УДК 621.331

СИСТЕМА ЗАПОБІГАННЯ БУКСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ НА ОСНОВІ КОНТРОЛЕРА НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

ВОРОБЙОВ Б.В. д-р філософії (к.т.н.), завідувач кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: bohdan.vorobiov@khpi.edu.ua;

СЕНЧЕНКО С.О. аспірант кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Serhii.Senchenko@ieee.khpi.edu.ua;

ПШЕНИЧНИКОВ Д.О. к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: dmytro.pshenychnykov@khpi.edu.ua;

ЛІХНО Я.В. аспірант кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Yaroslav.Likhno@ieee.edu.ua;

ХАНЬ Л. аспірант кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: seanhanzi@mail.com;

Мета роботи. *Розробка функціональної схеми системи запобігання ковзанню, побудова математичної моделі, синтез нечіткого регулятора, моделювання та підтвердження працездатності системи.*

Методи дослідження. *Математичний аналіз та моделювання.*

Отримані результати. *Обґрунтовано структуру та визначено лінгвістичні змінні фазі регулятора. Зроблено вибір кількості термів вхідних і вихідних змінних фазі регулятора, виходячи з мінімізації кількості правил логічної обробки. Здійснено вибір термів лінгвістичних змінних фазі регулятора у вигляді найпростіших трикутних для середніх значень діапазону їх визначення та трапецеїдальних для граничних значень. Розроблено правила логічної обробки. Здійснено вибір алгоритму нечіткого виведення та визначено параметри дефазифікації. Побудована комп'ютерна модель системи запобігання буксування з використанням Fuzzy logic toolbox пакета MATLAB та була побудована з використанням 9 правил логічної обробки. Проведено комп'ютерне моделювання розгону електромобіля з наступним буксуванням одним та двома колесами. Система підтримує неузгодженість швидкостей коліс зі швидкістю електромобіля на постійному заданому рівні 1,5 c^{-1} – відповідно до сформульованого алгоритма ідентифікації і повністю запобігає надмірному буксуванню.*

Наукова новизна. *Побудований фазі регулятор забезпечує мінімізацію невідповідності швидкості обертання колеса лінійної швидкості руху електромобіля, що в свою чергу мінімізує пробуксовку і забезпечує максимально можливий момент, що крутить, відносно до моменту установки.*

Практична цінність. *Комп'ютерне моделювання проводилося для двох режимів: розгін з наїздом на поверхню зі зниженим коефіцієнтом зчеплення (0,1) одним колесом та розгін з наїздом на поверхню зі зниженим коефіцієнтом зчеплення (0,1) двома колесами. Система повністю запобігає надмірному ковзанню.*

Ключові слова: електропривод; електромобіль; асинхронний двигун; комп'ютерна модель; механічний диференціал; нечіткий регулятор.

I. ВСТУП

Щороку понад 1,2 мільйона людей гинуть на дорогах і від 20 до 50 мільйонів зазнають травм без смертельного результату. Дорожньо-транспортний травматизм стабільно є однією з найчастіших причин смерті людей віком від 5 до 44 років. За прогнозами ВООЗ, до 2030 р. дорожньо-транспортний травматизм збільшиться і займе п'яте місце у списку провідних причин смерті [1].

Особливу небезпеку становлять режими занесення – втрата зчеплення з дорожнім покриттям одного або кількох коліс, що спричиняє часткову або повну втрату керування транспортним засобом. Підвищити безпеку руху та усунути пробуксування в електромобілі (ЕМБ) можна за допомогою електроприводу (ЕП).

Для розпізнавання пробуксування використовується різниця між лінійною швидкістю електромобіля та швидкістю обертання кожного з коліс. Наявність пробуксовування підтверджується різницею швидкості. Швидкість обертання колеса

© Воробйов Б.В., Сенченко С.О., Пшеничников Д.О., Ліхно Я.В., Хань Л., 2022
DOI 10.15588/1607-6761-2022-4-1

вимірюється енкодером. Для отримання лінійної швидкості вимірюється прискорення, а потім інтегрується.

При тривалій їзді з постійною швидкістю мікроконтролер прирівнює поточну лінійну швидкість руху швидкості обертання одного з коліс і скидає датчик, приймаючи отриману швидкість за початкове значення.

Для зменшення або усунення пробуксовування провідних коліс використовується анти блокувальна система ABS, яка запобігає блокуванню коліс при гальмуванні. Відсутність пробуксовування провідних коліс необхідна забезпечення стійкого руху при гальмуванні.

