

УДК 629.017

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ КУРСОВОЇ СТІЙКОСТІ АВТОМОБІЛЯ

Д.т.н. О.Г. Гурко, В.М. Гармаш, О.А. Бредун, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Системи підвищення курсової стійкості стають невід'ємною частиною сучасного автомобіля, так як значно підвищують безпеку його експлуатації. В даній роботі розглянуто структуру системи курсової стійкості автомобіля та основні приклади її реалізації, що є на сучасному ринку. Розроблена система протидії заносу за рахунок зміни прискорення автомобіля, що працює на основі математичного апарату нечіткої логіки. Для фільтрації шумів вимірювань використано фільтр Калмана.

Системи підвищення курсової устойчивости становлять неотъемлемой частью современного автомобиля, так как значительно повышают безопасность его эксплуатации. В данной работе рассмотрена структура системы курсовой устойчивости автомобиля и основные примеры её реализации, имеющиеся на современном рынке. Разработана система предотвращения заноса за счет изменения ускорения автомобиля, работающая на основе математического аппарата нечеткой логики. Для фильтрации шумов измерений использован фильтр Калмана.

Vehicle course stability control systems are becoming an integral part of modern cars since they significantly increase the safety of their operation. In this paper, the structure of the vehicle course stability system is considered and the main examples of their implementation available on the modern market are shown. An anti-skid system based on changing of vehicle acceleration has been developed, which is used the mathematical apparatus of fuzzy logic. The Kalman filter is used to reduce the measurement noise.

Ключові слова: автомобіль, курсова стійкість, фільтр Калмана, нечітка логіка.

Вступ

Істотне підвищення кількості автомобілів в Україні, що спостерігається за останні два десятиліття, призвело до збільшення випадків дорожньо-транспортних пригод (ДТП). Як показує статистика [1] значна частина ДТП відбувається внаслідок того, що водій не встигає зреагувати або не вірно реагує на зміну дорожньої обстановки, у тому числі й на стан дорожнього покриття (рис. 1). Це призводить до заносів і втрати водієм контролю над автомобілем. Причиною цього є не тільки безтурботність або неуважність водія, а й його природна інерційність сприйняття, що призводить до затримки реакції при необхідності виконання миттєвої дії в сучасних умовах руху [2].

Однією з найбільш важливих експлуатаційних властивостей, що відповідають за безпеку дорожнього руху, є курсова стійкість автомобіля. Під курсовою стійкістю розуміють здатність збереження стійкості та керованості автомобіля за рахунок завчасного визначення та усунення критичної ситуації. У зв'язку з цим

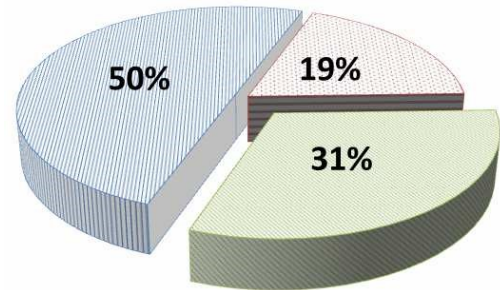


Рис. 1. Аналіз причин ДТП в Україні

актуальним є розробка та впровадження систем, що допомагають водієві або забезпечують в автоматичному режимі покращення стабільності курсової стійкості автомобіля проти заносу з урахуванням зміни дорожніх умов та їх впливу на водія. Такі системи, поряд із гальмівною системою автомобіля, є одними з найбільш значущих елементів конструктивної безпеки транспортних засобів [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Як зазначено вище, підвищенню безпеки експлуатації транспортних засобів сприятиме впровадження систем, що забезпечують збереження курсової стійкості. Саме тому передові виробники автомобілів вже впроваджують подібні системи. З 2011 року оснащення системою курсової стійкості нових легкових автомобілів є обов'язковим у країнах Євросоюзу, США, Канаді та Австралії.

Залежно від фірми автовиробника розрізняють наступні системи курсової стійкості [4-8]:

- ESP (Electronic Stability Program) – встановлюється на більшості автомобілях Європи і Америки;
- DSC (Dynamic Stability Control) – використовується на автомобілях BMW, Jaguar, Rover, Mazda;
- VDC (Vehicle Dynamic Control) – на японських автомобілях (Infiniti, Nissan, Subaru);
- VSC (Vehicle Stability Control) – японський концерн Toyota;
- DTSC (Dynamic Stability and Traction Control) – шведський концерн Volvo;
- ESC (Electronic Stability Program) – на корейських автомобілях (Kia, Hyundai);
- VSA (Vehicle Stability Assist) – на японських автомобілях (Honda, Acura).

