

МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НА СХИЛАХ І ПІДЙОМАХ ДОРОГИ

¹Вінницький національний технічний університет

Виконано моделювання руху електромобіля з асинхронним електроприводом на схилах та підйомах, виконуючи оптимізацію за критерієм мінімуму електричних втрат, використовуючи синтезовані авторами моделі, основою яких є математична модель кривої намагнічування, що представлена оберненим гіперболічним синусом та варіаційним варіантом методу невизначених множників Лагранжа. Проведено моделювання, виконане для трьох варіантів умов проходження заданої відстані за виділений час, процесів руху електромобіля на спуск та підйом різних ступенів нахилу з порівнянням до умов руху горизонтальною ділянкою.

Отримані результати проаналізовані та виявлено, що як і для горизонтального руху, моделювання якого проводились також і в попередніх роботах автора, закон керування, представлений отриманою математичною моделлю оптимального руху, забезпечуватиме оптимізацію енергоспоживання приводом електромобіля заряду акумуляторних батарей в умовах руху на спуск та підйом.

Моделювання та їх аналіз підтверджують теоретичні виклади і ефективність оптимізації руху отриманих математичних моделей також і для руху відрізками дороги на спуск та підйом.

Ключові слова: електромобіль, рух на спуск і на підйом, оптимізація, модель, тяговий асинхронний електропривод, ітераційний алгоритм, комп'ютерне моделювання.

Вихідні передумови

В роботі [1] отримані вирази за якими визначатимуться відносні струм і швидкість руху електромобіля для горизонтального відрізка дороги у вигляді

$$v_{k+1} \approx v_k + \frac{(a^2 + b^2)}{2ab} (\tau_{k+1} - \tau_k) \ln(i_k + \sqrt{i_k^2 + 1}) - (f_0 + f_1 v_k + f_2 v_k^2) (\tau_{k+1} - \tau_k), \quad (1)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots; \tau_0 = 0; v_0 = 0; i_0 = i_n.$$

$$i_k(n) = i_k(n-1) - \frac{C_3}{n} \left\{ 2a \sqrt{(i_k(n-1))^2 + 1} (1 - 2\alpha i_k(n-1)) - \left(\frac{a^2 + b^2}{b} \right) \left(C_1^* e^{(f_1 \tau_k + 2f_2 v_k)(\tau_{k+1} - \tau_k)} - \frac{C_2^*}{f_1 + 2f_2 v_k} \right) \right\}. \quad (2)$$

А в роботі [2] співвідношення (1), (2) трансформовані так:

– для руху на спуск

$$v_{k+1} \approx v_k + \frac{(a^2 + b^2)}{2ab} (\tau_{k+1} - \tau_k) \ln(i_k + \sqrt{i_k^2 + 1}) - (-f_0^* \sin \beta_k + f_0 \cos \beta_k + f_1 v_k + f_2 v_k^2) (\tau_{k+1} - \tau_k), \quad (3)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots; \tau_0 = 0; v_0 = v_{0s}; i_0 = i_{0s}; \beta_k \in \left[0, \beta_{\max} < \frac{\pi}{2} \right];$$

$$i_k(n) = i_k(n-1) - \frac{C_3}{n} \left\{ 2a \sqrt{(i_k(n-1))^2 + 1} (1 - 2\alpha i_k(n-1)) - \left(\frac{a^2 + b^2}{b} \right) \left(C_1^* e^{(f_1 \tau_k + 2f_2 v_k)(\tau_{k+1} - \tau_k)} - \frac{C_2^*}{f_1 + 2f_2 v_k} \right) \right\}, \quad (4)$$

$$n = 1, 2, \dots, N \Rightarrow |i_{N-1} - i_N| \leq \varepsilon;$$

– для руху на підйом

$$v_{k+1} \approx v_k + \frac{(a^2 + b^2)}{2ab} (\tau_{k+1} - \tau_k) \ln \left(i_k + \sqrt{i_k^2 + 1} \right) - (f_0^* \sin \beta_k + f_0 \cos \beta_k + f_1 v_k + f_2 v_k^2) (\tau_{k+1} - \tau_k), \quad (5)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots; \tau_0 = 0; v_0 = v_{0p}; i_0 = i_{0p}; \beta_k \in \left[0, \beta_{\max} < \frac{\pi}{2} \right];$$