Регулятор ЕП реалізований програмно з використанням мікроконтролера. Це дозволяє реалізувати будь-яку структуру регулятора.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для досягнення заданих параметрів показників якості регулювання часто використовують ПІД-регулятор, переваги якого широко відомі [2]. Існує безліч методик оптимального налаштування регуляторів, що застосовуються у різних технологічних процесах [3] - [4]. Проте традиційний метод ПІД-регулювання не може забезпечити прийнятну якість управління складними об'єктами, тому актуальними стають різні адаптивні методи [5]. Останнім часом під час вирішення подібних завдань почали використовувати методи інтелектуального управління, зокрема апарат нечіткої логіки.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є розробка функціональної схеми системи запобігання ковзанню, побудова математичної моделі, синтез нечіткого регулятора, моделювання та підтвердження працездатності системи.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Математична модель ЕП побудована з урахуванням таких припущень:

- провідні передні колеса;
- у електромобіля є коробка передач;
- механічна частина ЕМБ має диференціал;
- ЕМБ рухається прямолінійно.

Залежність коефіцієнта тертя ковзання від буксування для різних дорожніх умов (I – сухий асфальт, II – мокрий асфальт, III – сніг, IV – лід) представлена на рисунку 1 [6].

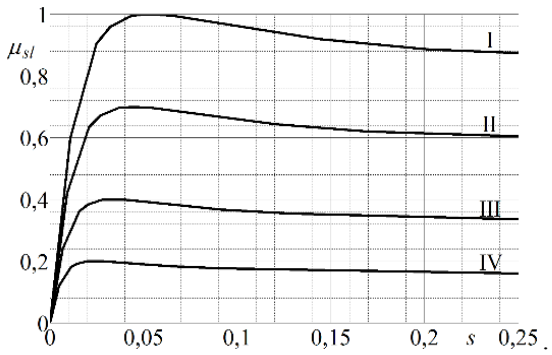

Рисунок 1. Залежність коефіцієнта тертя ковзання від прослизання

При наїзді одного колеса в зону зі зниженою силою тяги через диференціал значення моментів на пів осях коліс залишаються колишніми. При цьому збільшення швидкості прослизання другого колеса супроводжується збільшенням кутової швидкості веденої шестерні диференціала.

Швидкість руху не може зменшитися миттєво, а значить, збільшення швидкості колеса відбувається за рахунок збільшення швидкості прослизання.

Використовувалася математична модель ЕП ЕМБ у структурній формі, представлена у [7]. При складанні комп'ютерної моделі блоки системи керування та силового перетворювача збираються з використанням моделей елементів силових електричних кіл.

Заданим сигналом для ЕП є T_s - встановлення моменту, що імітує натискання водія педалі. У системі управління реалізовано векторне управління, саме пряме управління моментом (DTC) [8]. На підставі сигналу, що задає, а також миттєвих значень струмів статора і потокозчеплення система управління розраховує частоту і напругу, необхідні для підтримки моменту, який необхідно прикласти до обмотки статора двигуна. Виходом системи управління є імпульси, що керують ключами силового перетворювача.

Силовий перетворювач включає в себе автономний інвертор на основі IGBT-транзисторів і гальмівний резистор. Параметри перетворювача вибрано такі: опір ключів 1мОм. Падіння прямої напруги та падіння напруги на зворотних діодах прийнято рівними 1,4 В. Час наростання імпульсу 1 мкс, час спаду 2 мкс.

Модель асинхронного двигуна складається за рівняннями координатах *d-q*. Математичний опис ґрунтується на [8]. Вибір асинхронного двигуна проводився методом еквівалентної потужності з використанням стандартного міського циклу WLT [9], як базова циклограма руху. Було обрано двигун серії АИР180М2 потужністю P_n = 30 кВт, номінальною швидкістю n_n = 2935 об/хв і ККД η = 91 %.

Модель дозволяє моделювати ЕП при варіюванні

величезної кількості параметрів – моделювання процесів буксування одним або двома колесами, різка зміна параметрів двигуна, вихід з ладу одного з елементів силового ланцюга і т.д.