Дослідження вітчизняних і зарубіжних вчених [8-24] показують, що впровадження засобів автоматизації

керування транспортними засобами, а саме системи курсової стійкості, дозволяє істотно зменшити ризик ДТП і скоротити кількість аварій, пов'язаних із загибеллю людей.

Незважаючи на різноманітність існуючих систем ведення наукових досліджень у цьому напрямку все ще триває. Їх мета – поліпшити, підвищити та забезпечити курсову стійкість автомобіля.

Так, наприклад, Щадрин [23] розробив методику розрахункової оцінки керованості і стійкості автомобіля на основі результатів полігонних випробувань, у ході якої запропонував розрахункову залежність бічної реакції, що діє в зоні контакту «наведеної» шини з опорною поверхнею, при стаціонарному і нестаціонарному русі з відведенням та визначив обсяг випробувань, необхідних для отримання вихідних даних для математичної моделі.

В [24] розроблене обладнання для експериментального дослідження курсової стійкості руху легкового автомобіля, на прикладі ВАЗ 2107, цей комплекс дозволяє реєструвати, вимірювати і відзначати основні показники стійкості і керуючі параметри колісного транспортного засобу.

Ведуться активні дослідження з розробки систем курсової стійкості електроавтомобілів всіх виробників, зокрема: Nissan, BMW, Tesla, Lexus [25, 26].

Можливим способом реалізації систем підвищення стійкості є керування на основі нечіткої логіки. В автомобільній промисловості нечітка логіка знаходить застосування у системах упорскування, кондиціонування повітря, а також при автоматичному перемиканні передач трансмісії. Варіанти систем підвищення курсової стійкості автомобіля на основі нечіткої логіки запропоновані в [17-20]. Вони відрізняються кількістю вхідних змінних та функціями залежності, правилами нечіткого виводу тощо.

Мета і постановка завдань дослідження

Метою цієї роботи є підвищення безпеки руху автомобіля за рахунок підвищення його стійкості проти заносу за допомогою електронної системи керування, що працює на основі нечіткої логіки.

Досягнення поставленої мети вимагає вирішення наступних завдань:

- аналіз існуючих методів та засобів розв'язання проблеми підвищення стійкості автомобіля та можливостей застосування апарату нечіткої логіки для керування автомобілем;
- структурний синтез системи підвищення курсової стійкості, що працює на основі математичного апарату нечіткої логіки;
- фільтрація шумів у сигналах з датчиків, що вимірюють параметри руху автомобіля;
- створення бази нечітких лінгвістичних правил;
- побудова функцій приналежності для розроблюваної системи;
- комп'ютерне моделювання системи підвищення курсової стійкості.

Структура системи курсової стійкості

Система курсової стійкості автомобіля включає до себе (рис. 2) мережу датчиків, електронний блок керування (ЕБК) та виконавчі підсистеми більш низького рівня [4-9].

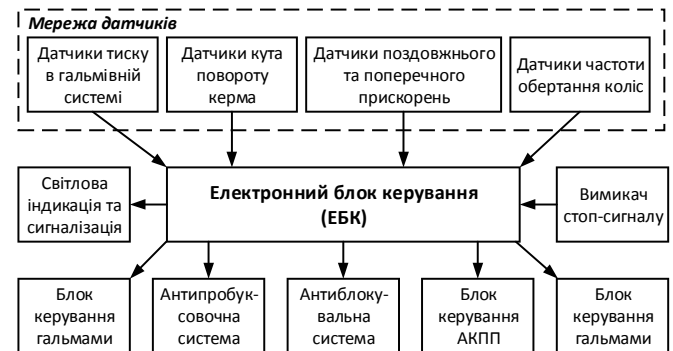


Рис. 2. Структура системи курсової стійкості

За допомогою датчиків система курсової стійкості отримує інформацію про дії водія та параметри руху машини.

Для оцінки дій водія використовуються датчики тиску в гальмівній системі, датчик кута повороту керма, а також вимикач стоп-сигналу (рис. 2). Інформація зі вказаних датчиків необхідна для того, щоб скорегувати помилкові дії водія. Наприклад, при різкому повороті керма на великий кут при великій швидкості система уповільнює оберти відповідних коліс, щоб попередити занос автомобіля.

Параметри руху автомобіля відстежують датчики тиску в гальмівній системі, частоти обертання коліс, кутової швидкості машини, поздовжнього і поперечного прискорення.