$$i_k(n) = i_k(n-1) - \frac{C_3}{n} \left\{ 2a \sqrt{(i_k(n-1))^2 + 1} (1 - 2\alpha i_k(n-1)) - \left(\frac{a^2 + b^2}{b} \right) \left(C_1^* e^{(f_1 \tau_k + 2f_2 v_k)(\tau_{k+1} - \tau_k)} - \frac{C_2^*}{f_1 + 2f_2 v_k} \right) \right\}, \quad (6)$$

$$n = 1, 2, \dots, N \Rightarrow |i_{N-1} - i_N| \leq \varepsilon.$$

Моделювання процесів руху на спуск та підйом

Як і математична, комп'ютерна модель зазнала відповідних змін у виразі обчислення відносної швидкості, в усьому іншому алгоритмі виконання програми відповідний алгоритм, представлено-му в роботі [3]. Також варто зазначити, що здійснено перехід реалізації програми моделі від середовища MATLAB до самостійної її реалізації на мові програмування Java заради більшої гнучкості розробки, розширення, а також у роботі з даними та їх візуалізацію.

Моделювання процесів здійснено трьома варіантами граничних умов по відносних одиницях (в.о.) відстані і в.о. часу за умови руху по горизонталі, при русі на спуск та підйом нахилами в 10 і 20 градусів.

Першим представлено варіант проходження відстані у 50 в. о. за час 40 в. о., числові та графічні дані моделювань яких подано у табл. 1 та рис. 1—5, відповідно.

Таблиця 1

Числові дані результатів моделювання долання відстані в 50 в.о. за час 40 в.о.

Тип руху	горизонтальний	на спуск		на підйом	
Нахил дороги, град.	0	10	20	10	20
Параметр C_1	-0,000000008	-0,000008925	-0,0000110865	-0,00000252512	-0,0000015
Параметр C_2	-0,012	-0,012	-0,012	-0,012	-0,012
Параметр C_3	0,0171941	0,0085	0,008	0,01155	0,0124445
Пройдений шлях, в.о.	50,001	50,016	50,0	50,0	50,0
Граничний струм, в.о.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Гранична швидкість, в.о.	0,027	0,431	0,529	0,0	0,0

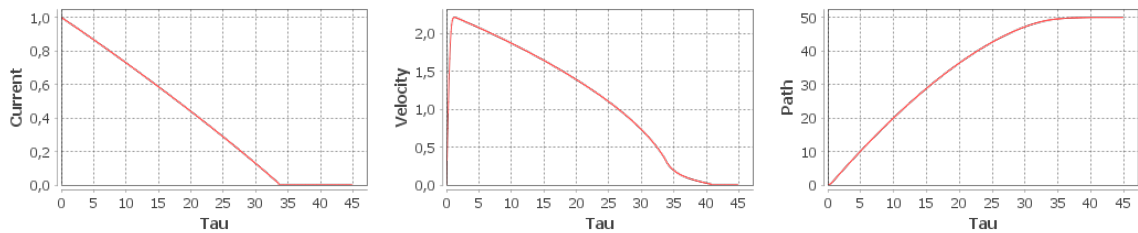


Рис. 1. Рух по горизонталі на відстань 50 в.о. за час 40 в.о.