З використанням пакетів Simulink та SimPower програмного комплексу Matlab, а також структурної схеми ЕП [7], була синтезована комп'ютерна модель ЕП, яка представлена на рисунку 2. Параметри, що використовуються в моделі, взято характеристики побудованого на базі кафедрі «АЕМС» НТУ «ХПІ». Для створення за основу було взято автомобіль Ланос з розрахунковою масою m = 1500 кг. Габаритні розміри та інші параметри взяті з [10]. Модель складається з акумулятора, гальмівного резистора, силового перетворювача, регулятора швидкості, регулятора моменту, асинхронного двигуна, блоку механіки, блоку формування сигналів завдання та блоків вимірювання.

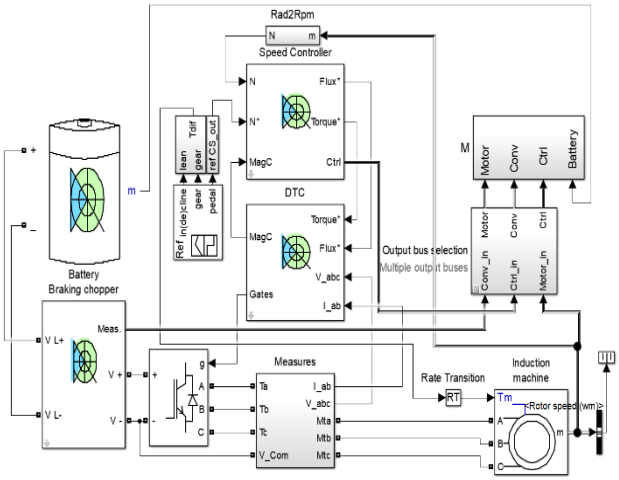

Рисунок 2. Комп'ютерна модель ЕП

На рисунку 3 показано блокову модель DTC.

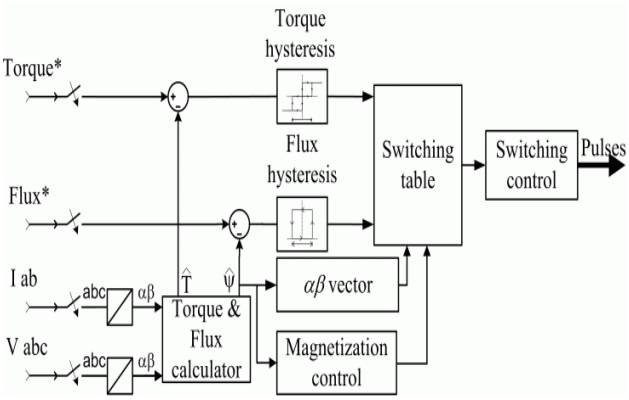

Рисунок 3. Загальна модель системи управління

Структура системи управління базується на блоках пакету SimPower Matlab. Блок калькулятора Torque & Flux використовується для оцінки компонентів αβ потоку двигуна та електромагнітного моменту. Цей калькулятор ґрунтується на синтезі рівняння двигуна. Блок вектора αβ використовується для знаходження сектора площини αβ, де лежить вектор потоку. Площина αβ розділена на шість різних секторів, що віддаляються один від одного на 60 градусів. Блоки Flux & Torque Hysteresis містять дворівневий компаратор гістерези для управління потоком і трирівневий компаратор гістерези для управління крутним моментом. Опис гістерезисних компараторів є нижче. Блок Switching table містить дві довідкові таблиці, які вибирають певний вектор напруги відповідно до вихідних даних компараторів Flux & Torque Hysteresis. Цей блок також здійснює початковий потік у машині. Блок управління перемиканням використовується обмеження частоти комутації інвертора до максимального значення, встановленого [11].

На рисунку 4 представлена модель механічної частини ЕП. Моделі складових навантаження, передавального числа та вузла формування сил нормального тиску представлені на рисунку 5.