На підставі даних, отриманих від датчиків, ЕБК генерує керуючі сигнали для виконавчих пристроїв систем, що входять до складу системи курсової стійкості (рис. 2).

Фільтрація результатів вимірювань

Відомо, що датчики, встановлені на автомобілях, працюють у вкрай важких умовах, під впливом високих температур, вологості, сильної вібрації, електромагнітних перешкод тощо. Все це призводить до того, що інформація з датчиків надходить із шумами. Чим сильніше «зашумлені» дані, тим складніше обробляти таку інформацію. Тому перед використанням отриманих від датчиків сигналів, необхідне застосування фільтрів.

Фільтр – це алгоритм обробки даних, який прибирає шуми. Одним з найбільш поширених фільтрів у системах керування є фільтр Калмана [13, 27], що дозволяє визначити та спрогнозувати координати стану системи за результатами вимірювань, які містять шум.

Відфільтруємо за допомогою фільтра Калмана дані, отримані від встановленого на автомобілі акселерометра, що входить до складу вимірювального модуля MPU-6050, під час руху по дорозі (рис. 3).

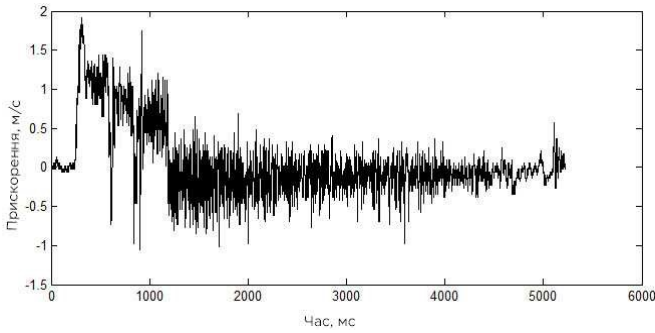


Рис. 3. Графік нефільтрованого сигналу акселерометра

Позначимо дані, що надходять з датчика в k -ий момент часу, через z_k . Оскільки процес виміру супроводжується шумом η_k , який вважатиме випадку випадковою величиною з математичним очікуванням $M[\eta_k] = 0$, то запишемо:

$$z_k = x_k + \eta_k, \quad (1)$$

де x_k – істинне значення прискорення автомобіля в k -ий момент часу.

Прийmemo, що прискорення автомобіля змінюється за законом:

$$x_{k+1} = x_k + u_k + \xi_k. \quad (2)$$

де u_k – деяка функція,

ξ_k – невизначеність у вигляді білого шуму, тобто $M[\xi_k] = 0$.

Якщо б ми вже мали отфільтроване значення прискорення x_k^{opt} , то ми, на основі рівняння (2), могли б передбачити значення x_{k+1} . З іншого боку, в момент часу $k+1$ ми будемо мати оцінку x_{k+1} у вигляді вимірюваного значення z_{k+1} . Тоді, одержати найкраще наближення до істинного значення x_{k+1} можна наступним чином:

$$x_{k+1}^{opt} = K_{k+1} \cdot z_{k+1} + (1 - K_{k+1}) \cdot (x_k^{opt} + u_k), \quad (3)$$

де K_{k+1} – ваговий коефіцієнт Калмана, значення якого тим ближче до 1, чим точніше датчик.

Помилка такого передбачення:

$$e_{k+1} = x_{k+1} - x_{k+1}^{opt}. \quad (4)$$

На основі рівнянь (1) – (3) її можна переписати у наступному вигляді:

$$e_{k+1} = (1 - K_{k+1})(e_k + \xi_k) - K_{k+1}\eta_{k+1}. \quad (5)$$

Для мінімізації помилки (5) використовуємо метод мінімізації математичного очікування квадрата помилки:

$$M[e_{k+1}^2] \rightarrow \min. \quad (6)$$

Враховуючи те, що $M[\eta_k] = M[\xi_k] = 0$, а також те, що дисперсії $\sigma_\eta^2 = M[\eta_k^2]$ та $\sigma_\xi^2 = M[\xi_k^2]$, одержимо:

$$M[e_{k+1}^2] = (1 - K_{k+1})^2 (M[e_k^2] + \sigma_\xi^2) + K_{k+1}^2 \sigma_\eta^2. \quad (7)$$

Цей вираз приймає мінімальне значення, коли:

$$K_{k+1} = \frac{M[e_k^2] + \sigma_\xi^2}{M[e_k^2] + \sigma_\xi^2 + \sigma_\eta^2}. \quad (8)$$

Підставивши (8) у (7), отримаємо:

$$M[e_{k+1}^2] = \frac{\sigma_\eta^2 (M[e_k^2] + \sigma_\xi^2)}{M[e_k^2] + \sigma_\xi^2 + \sigma_\eta^2}. \quad (9)$$

Для автоматизації обробки отриманих з акселерометра даних зручно використовувати пакет прикладних програм MATLAB.

