процесам гальмування автомобіля обладнаних системою ABS.

3. Використання додаткових блоків контролю дозволило не допустити помилок моделювання.

4. При відсутності чіткого математичного алгоритму роботи системи можна застосувати евристичний підхід. Моделювання точності моделі вимагає тестування окремих компонентів і чіткого розуміння об'єкту моделювання. Розроблена математична імітаційна модель системи управління ABS дозволяє оцінити ефективність запропонованого алгоритму моделі гальмування.

### Список використаних джерел

1. Моделювання гальмівної системи автомобіля під управлінням АБС в середовищі MATLAB SIMULINK / А. П. Горбунов // Технологический аудит и резервы производства. - 2015. - № 2(5). - С. 55-59.

2. Ревин, А.А. Теория эксплуатационных свойств автомобилей и автопоездов с АБС в режиме торможения: монография / А.А. Ревин; ВолгГТУ. – Волгоград: РПК "Политехник", 2002. – 372 с.

3. Ревин, А.А. Комплексное моделирование в цикле проектирования автомобилей и их систем / А.А. Ревин, В.Г. Дыгало // Автомобильная промышленность. 2002. №11. С. 29–30.

4. Шадрин, С.С. Возможности использования бортовых сетей передачи данных автотранспортных средств в задачах интеллектуальных транспортных систем / С.С. Шадрин, А.М. Иванов // Автотранспортное предприятие. 2014. № 5. С. 43–46.

5. Дыгало, В.Г. Виртуально-физические технологии испытаний для проектирования автоматизированных тормозных систем / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Машиностроение & электротехника (Болгария). 2005. №5. С. 26–29.

6. Костин, С.Ю. Исследование активной безопасности транспортных средств методом имитационного моделирования / С.Ю. Костин, В.Г. Дыгало // Безопасность транспортных средств в эксплуатации : матер. 71-й междунар. науч.-техн. конф. (12-13 окт. 2010 г.) / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2010. С. 17–19.

7. Дыгало, В.Г. Виртуально-физическая технология моделирования систем активной безопасности / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Труды Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород. 2011. № 3. С. 146–155.

8. Дыгало, В.Г. Технологии испытания систем активной безопасности автотранспортных средств : монография / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин. – М. : Машиностроение, 2012. – 387 с.

9. Дыгало, В.Г. Принципы синтеза виртуально-физических моделей, предназначенных для разработки тормозной системы автомобиля с АБС / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Автомобильная промышленность. 2014. № 8. С. 17–19.

10. Комплекс для диагностики систем активной безопасности автомобиля / Г.О. Мельников, Е.С. Ларин, В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Известия ВолгГТУ. Серия "Наземные транспортные системы": межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. Вып. 6. № 10 (113). С. 102–105.

11. Дьяконов В.П. VisSim + Mathcad + MATLAB. Визуальное математическое моделирование / В.П. Дьяконов. - Г.: Солон-пресс, 2004. - 384 с.

12. Активная и пассивная безопасность автомобиля как основная мера повышения безопасности дорожного движения. [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15721597>

### Рецензенти:

**Худов Геннадій Володимирович**, начальника кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, доктор технічних наук, професор.

**Романюк Віктор Андрійович**, доцент кафедри Національної академії Національної гвардії України, кандидат технічних наук, доцент.

Стаття надійшла до редакції 25.06.2019