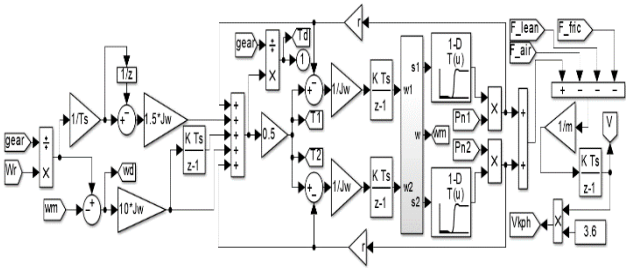

Рисунок 4. Комп'ютерна модель механічної частини ЕП

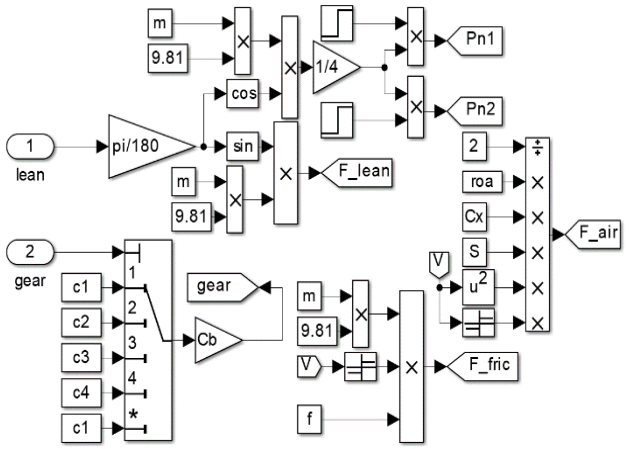

Рисунок 5. Модель формування складових навантаження ЕП, сил нормального тиску і-го колеса, передатного відношення на заданій передачі

Механічна модель складена відповідно до [7]. Позначення моделі механічної частини: T_s – крок дискретизації моделі; W_r – швидкість електродвигуна; w_1 і w_2 – кутові швидкості коліс; V , V_{kph} – лінійна

швидкість ЕМБ у м/с та км/год; F_fric , F_air, F_lean – сила тертя, сила опору повітря та сила тяжіння, що діють на ЕМБ при русі під ухил; gear – передавальне число трансмісії; r – радіус колеса; J_w – наведений момент інерції колеса; T_d – момент на виході трансмісії; m – повна маса ЕМБ; T1, T2 – моменти на колесах 1 і 2; w_m – усереднена швидкість двох коліс; s1, s_2 – прослизання коліс 1 і 2.

На рисунку 6 представлена функціональна схема ЕП із системою запобігання прослизання.

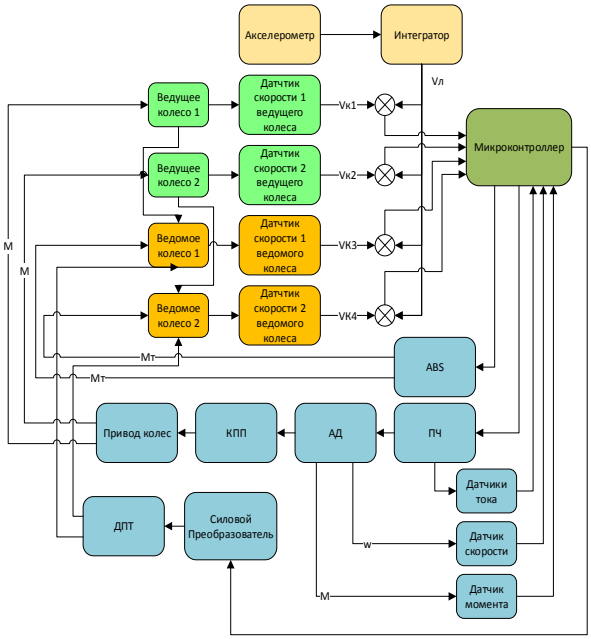

Рисунок 6. Функціональна схема ЕП ЕМБ із системою запобігання буксування

В більшості випадків синтез фазі-регулятора передбачає наступну послідовність операцій нечіткої логіки [10]:

- фазифікація – перетворення точних значень вхідних змінних на рівні їх приналежності до лінгвістичних змінних шляхом застосування положень теорії нечітких множин;
- нечіткий висновок та створення бази правил;
- дефазифікація – перетворення нечітких значень, отриманих в результаті нечіткого висновку, на конкретне числове значення.

Наведено наступну структуру нечіткого регулятора з двома входами (зміна неузгодженості швидкостей першого колеса $\Delta\omega_{d1[n]}$ та неузгодження швидкостей другого колеса $\Delta\omega_{d2[n]}$) і одним виходом (корекція заданої напруги $\Delta U_{[n]}$), яка показана на рисунку 7.