Використовуючи MATLAB синтезуємо фільтр Калмана для наших даних та отримуємо фільтрований графік (рис. 4) з набагато більш точними даними.

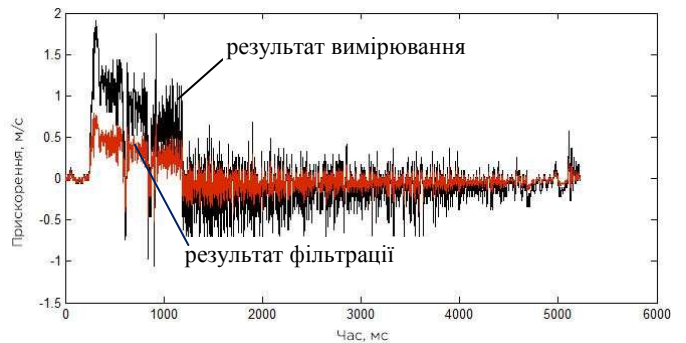


Рис. 4. Результат застосування фільтра Калмана

Розробка «нечіткої» системи курсової стійкості

Розглянемо процедуру синтезу системи підвищення стійкості автомобіля на основі нечіткої логіки на прикладі задачі протидії заносу за рахунок зміни прискорення. Процес розробки системи керування з нечіткою логікою функціонування включає наступні етапи (рис. 5) [28, 29]:

- визначення вхідних і вихідних лінгвістичних змінних та побудова бази нечітких лінгвістичних правил;
- фазифікація вхідних змінних, тобто перетворення чітких величин, що отримані в результаті

вимірювання вихідних координат об'єкта, в нечіткі величини, які описуються лінгвістичними змінними в базі знань;

- обчислення (нечіткий логічний вивід), тобто розрахунок потрібних керуючих впливів, що також мають нечіткий характер, на підставі нечітких правил та поточних значень лінгвістичних змінних.

Синтез будемо виконувати у середовищі MATLAB, до складу якого входить спеціальний пакет розширення Fuzzy Logic Toolbox з редактором систем нечіткого виводу (FIS), редактором функцій приналежності системи нечіткого виводу (Membership Function Editor) та редактором правил системи нечіткого виводу (Rule Editor) [29].

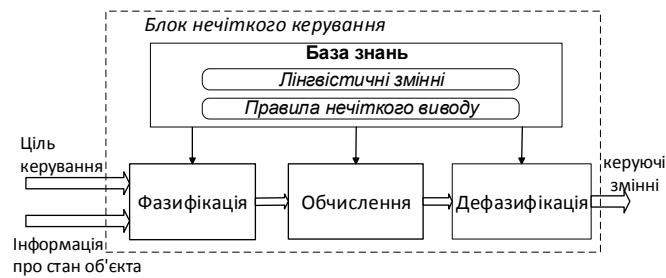


Рис. 5. Схема роботи системи керування на основі нечіткої логіки

В якості вхідних змінних приймемо (рис. 6): швидкість автомобіля (км/ч), коефіцієнт зчеплення з дорогою та кут повороту рульового колеса (градуси). Вихідною змінною приймемо бажане значення прискорення автомобіля. Терми для вказаних лінгвістичних змінних мають наступний вигляд:

$$T_{шв} = \{низка, середня, висока, дуже висока\}, \quad (10)$$

$$T_{кз} = \{сухий асфальт, мокрий асфальт, \dots, бруд-пісок, лід\}, \quad (11)$$

$$T_{кут} = \{дуже малий, малий, середній, \dots, великий, дуже великий\}, \quad (12)$$

$$T_{пр} = \{низьке, середнє, підвищене, \dots, високе, граничне\}, \quad (13)$$

При цьому використано трапецеїдальні функції приналежності; їх графіки для термів $T_{шв}$, $T_{кз}$, $T_{кут}$ та $T_{пр}$ у вікнах Fuzzy Logic Toolbox зображені на рис. 7 – 10.

Експертні дані про співвідношення між тягОВО-швидкісними характеристиками автомобіля та параметрами взаємодії коліс з опорною поверхнею за умови забезпечення стійкості проти заносу в тяговому режимі руху візьмемо для автомобіля Daewoo Lanos.