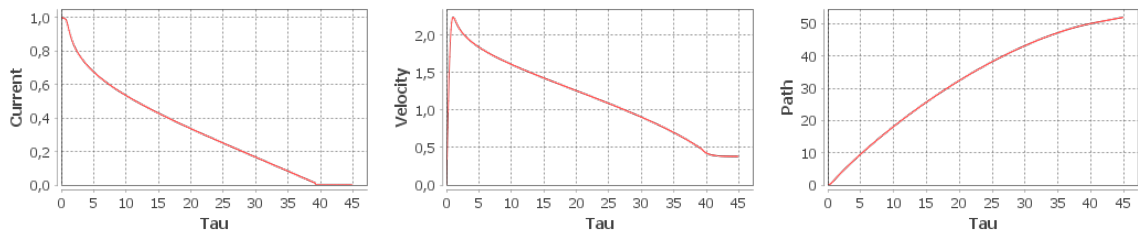


Рис. 2. Рух на спуск в 10 градусів на відстань 50 в.о. за час 40 в.о.

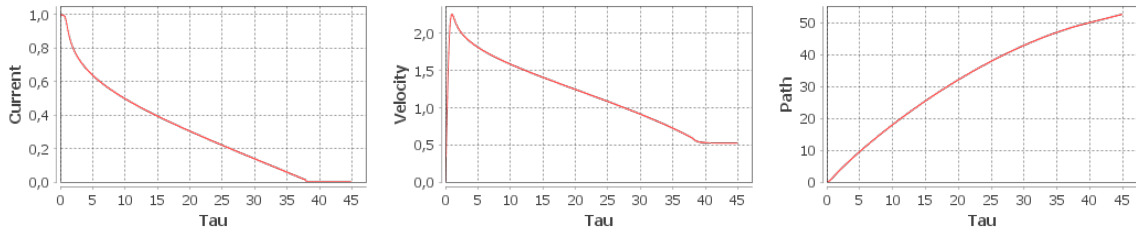


Рис. 3. Рух на спуск в 20 градусів на відстань 50 в.о. за час 40 в.о.

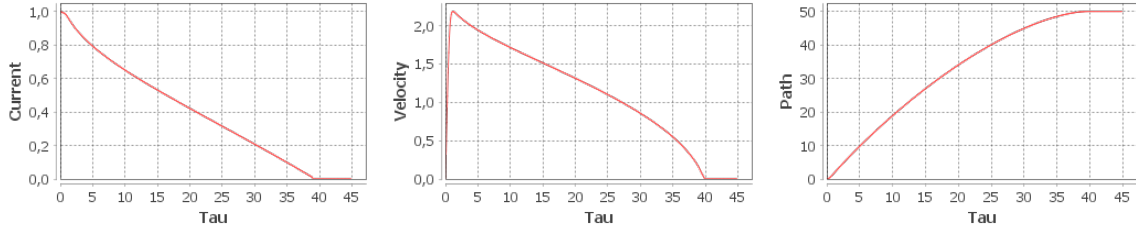


Рис. 4. Рух на підйом в 10 градусів на відстань 50 в.о. за час 40 в.о.

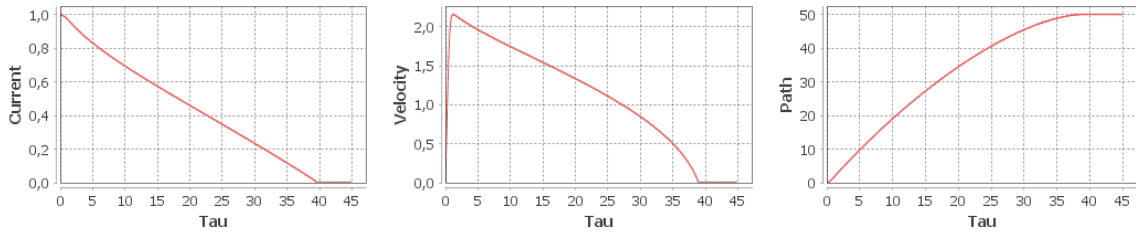


Рис. 5. Рух на підйом в 20 градусів на відстань 50 в.о. за час 40 в.о.

Другий варіант проходження відстані в 80 в.о. за час 60 в.о., числові та графічні дані моделювання яких подано у табл. 2 та рис. 6—10, відповідно.

Таблиця 2

Числові дані результатів моделювання долаття відстані в 80 в.о. за час 60 в.о.