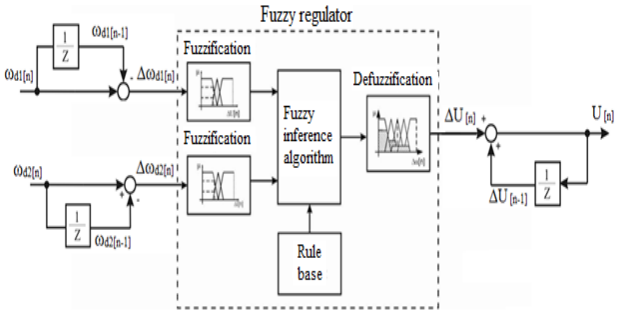

Рисунок 7. Структура нечіткого регулятора

Фазі регулятор, побудований за запропонованою структурною схемою, представленою на рисунку 7 повинен забезпечувати мінімізацію невідповідності швидкості обертання колеса лінійної швидкості руху ЕМБ, що в свою чергу мінімізує пробуксовку і забезпечує максимально можливий момент, що крутить, відносно до моменту установки (натискання на педаль газу).

Сформулюємо правила логічної обробки, спираючись на вигляд регулювальних характеристик, представлених на рисунку 8.

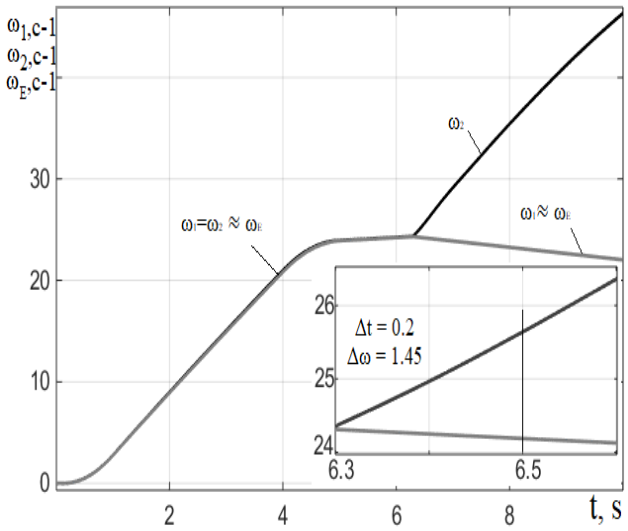

Рисунок 8. Швидкості двох коліс і приведена до кутової швидкість руху ЕМБ

Нехай у вихідному стані $\Delta\omega_{d1} = \Delta\omega_{d2} = 0$. У цьому випадку електромобіль або стоїть на місці, або рухається поверхнею з максимальним коефіцієнтом зчеплення. У цьому випадку, необхідність в корегуванні завдання моменту відсутній і $\Delta U = 0$.

Виходячи з вищесказаного, запишемо правила:

Якщо швидкості обох коліс збігаються зі швидкістю руху всього електромобіля, то:

Якщо $\Delta\omega_{d1}$ є "0" та $\Delta\omega_{d2}$ є "0", то ΔU є "0".

Якщо має місце неузгодженість швидкості першого колеса:

Якщо $\Delta\omega_{d1}$ є "+" та $\Delta\omega_{d2}$ є "0", то ΔU є "+".

Якщо має місце неузгодженість швидкості другого колеса:

Якщо $\Delta\omega_{d1}$ є "0" та $\Delta\omega_{d2}$ є "+", то ΔU є "+".

Якщо має місце неузгодженість швидкостей обох коліс зі швидкістю всього електромобіля, то:

Якщо $\Delta\omega_{d1}$ є "+" та $\Delta\omega_{d2}$ є "+", то ΔU є "++".

Якщо швидкість одного з коліс має додатну неузгодженість, а другого – від'ємну (що в реальному житті можливо тільки під час буксування під час розвороту або аварійного обертання під час руху), то:

Якщо $\Delta\omega_{d1}$ є "-" та $\Delta\omega_{d2}$ є "+", то ΔU є "+".

Якщо $\Delta\omega_{d1}$ є "+" та $\Delta\omega_{d2}$ є "-", то ΔU є "+".

У разі, якщо неузгодженості будь-якого з коліс від'ємні або нульові, то:

Якщо $\Delta\omega_{d1}$ є "0" та $\Delta\omega_{d2}$ є "-", то ΔU є "0".

Якщо $\Delta\omega_{d1}$ є "-" та $\Delta\omega_{d2}$ є "0", то ΔU є "0".

Якщо $\Delta\omega_{d1}$ є "-" та $\Delta\omega_{d2}$ є "-", то ΔU є "0".

Таким чином, всі правила логічної обробки враховують зміна коефіцієнта зчеплення коліс з дорогою були складені.

Подана база правил логічної обробки у вигляді табл. 1. База правил була складена спираючись на якісні графіки швидкостей обертання коліс та швидкості руху всього електромобіля і не залежить від параметрів електроприводу, що дозволяє застосовувати її для управління будь-якого АД.