На основі отриманих лінгвістичних термів (10)-(13) для вхідних змінних, розроблено 80 нечітких правил (рис. 11) у вигляді «IF X, AND Y, AND Z THEN Z». Перша частина правил є вхідним сигналом, а друга частина є результатом і відповідає керуючій дії на виконавчі елементи.

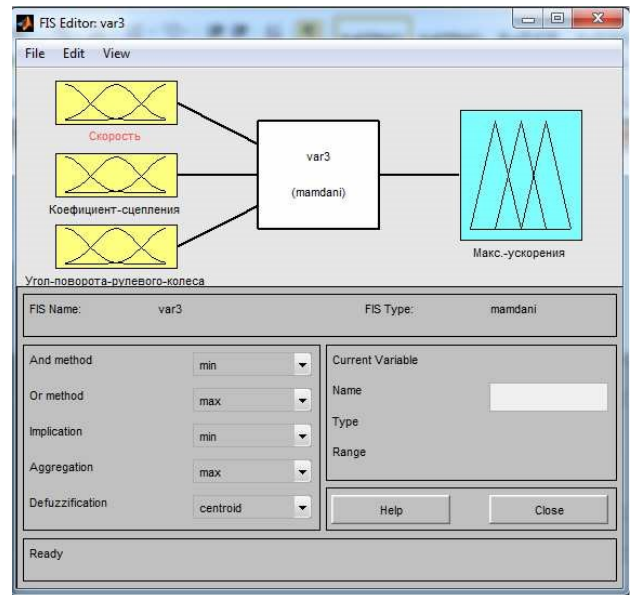


Рис. 6. Структура проектованої системи у вікні проекту FIS Editor

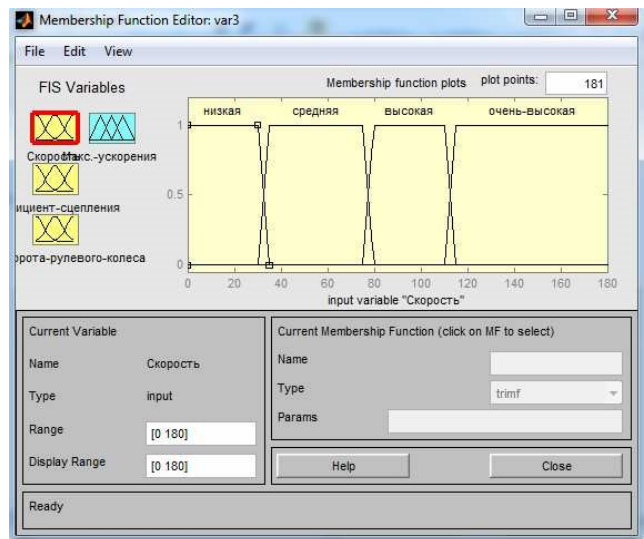


Рис. 7. Функції приналежності для змінної «швидкість автомобіля»

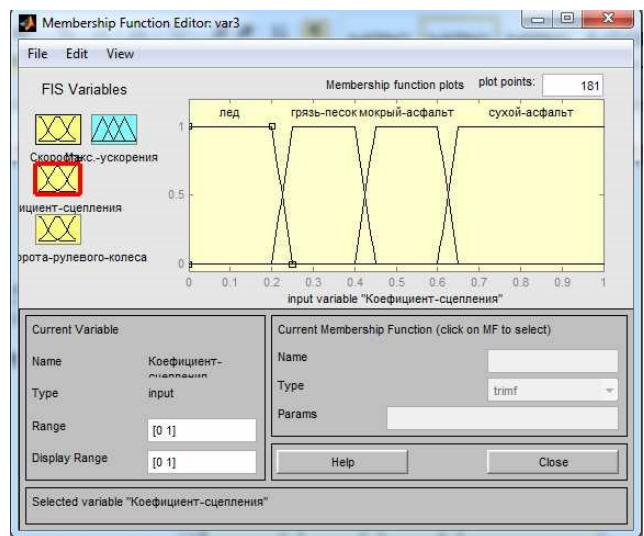


Рис. 8. Функції приналежності для змінної «коефіцієнт зчеплення»

На базі розроблених даних, а також інформації про значення вхідних лінгвістичних змінних, модель нечіткого контролера розраховує бажане прискорення автомобіля. Відповідні значення прискорення у вигляді 3D поверхонь наведені на рис. 12, 13.