Тип руху	горизонтальний	на спуск		на підйом	
Нахил дороги, град.	0	10	20	10	20
Параметр C_1	0,0	-0,000001	-0,000002	-0,0000008	0,0
Параметр C_2	-0,012	-0,012	-0,012	-0,012	-0,012
Параметр C_3	0,01069657	0,0085193	0,0074611	0,0083365	0,0098435
Пройдений шлях, в.о.	80,0	80,0	80,0	80,0	79,998
Граничний струм, в.о.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Гранична швидкість, в.о.	0,031	0,381	0,525	0,055	0,0

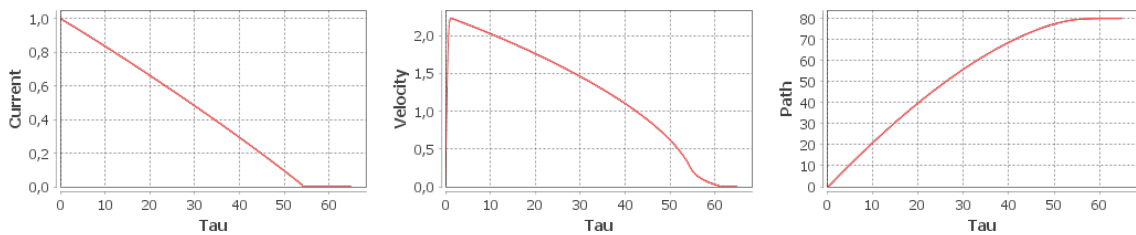


Рис. 6. Рух по горизонталі на відстань 80 в.о. за час 60 в.о.

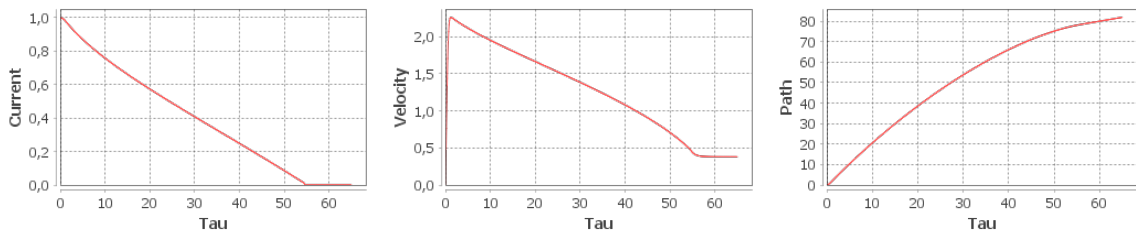


Рис. 7. Рух на спуск в 10 градусів на відстань 80 в.о. за час 60 в.о.

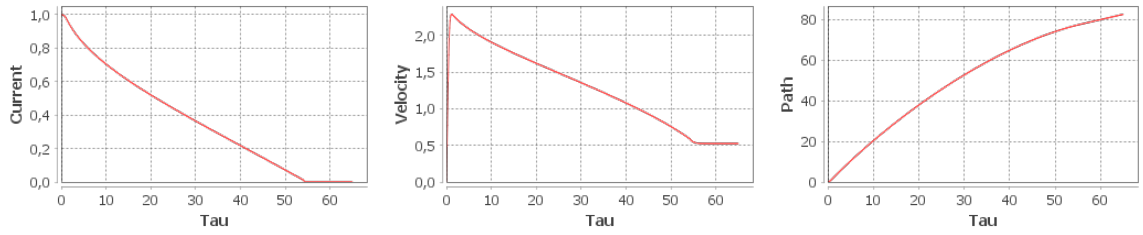


Рис. 8. Рух на спуск в 20 градусів на відстань 80 в.о. за час 60 в.о.