Таблиця 1. Таблиця правил логічної обробки

$\Delta\omega_{d1}$ / $\Delta\omega_{d2}$	Негативний	Нуль	Позитивний
Негативний	0	0	+
Нуль	0	0	+
Позитивний	+	+	++

Для побудови комп'ютерної моделі використовувався тулбокс Fuzzy logic toolbox пакета MATLAB. Модель реалізує алгоритм розпізнавання буксування, описаний у [7]. Побудована модель представлена на рисунку 9.

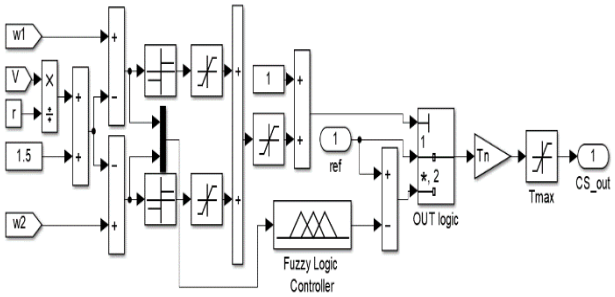

Рисунок 9. Комп'ютерна модель системи запобігання буксування

Сигнали швидкостей коліс порівнюються з кутовою швидкістю руху електромобіля. Якщо різниця більше 1,5 c^{-1}, то на вхід селектора OUT logic подається сигнал і система керування перемикає сигнал завдання з ref на ref + Ucorr. Таким чином, якщо неузгодженість становить менш 1,5 c^{-1}, то вихідним сигналом системи запобігання буксування буде просто сигнал завдання (при натисканні педалі), а якщо більше – сума сигналу завдання і коригуюча напруга, який формує фазі регулятор. Для синтезу фазі регулятора використовувалися параметри, визначені раніше, а також таблиця правил (табл. 1).

Комп'ютерне моделювання проводилося для двох режимів: розгін з наїздом на поверхню зі зниженим коефіцієнтом зчеплення (0,1) одним колесом та розгін з наїздом на поверхню зі зниженим коефіцієнтом зчеплення (0,1) двома колесами.

Моделювання роботи системи при буксуванні одним колесом проводилося наступним чином: електромобіль починає рух на фіксованій другій передачі по поверхні з коефіцієнтом зчеплення 1. На 2 секунді відбувається наїзд на поверхню з коефіцієнтом зчеплення 0,1 другим колесом.

На рисунку 10 показані графіки перехідних процесів моменту і швидкості обох коліс при буксуванні другого колеса.

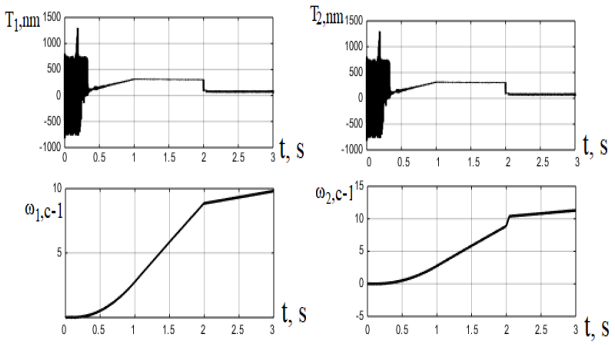

Рисунок 10. Швидкості та крутні моменти двох коліс із прослизанням другого колеса

З графіків видно, що з 2 секунди мало місце зниження моменту першого колеса і, як наслідок, зменшилося прискорення. При цьому електромобіль продовжив розгін. На 2 секунді, друге колесо після зниження зчеплення з дорогою, починає розгін до моменту, коли неузгодженість складе більш ніж 1,5 c^{-1}. У цей момент знижується задаючий сигнал, а отже, і момент. Криві моменту обох коліс ідентичні.

На рисунку 11 показані графіки моменту і швидкості обох коліс. Графіки швидкості і моменту коліс під час буксування практично ідентичні отриманим раніше графікам для другого колеса, проте момент ще більш знижений для підтримки постійної неузгодженості.