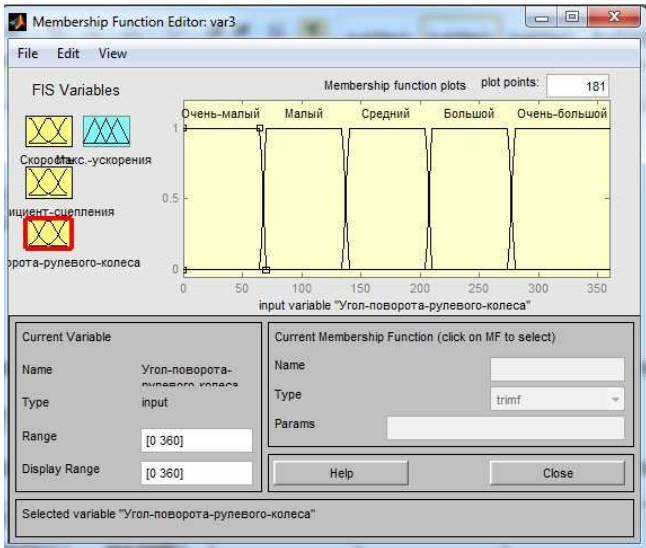


Рис. 9. Функції приналежності для змінної «кут повороту рулевого колеса»

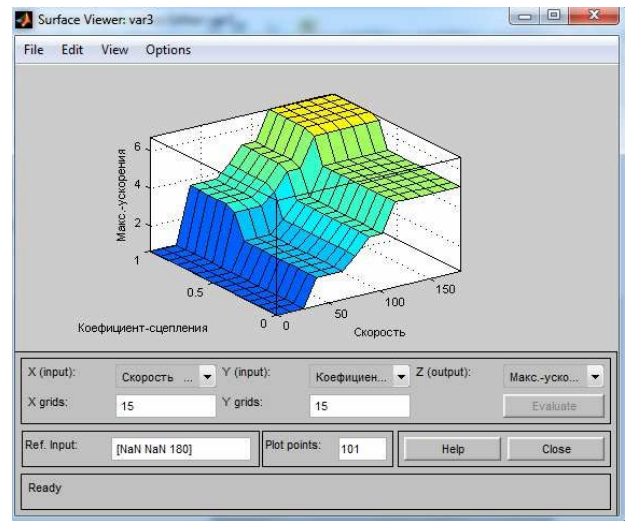


Рис. 12. Залежність бажаного прискорення автомобіля від його швидкості та коефіцієнта зчеплення з дорогою

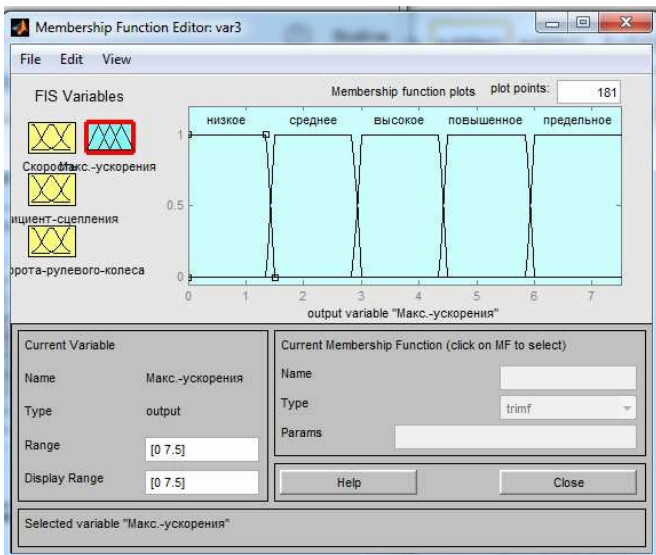


Рис. 10. Функції приналежності для вихідної лінгвістичної змінної «прискорення»

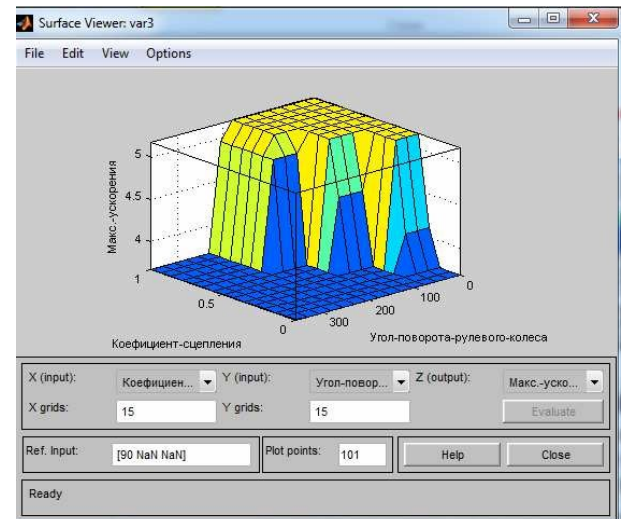


Рис. 13. Залежність бажаного прискорення автомобіля від коефіцієнта зчеплення з дорогою та кута повороту рулевого колеса