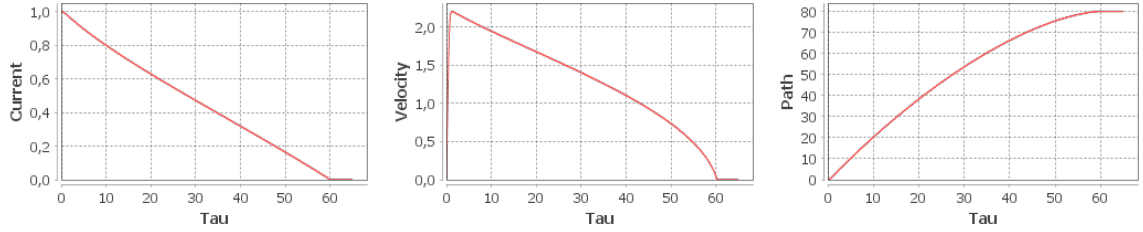


Рис. 9. Рух на підйом в 10 на відстань 80 в.о. за час 60 в.о.

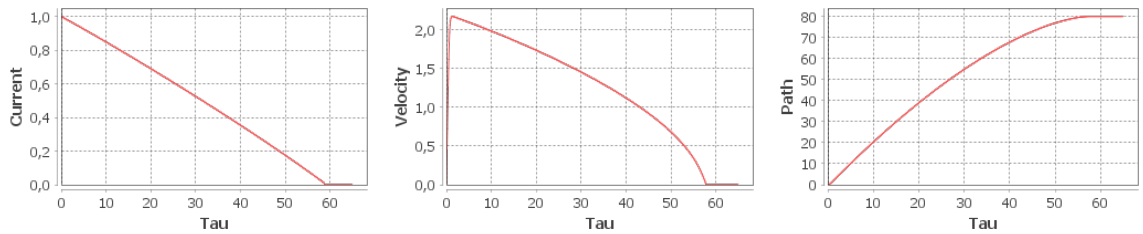


Рис. 10. Рух на підйом в 20 на відстань 80 в.о. за час 60 в.о.

І третім є варіант проходження відстані в 50 в.о. за час 60 в.о., числові дані подано в табл. 3, графічні — на рис. 11—15.

Таблиця 3

Числові дані результатів моделювання долання відстані в 50 в.о. за час 60 в.о.

Тип руху	горизонтальний	на спуск		на підйом	
		10	20	10	20
Нахил дороги, град.	0	10	20	10	20
Параметр C_1	-0,0027	-0,004037	-0,006	-0,202447	-0,19247
Параметр C_2	-0,012	-0,012	-0,012	-0,012	-0,012
Параметр C_3	0,00019377	0,00018713	0,00017008	0,0000025	0,0000025
Пройдений шлях, в.о.	50,0	50,0	50,0	50,001	50,001
Граничний струм, в.о.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Гранична швидкість, в.о.	0,0	0,38	0,525	0,0	0,0

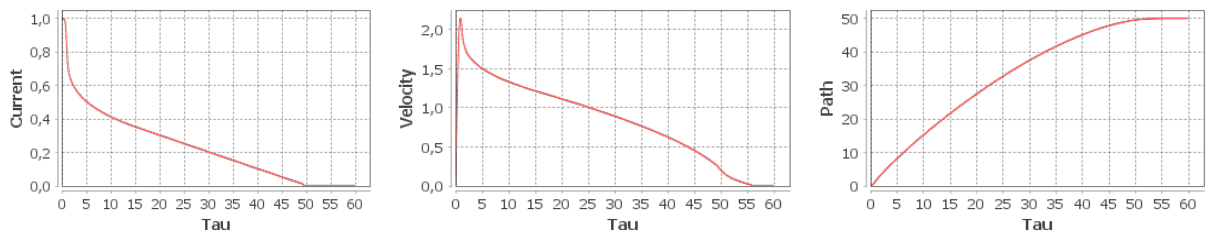


Рис. 11. Рух по горизонталі на відстань 50 в.о. за час 60 в.о.