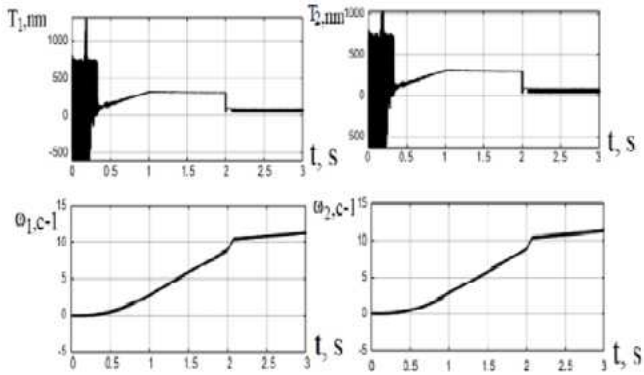

Рисунок 11. Швидкості та моменти двох коліс у момент пуску з ковзанням

Електромобіль продовжує прискорення з рівномірним прискоренням обох коліс. На рисунку 12 показано порівняння швидкостей двох коліс з приведеною до кутової швидкістю руху всього електромобіля.

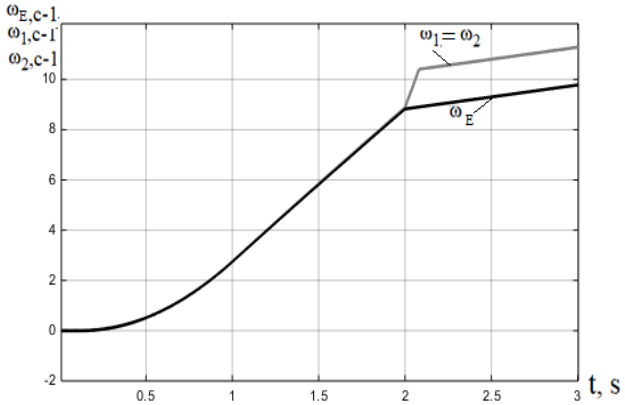

Рисунок 12. Швидкості двох коліс та всього електромобіля під час розгону з буксуванням

Після наїзду на поверхню зі зниженим коефіцієнтом зчеплення, обидва колеса починають розганятися до моменту перевищення допустимої неузгодженості. Після включення системи запобігання буксування сигнал завдання моменту знижується до максимально можливої величини так, щоб неузгодженість не перевищувала максимально задану величину. З графіка видно підтримку неузгодженості на постійному рівні та продовження розгону ЕМБ. На рисунку 13 показаний вихідний сигнал фазі регулятора.

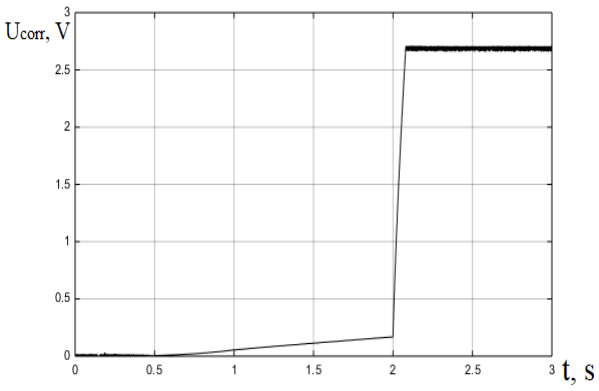

Рисунок 13. Вихідний сигнал фазі регулятора (коригуюча напруга) при буксуванні двох коліс

Величина коригуючої напруги Ucorr в сталому розгоні склала 2,7 В. Значення вихідної величини регулятора відповідає виконанню правила: Якщо $\Delta\omega_{d1}$ є "+" та $\Delta\omega_{d2}$ є "+", то Δ U є "++".

Система повністю коректно відпрацьовує неузгодженість швидкостей і підтримує стабільний розгін навіть при критично низькому коефіцієнті зчеплення.

На рисунку 14 показаний графік перехідних процесів струму фази А.

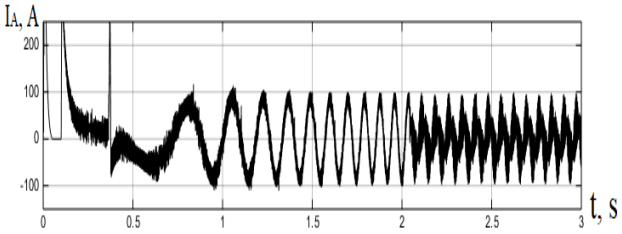

Рисунок 14. Струм статора фази А

Графік струму повністю відповідає графіку моменту і показує зниження на ділянці після 2 с.

На рисунку 15 показані графіки перехідних процесів моменту двигуна – задаючого і реального.