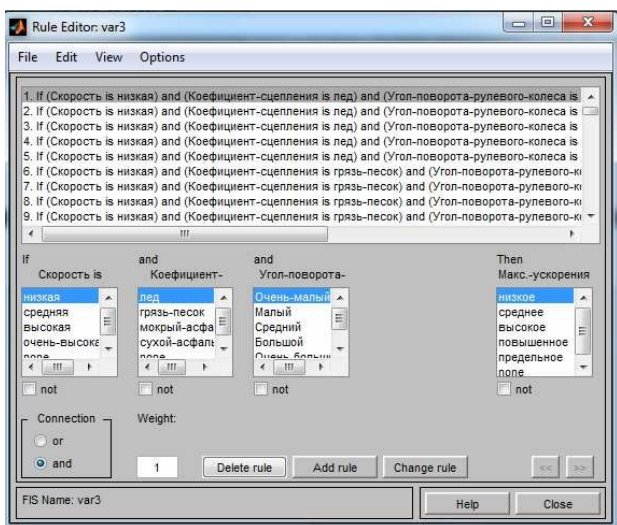


Рис. 11. Фрагмент вікна «Rule Editor» Fuzzy Logic Toolbox із нечіткими продукційними правилами

При з'єднанні фізичною лінією зв'язку реального об'єкта керування та комп'ютера з розробленою системою можна отримати єдиний кібер-фізичний комплекс, що дозволить спостерігати поведінку системи в реальних умовах і при необхідності вносити зміни в проект. Пакет MATLAB також дозволяє отримати на останньому етапі проектування остаточний варіант програмного коду для конкретного мікроконтролера або бортового комп'ютера автомобіля.

Висновки

Застосовуючи фільтр Калмана для фільтрації шумів вимірювань можливо істотно поліпшити точність одержуваних даних, так як цей фільтр має найменший середній квадрат помилки серед усіх лінійних фільтрів, та

забезпечує роботу без збоїв і помилок, на відміну від інших лінійних фільтрів.

Запропонована система забезпечення стійкості автомобіля проти заносу на основі нечіткої логіки дозволяє підвищити його активну безпеку в тяговому режимі руху.

Розроблена модель системи керування прискоренням автомобіля володіє функціями адаптації до змін динамічних характеристик як транспортного засобу, так і навколишнього середовища, та сприятиме підвищенню курсової стійкості машини.

У подальшому планується апробувати ефективність одержаних результатів на фізичній моделі автомобіля з мікропроцесорною системою керування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. 24 канал [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://24tv.ua/ru/statistika_dtp_v_ukraine_huzhe_chem_god_nazad_shokirujushhie_dannye_n879342 (дата звернення 14.10.2018) – Назва з екрана.
2. Соснин Д.А. Новейшие автомобильные электронные системы / Д.А. Соснин, В.Ф. Яковлев. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 240 с.
3. Kappler W. D. Beitrag zur Vorhersage von Einschätzungen des Fahrverhaltens / W. D. Kappler // Diss Universität Kassel. Dusseldorf: VDI Fortschrittsberichte series. – 1993.
4. Система курсовой устойчивости [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://autoleek.ru/sistemy-bezopasnosti/aktivnaya/sistema-kursovoj-ustojchivosti.html> (дата обращения 17.10.2018) – Название с экрана.
5. Система курсовой устойчивости [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://systemsauto.ru/active/esp.html> (дата обращения 17.10.2018) – Название с экрана.
6. Описание и принцип работы системы курсовой устойчивости ESC [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://techautoport.ru/hodovaya-chast/tormoznaya-sistema/sistema-esc.html> (дата обращения 17.10.2018) – Название с экрана.
7. Reif K. Electronic stability program / K. Reif // *Fundamentals of Automotive and Engine Technology*. – Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014. – P. 194-201.
8. Lie A. The effectiveness of ESP (electronic stability program) in reducing real life accidents / A. Lie, C. Tingvall, M. Krafft, A. Kullgren // *Traffic Injury Prevention*. – 2004. – V. 5. – N. 1. – P. 37-41.
9. Yanga Y. The research of dynamic stability control system for passenger cars using CarSim and Matlab-Simulink / Y. Yanga, B. T. Dogara, M. He // *International Conference on Advanced Electronic Science and Technology*. – 2016. – P.706-710.
10. Manning, W.J. A review of yaw rate and sideslip controllers for passenger vehicles / W.J. Manning, D.A. Crolla // *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. – 2007. – 29(2). –P. 117–135.
11. Eslamian M. Optimization-based non-linear yaw moment control law for stabilizing vehicle lateral dynamics / M. Eslamian, G. Alizadeh, M. Mirzaei // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. – 2007. – P. 221-233.
12. Abe M. Side-slip control to stabilize vehicle lateral motion by direct yaw moment /M. Abe, Y. Kano, K. Suzuki [et al] // *JSAE Review*. – 2001. – 22(4). – P. 413-419.
13. Imsland L. Nonlinear Observer for Vehicle Velocity with Friction and Road Bank Angle Adaptation-Validation and Comparison with an Extended Kalman Filter / L. Imsland, H.F. Grip, T.A. Johansen [et al] // *SAE Paper*. – 2007-01-0808. – P. 1-13.
14. Tseng H. E. The development of vehicle stability control at Ford / H. E. Tseng, B. Ashrafi, D. Madau [et al] // *IEEE/ASME transactions on mechatronics*. – 1999. – V. 4. – N. 3. – P. 223-234.
15. Piyabongkarn D. Development and experimental evaluation of a slip angle estimator for vehicle stability control / D. Piyabongkarn, R. Rajamani, J.A. Grogg, J.Y. Lew // *IEEE Transactions on control systems technology*. – 2009. – V. 17. – N. 1. – P. 78-88.
16. Metzler M. Explicit non-linear model predictive control for vehicle stability control / M. Metzler, D. Tavernini, A. Sorniotti, P. Gruber // *9th International Munich Chassis Symposium*. – 2018. – P. 733-752.
17. Горелов В. А. Разработка закона динамической стабилизации многоосной колесной машины с индивидуальным приводом двигателей / В. А. Горелов, М. М. Жилейкин, В. А. Шинкаренко // *Инженерный журнал: наука и инновации*. – 2013. – №. 12. – С. 1-18.
18. Жилейкин М.М. Алгоритм работы системы динамической стабилизации для автомобиля 4x4 с подключаемой задней осью / М.М. Жилейкин, А.О. Чулюкин // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. – 2014. – №. 4. – С. 90-119.
19. Клец Д. М. Применение нечеткой логики в системе повышения устойчивости автомобиля против заноса / Д.М. Клец // *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета*. – 2013. – С. 24-28.
20. Клец Д. М. Моделирование работы системы повышения устойчивости автомобиля против заноса на основе нечеткой логики в MATLAB / Д.М. Клец // *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Транспортне машинобудування*. – X. : НТУ «ХПИ», 2013. – № 32 (1005). – С. 24-30.
21. Подригало М. А. Определение устойчивости автомобиля против заноса при движении в тяговом режиме / М. А. Подригало, Д. М. Клец // *Вісник НТУ «ХПИ». Автомобілетракторобудування*. – 2007. – Вип. 12. – С. 127–136.
22. Малявин А. А. Разработка системы управления движением автомобиля с использованием нечеткой логики: автореф. дис. канд. техн. наук : спец. 05.13.06 / А. А. Малявин. – М., 2011. – 18 с.
23. Щадрин С. С. Методика расчетной оценки управляемости и устойчивости автомобиля на основе результатов полигонных испытаний / С.С. Щадрин. – Москва, 2009 – 130 с.
24. Макаров В.А. Оборудование для экспериментального исследования курсовой устойчивости движения легкового автомобиля / В.А. Макаров, А.А. Омельченко, А.В. Костенко [и др.] // *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту* – 2007 – №3 – С.48–57.
25. Weiss Y. Yaw stability control for a rear double-driven electric vehicle using LPV- H_∞ methods / Y. Weiss, L.I. Allerhand, S. Arogeti // *Science China Information Sciences*. – 2018. – V. 61. – N 7. – P. 70206.
26. Бахмутов С.В. Расширение функциональных возможностей – необходимый шаг в развитии конструкции гибридных автомобилей / С.В. Бахмутов, А.В. Круташов, О.В. Маликов // *Журнал автомобильных инженеров*. – 2012.– № 6 (77). – С. 43-46.
27. Mohinder S. G., Augus P. A. Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB. John Wiley & Sons Inc. – 2015. – 640 p.
28. Тэрано Т., Асаи К., Сугэно М. Прикладные нечеткие системы: Пер. с япон. / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.; под редакцией Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. - М.: Мир, 1993. – 368 с.
29. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.