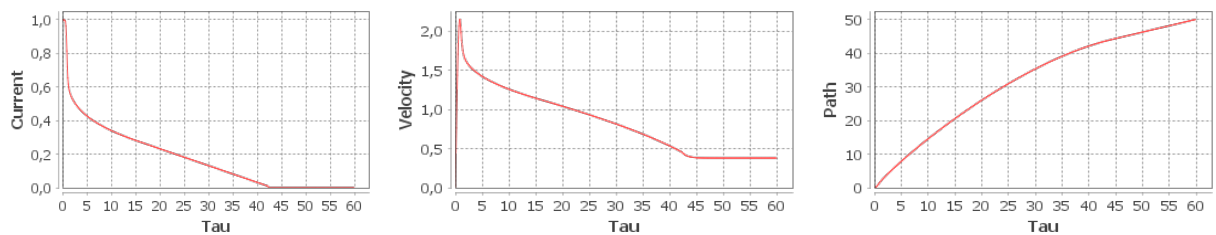


Рис. 12. Рух на спуск в 10 градусів на відстань 50 в.о. за час 60 в.о.

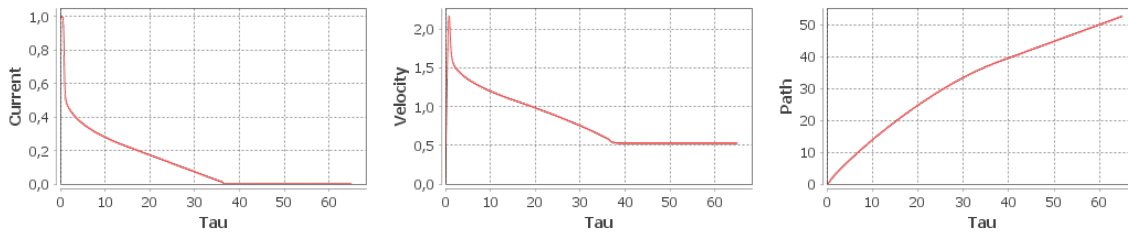


Рис. 13. Рух на спуск в 20 градусів на відстань 50 в.о. за час 60 в.о.

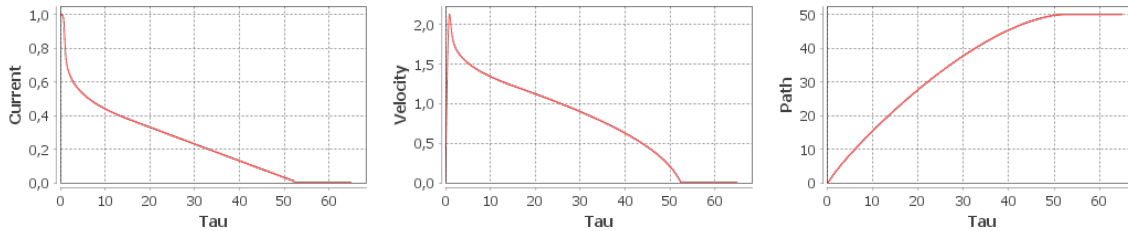


Рис. 14. Рух на підйом в 10 градусів на відстань 50 в.о. за час 60 в.о.

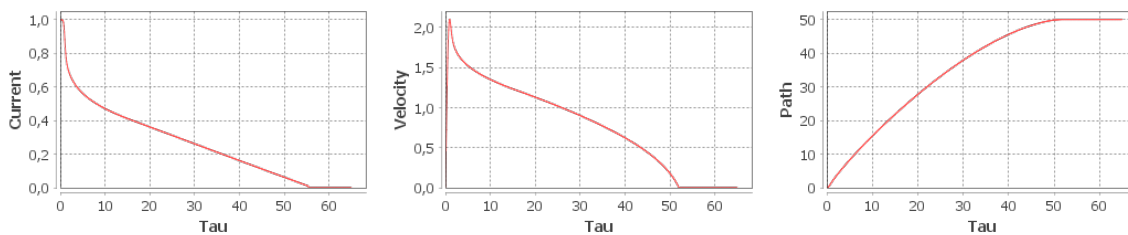


Рис. 15. Рух на підйом в 20 градусів на відстань 50 в.о. за час 60 в.о.

Аналіз отриманих результатів

Як і для моделювання руху лише по горизонтальному відрізку дороги з роботи [3] для проведення моделювання в цій роботі спостерігаються ті ж умови руху (інерційність автомобіля, опір кочення, опір зустрічного потоку повітря тощо), що присутні і для реального автомобіля. Коефіцієнт C_2 також незмінний для усіх розглянутих випадків моделювання руху. Також варто зазначити певні особливості щодо процесу моделювання як для горизонтального руху, так і для інших варіантів (особливо для руху на спуск), щоб цьому етапі надмірно не ускладнювати модель, гальмування відсутнє. І ще одна особливість, яка спостерігається, але тільки у випадках руху на підйом, це те, що швидкість може бути тільки додатною, тобто автомобіль з часом не покотиться назад при нульовому (та близькому до нього) значенні струму.

З результатів, показаних графіками, для всіх варіантів можна бачити, що у випадку горизонтального руху (який у цій роботі є порівняльним) усе аналогічно, як і в роботі [3], лише з деяким уточненням регулюючих коефіцієнтів C_1 та C_3 , яке також наводить на думку, що можна підібрати декілька комбінацій регулюючих коефіцієнтів, використавши які, можна задовольнити граничні умови і уточнюючи які, можна зменшити різницю між бажаним та отриманим значеннями.

Розглянувши результати моделювання руху на спуск, перше, що можна помітити — це швидкість після моменту досягнення пройденої відстані до значення граничної, вона не зменшується до нуля а тримається певного значення. Оскільки кут нахилу в усіх випадках незмінний протягом усього циклу моделювання, то буде цілком очевидно, що під час руху на спуск без гальмування автомобіль буде рухатись далі під дією сили тяжіння з швидкістю, що залежить від кута схилу (це і спостерігається, для руху зі схилу з кутом в 20 градусів, швидкість після досягнення граничної відстані буде триматись на рівні вищому ніж для 10 градусного схилу). І площа, охоплена осями і кривою значень відносного струму, буде меншою для схилу з більшим кутом, відповідно модель забезпечуватиме зниження витрат електроенергії за умови сили тяжіння, що сприяє рухові автомобіля.

В умовах руху на підйом сила тяжіння діє на автомобіль зустрічно його рухові силою, тому для досягнення граничних умов потрібно витратити більше електроенергії, що і спостерігається на графіках. Для такого типу руху, на відмінну від двох інших, ще збільшує енергоспоживання і значне гасіння руху вільним вибігом автомобіля по інерції силою тяжіння і, як видно, значення струму і швидкості майже одночасно досягають нульового значення.

Аналізуючи характер зміни кривих струму для всіх представлених результатів моделювання руху, для кожного з варіантів видно, що завдяки алгоритму моделі менше енергії витрачено на спуск, більше — на підйом. Відповідно, збільшення кута нахилу для спуску буде зменшувати потребу в додатковому тяговому зусиллі приводу електромобіля а для підйому навпаки — збільшувати, що характерно реальним умовам руху на спуск та підйом.

Таким чином, підібравши відповідні регульовальні коефіцієнти, модель здатна забезпечити оптимізацію енергоспоживання і для умов руху на спуск, які сприяють зменшенню витрат електроенергії силової акумуляторної батареї електромобіля, і для умов руху на підйом, що навпаки накладають додаткові супротивні руху електромобіля сили, враховуючи обмеження, задані граничними умовами відстані і часу.

Висновки

Проведено моделювання процесів руху електромобіля з асинхронним електроприводом по відрізках дороги на спуск та підйом, оптимальним за критерієм мінімізації енергоспоживання приводом електромобіля. Основою для яких є математична модель кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса та варіаційний варіант методу невизначених множників Лагранжа. Реалізоване моделювання виконане трьома варіантами граничних умов для руху на спуск та підйом за різних ступенів нахилу та руху по горизонтальній ділянці, як порівняльній.

Проаналізувавши результати моделювання, видно, що використання синтезованих моделей, як основи законів керування електромобілем, здатне забезпечувати оптимізацію витрат заряду силової акумуляторної батареї електричним приводом електромобіля під час руху ділянкою дороги на спуск і на підйом, так само як і для руху горизонтальним відрізком дороги, з урахуванням встановлених граничних умов. Таким чином, представлені в попередніх роботах теоретичні виклади підтверджено і доведено ефективність синтезованих моделей і для умов руху на спуск та підйом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, і В. В. Горенюк, «Метод ідентифікації моделей оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 32-38, 2020. <https://doi.org/10.31649/1997-9266--2020-148-1-32-38> .
- [2] В. В. Горенюк, «Синтез та ідентифікація моделей оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом по схилах і підйомах дороги,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 37-44, 2021. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-155-2-37-44> .
- [3] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, і В. В. Горенюк, «Моделювання оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом горизонтальним відрізком дороги,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 26-33, 2020. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-152-5-26-33> .

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Горенюк Вадим Вікторович — аспірант кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, e-mail: gvv.ghost@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

V. V. Horeniuk¹

Optimal Movement Modeling of an Electric Car with a Traction Induction Motor on the Slopes and Rises of the Road

¹Vinnitsia National Technical University

There has been made the simulation of the optimal motion model of an electric car with a traction induction motor on the slopes and rises of the road, performing optimization on the criterion of minimum electrical losses, using the models synthesized by the authors, based on a mathematical model of the magnetization curve in the form of inverse hyperbolic sine and the variational variant of the Lagrange's indefinite multipliers method. The simulation for three variants of conditions of the set distance passing for the allocated time, processes of movement of the electric car on the descent, and the ascent of

various degrees of inclination with comparison to conditions of movement by a horizontal road section are carried out.

Obtained results have been analyzed and it has been found that as for car motion by horizontal road section, that was modeled in previous authors works, the control law presented by the received mathematical model of optimal motion will provide the electric car's drive battery power consumption optimization on descent and ascent movement conditions.

The simulation data and their analysis confirm the theoretical statements and the motion optimization efficiency of the obtained mathematical models also for the movement on the slopes and rises of the road.

Keywords: electric car, motion on descent and ascent, optimization, model, traction induction electric drive, iterative algorithm, computer modeling.

Horeniuk Vadym V. — Post-Graduate Students of the Chair of Electromechanical Systems Automation in Industry and Transport, e-mail: gvv.ghost@gmail.com

В. В. Горенюк¹

Моделирование оптимального движения электромобиля с асинхронным электроприводом на склонах и подъемах дороги

¹Вінницький національний технічний університет

Осуществлено моделювання руху електромобіля з асинхронним електроприводом на схилах і підйомах, виконуючи оптимізацію по критерію мінімуму електричних втрат, використовуючи синтезовані автотри моделі, основою яких є математична модель кривої намагнічування, представлена оберненим гіперболічним синусом і варіаційним варіантом методу неопределенных множителей Лагранжа. Моделювання виконано для трьох варіантів умов проходження заданого відстані за виділене час, процесів руху електромобіля на спуск і підйом ділянками з різною ступенем нахилу зі порівнянням з умовами руху горизонтальним ділянкою.

Полученные результаты проанализированы и обнаружено, что, как и для горизонтального движения, моделирование которого проводилось также и в предыдущих работах авторов, закон управления представленный полученной математической моделью оптимального движения будет обеспечивать оптимизацию энергопотребления приводом электромобиля заряда аккумуляторных батарей в условиях движения на спуск и подъем.

Данные моделирования и их анализ подтверждают теоретические выкладки и эффективность оптимизации движения полученных математических моделей также и для движения отрезками дороги на спуск и подъем.

Ключевые слова: электромобиль, движение на спуск и на подъем, оптимизация, модель, тяговый асинхронный электропривод, итерационный алгоритм, компьютерное моделирование.

Горенюк Вадим Викторович — аспирант кафедры электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте, e-mail: gvv.ghost@gmail.com