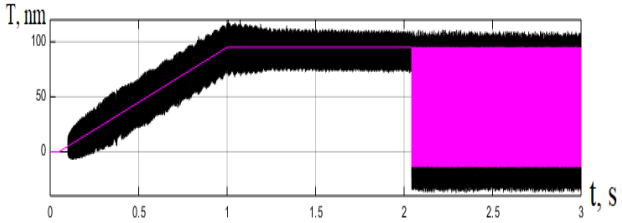

Рисунок 15. Момент на валу двигуна і задаючий момент

З графіка видно, що система управління DTC точно відпрацьовує задаючий момент. Після наїзду колесами на ділянку зі зниженим коефіцієнтом

зчеплення, графік добре ілюструє роботу системи управління – як тільки неузгодженість перевищує максимально допустиму величину, система запобігання буксування знижує задаючий момент до тих пір, поки неузгодженість не прийде в норму. Потім система відключає корекцію напруги, поки неузгодженість знову не перевищить максимально допустиме значення. Таким чином, система керування працює у змішаному тригерному режимі.

V. ВИСНОВКИ

Обґрунтовано структуру та визначено лінгвістичні змінні фазі регулятора. Зроблено вибір кількості термів вхідних і вихідних змінних фазі регулятора, виходячи з мінімізації кількості правил логічної обробки. Здійснено вибір термів лінгвістичних змінних фазі регулятора у вигляді найпростіших трикутних для середніх значень діапазону їх визначення та трапецеїдальних для граничних значень. Розроблено правила логічної обробки. Здійснено вибір алгоритму нечіткого виведення та визначено параметри дефазифікації. Побудована комп'ютерна модель системи запобігання буксування з використанням Fuzzy logic toolbox пакета MATLAB та була побудована з використанням 9 правил логічної обробки. Проведено комп'ютерне моделювання розгону електромобіля з наступним буксуванням одним та двома колесами. Система підтримує неузгодженість швидкостей коліс зі швидкістю електромобіля на постійному заданому рівні 1,5 c^{-1} – відповідно до сформульованого алгоритму ідентифікації і повністю запобігає надмірному буксуванню. Зроблений висновок про працездатність системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Доклад о состоянии безопасности дорожного движения в мире. Режим доступу: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44122/9789244563847_rus.pdf;jsessionid=78E49896549A16CCA4A3C4EA29FD8042?sequence=2.

[2] Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. – Vol. 13. – № 4. – P. 559–576. DOI: 10.1109/TCST.2005.847331

[3] Quevedo J., Escobet T. Digital control: past, present and future of PID control. Proc. IFAC Workshop. Terrassa, Spain, 2000.

[4] Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. Trans. ASME. 1942. V. 64. P. 759–768.

[5] A. Gad and M. Farooq. Application of fuzzy logic in engineering problems. Proc. IECON. 2001. P. 2044-2049.

[6] Rajamani, R., Piyabongkarn, N., Lew, J., Yi, K., Phanomchoeng, G. Tire-Road Friction-Coefficient Estimation. IEEE. 2010, DOI: 10.1109/MCS.2010.937006

[7] Vorobyov Bogdan, Pshenychnykov Dmytro. Modeling of the Operation of an Asynchronous Electric Drive of an Electric Vehicle in Slip Modes. 25th IEEE International conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice, PAEP 2020.

[8] C. Carlos. Modeling, vector control and DTC: control of asynchronous machines. Hermes Science, Europe Ltd. 2000.

[9] Bolee realistichny`e pokazateli potrebleniya topliva: novy`j standart ezdovogo czikla WLTP zamenit dejstvuyushhij NEDC. Режим доступу: https://www.audi.ru/ru/web/ru/innovations/wltp-lp.html

[10] Klepikov V. B., Semikov A. V. i dr. Iz opyita sozdaniya elektroprivoda elektromobilya s superkondensatornyim nakopitelem energii [From the experience of creating electric drive electric vehicle with a super capacitor energy storage]. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv: NTU «KhPI» 2015, Vyp. 112 (1121). P. 195–198.

[11] Bose, B. K., Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, N.J., 2002. P. 558.

Стаття надійшла до редакції 05.11.2022

THE SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLE SLIPPAGE PREVENTION BASED ON A FUZZY LOGIC CONTROLLER

VOROBIOV B.V. — Ph.D, Head of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: bohdan.vorobiov@khpi.edu.ua;

SENCHENKO S.O. — Ph.D. student of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: Serhii.Senchenko@ieee.khpi.edu.ua;

PSHENYCHNYKOV D.O. — Ph. D, Associate professor, Associate professor of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv