

Б. І. Мокін¹
 О. Б. Мокін¹
 В. В. Горенюк¹

МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ГОРИЗОНТАЛЬНИМ ВІДРІЗКОМ ДОРОГИ

¹Вінницький національний технічний університет

Здійснено моделювання руху електромобіля з асинхронним електроприводом по горизонтальному відрізку дороги, оптимального за критерієм мінімуму електричних втрат, з використанням синтезованих авторами моделей, в основу яких покладено математичну модель кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса та варіаційний варіант методу невизначених множників Лагранжа. Чотири варіанти моделювання з різними значеннями параметрів моделей та різними значеннями граничних умов здійснено з використанням пакету прикладних програм MATLAB. Здійснено візуалізацію отриманих результатів шляхом побудови відповідних графіків для вихідних координат моделей, що характеризують оптимальний режим руху.

Проведено аналіз результатів усіх чотирьох варіантів моделювання з використанням синтезованих моделей, на основі якого встановлено, що рух електромобіля горизонтальним відрізком дороги в разі, якщо його системою керування буде реалізуватись закон, в основу якого будуть покладені алгоритми, що базуються на синтезованих моделях, то для покриття електромобілем тої самої відстані за той самий час використовуватиметься мінімальне споживання електричного заряду силової акумуляторної батареї, від якої отримує електроенергію електропривод електромобіля.

Отже, результати моделювання та їх аналіз підтверджують теоретичні виклади і ефективність математичних моделей оптимального руху електромобіля горизонтальним відрізком дороги, синтезованих в попередніх роботах авторів.

Ключові слова: електромобіль, тяговий асинхронний електропривод, модель оптимального руху, комп'ютерне моделювання, прямиї та ітераційний процеси.

Вихідні передумови

В роботі [1], розв'язуючи методом Лагранжа, викладеним в роботі [2], задачу мінімізації витрат електроенергії силової акумуляторної батареї (САБ) електромобіля, автори отримали систему двох рівнянь

$$\begin{cases} 2a\sqrt{i^2+1}(1-2\alpha i) - \frac{(a^2+b^2)}{b} \left(C_1 e^{(f_1\tau+2f_2\int v d\tau)} - \frac{C_2}{f_1+2f_2v} \right) = 0, \\ \frac{dv}{d\tau} = \frac{(a^2+b^2)}{2ab} \ln\left(i + \sqrt{i^2+1}\right) - f_0 - f_1v - f_2v^2, \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{на розв'язках яких} \quad i = i(C_1, C_2, \tau), \quad v = v(C_1, C_2, \tau) \quad (2)$$

досягатиметься мінімум витрат енергії САБ електромобіля в умовах дії обмежень

$$m \frac{dv}{dt} = F_T - k_0 F_G - k_1 V - k_2 V^2 \quad (3)$$

та

$$L_I = \int_0^{T_I} V dt. \quad (4)$$

В роботі [3] здійснено ідентифікацію математичних моделей оптимального руху (2) електромобіля з використанням таких умов:

– початкових

$$\begin{cases} i(0) = i_n, \\ v(0) = 0, \\ \int_0^0 v(\tau) d\tau = 0; \end{cases} \quad (5)$$

– граничних

$$\begin{cases} i(\tau_I) = 0, \\ v(\tau_I) = 0, \\ \int_0^{\tau_I} v(\tau) d\tau = l_I, \end{cases} \quad (6)$$

в результаті якої отримано рівняння визначення значення відносної швидкості v_{k+1} в момент часу τ_{k+1} у вигляді

$$v_{k+1} \approx v_k + \frac{(a^2 + b^2)}{2ab} (\tau_{k+1} - \tau_k) \ln \left(i_k + \sqrt{i_k^2 + 1} \right) - (f_0 + f_1 v_k + f_2 v_k^2) (\tau_{k+1} - \tau_k) \quad (7)$$

та рівняння для визначення значення відносного струму $i_k(n)$ у вигляді

$$i_k(n) = i_k(n-1) - \frac{C_3}{n} \left\{ 2a \sqrt{(i_k(n-1))^2 + 1} (1 - 2\alpha i_k(n-1)) - \left(\frac{a^2 + b^2}{b} \right) \left(C_1^* e^{(f_1 \tau_k + 2f_2 v_k)(\tau_{k+1} - \tau_k)} - \frac{C_2^*}{f_1 + 2f_2 v_k} \right) \right\}, \quad (8)$$

ітераційний процес за якими слід зупиняти, коли виконуватиметься умова

$$|i_k(n) - i_k(n-1)| \leq \varepsilon, \quad (9)$$

де ε — прийняте авторами числове значення відносної похибки визначення струму в ітераційному процесі, враховуючи яку вважатимемо, що

$$i_k(n) = i_k. \quad (10)$$

Ці математичні моделі і критеріальні обмеження і покладені нами в основу для здійснення комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB процесу оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом (АЕП) горизонтальним відрізком дороги.

Синтез структури комп'ютерної моделі в середовищі MATLAB

Моделювання оптимального руху електромобіля з АЕП будемо виконати в середовищі MATLAB з використанням його пакету прикладних програм та однойменної мови програмування.

Процес синтезу алгоритмів комп'ютерної моделі поданий на рис. 1—4.

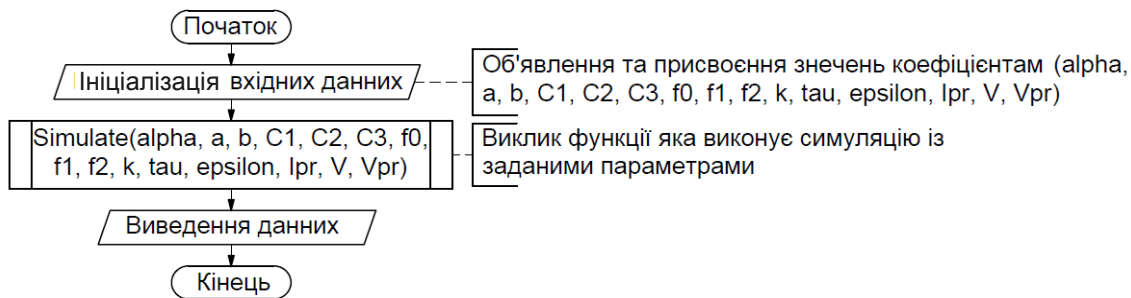


Рис. 1. Алгоритм підготовки до початку процесу моделювання

Попередніми приготуваннями перед виконанням програми для отримання необхідних графічних а також чисельних даних моделювання з використанням вищенаведених моделей оптимально-

го руху є налаштування середовища MATLAB, а саме: завантаження файлу даних з розширенням .mat в якому знаходяться чисельні параметри моделі, розрахунок яких описано в роботі [3]; виклик функції, що розпочинає процес моделювання; виведення графічних та числових даних. Ця фаза процесу комп'ютерного моделювання представлена алгоритмом, показаним на рис. 1.

Викликом функції *Simulate* розпочинається процес виконання програми моделювання за алгоритмом, показаним на рис. 2. В тілі цієї функції циклічно виконується виклик ще двох функцій, які обчислюють значення струму та швидкості, алгоритми яких показані на рис. 3 та 4, відповідно, протягом часу τ_l (в програмі це змінна — *tau*), що є граничною умовою, через кожний проміжок часу $\tau_{k+1} \dots \tau_k$ (k — в програмі). З обчислених значень формуються масиви значень струму, швидкості, подоланої відстані та відліку часу, за якими формуються графіки та визначаються фактичні результати моделювання, подані в табл. 1 та на рис. 5—8.



Рис. 2. Алгоритм виконання функції, що ініціює процес моделювання

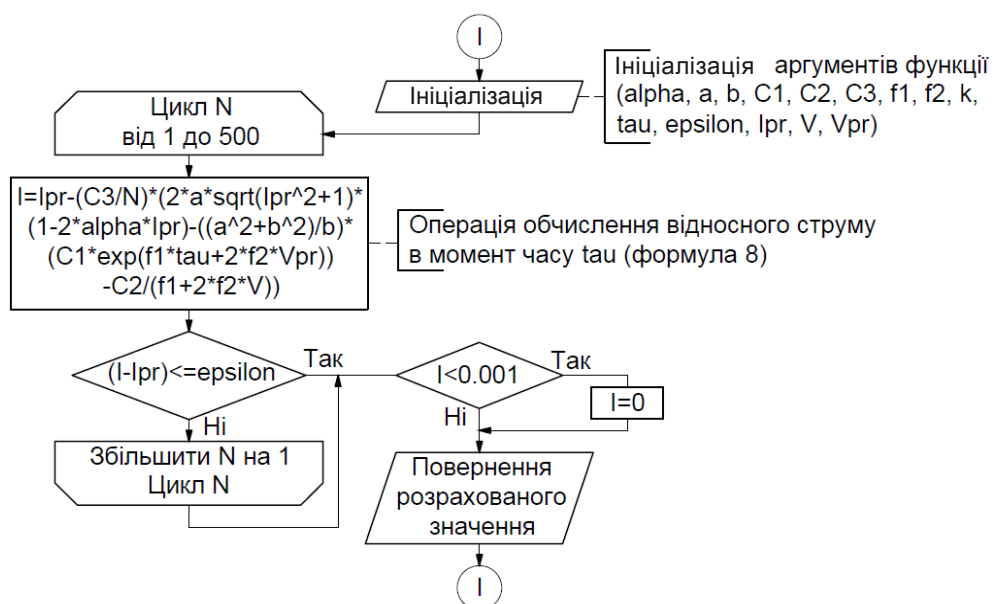


Рис. 3. Алгоритм виконання функції розрахунку відносного струму методом послідовного наближення

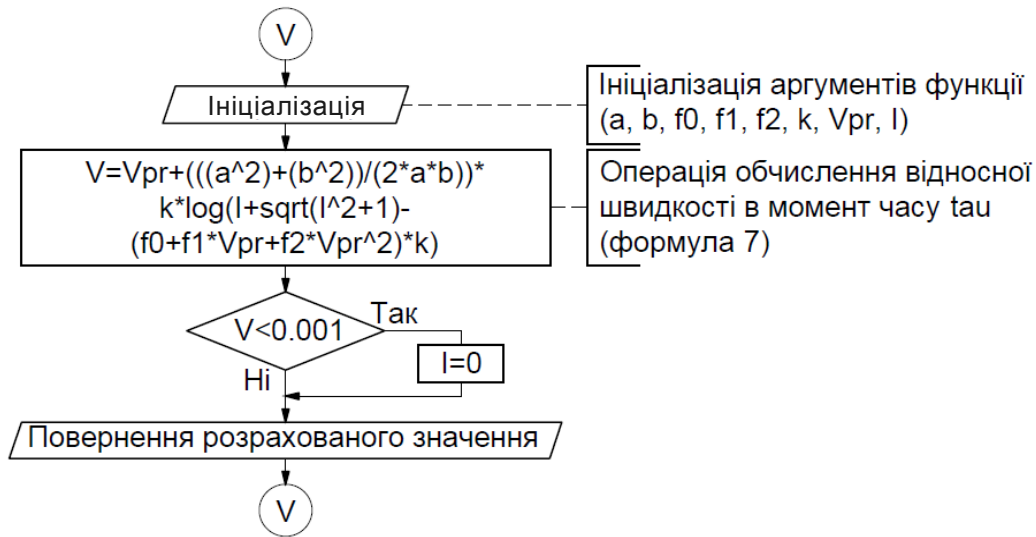


Рис. 4. Алгоритм виконання функції розрахунку відносної швидкості

Таблиця 1

Дані для чотирьох варіантів моделювання оптимального руху

Варіант	Початкові умови			Граничні умови				Результат					
	$I(0)$	$v(0)$	l_0	$i(\tau_l)$	$v(\tau_l)$	l_l	τ_l	l_l	$i(\tau_l)$	$v(\tau_l)$	C_1	C_2	C_3
1	1	0	0	0	0	50	40	50,075	0	0,02	0	-0,012	0,0172
2						80	60	80,045	0	0,03	0	-0,012	0,0107
3						50	60	50,016	0	0	-0,0001	-0,012	0,0035
4						60	100	60	0	0	-1,001	-0,012	$2,95 \cdot 10^{-7}$

Результати моделювання графічно показані на рис. 5—8.

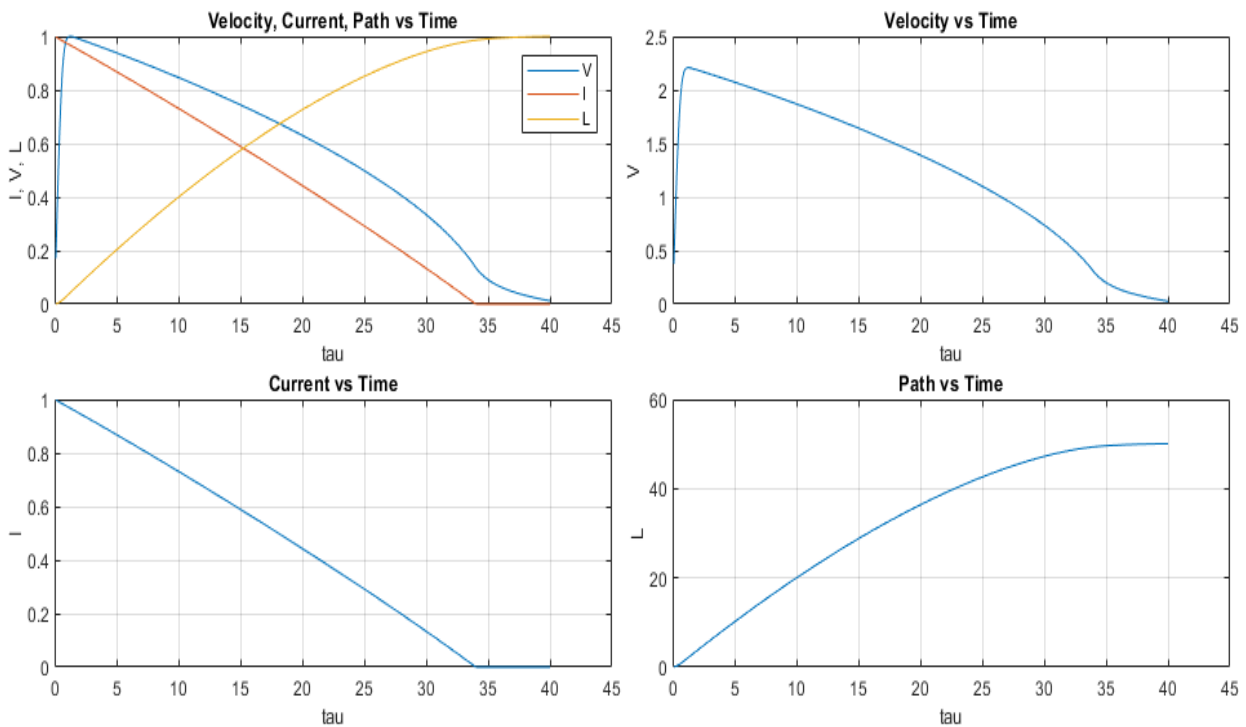


Рис. 5. Варіант 1

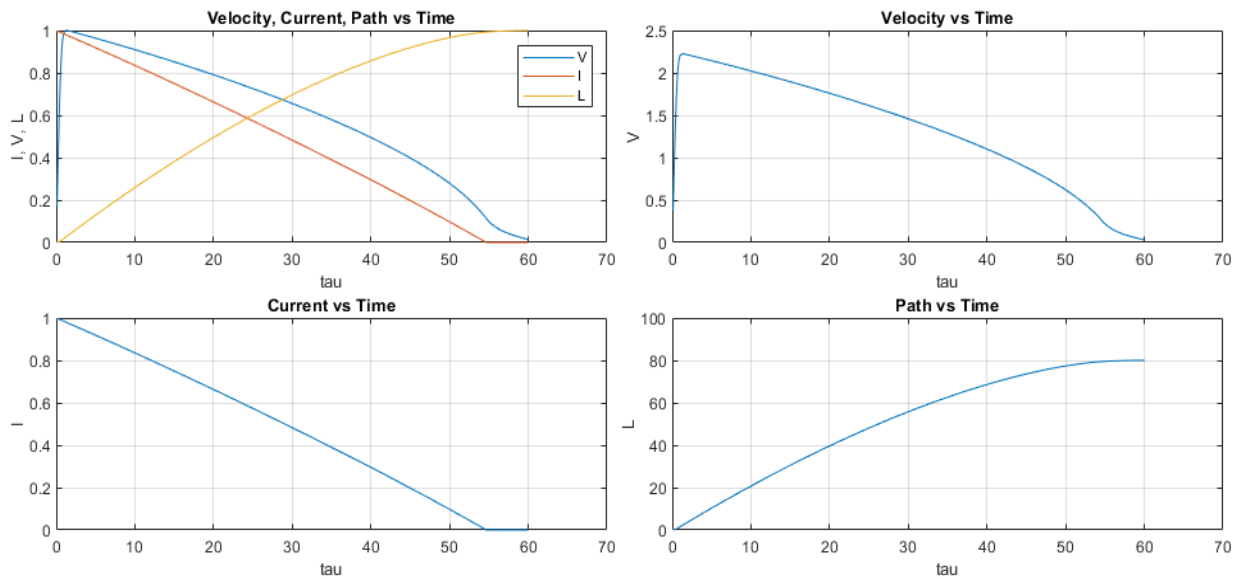


Рис. 6. Варіант 2

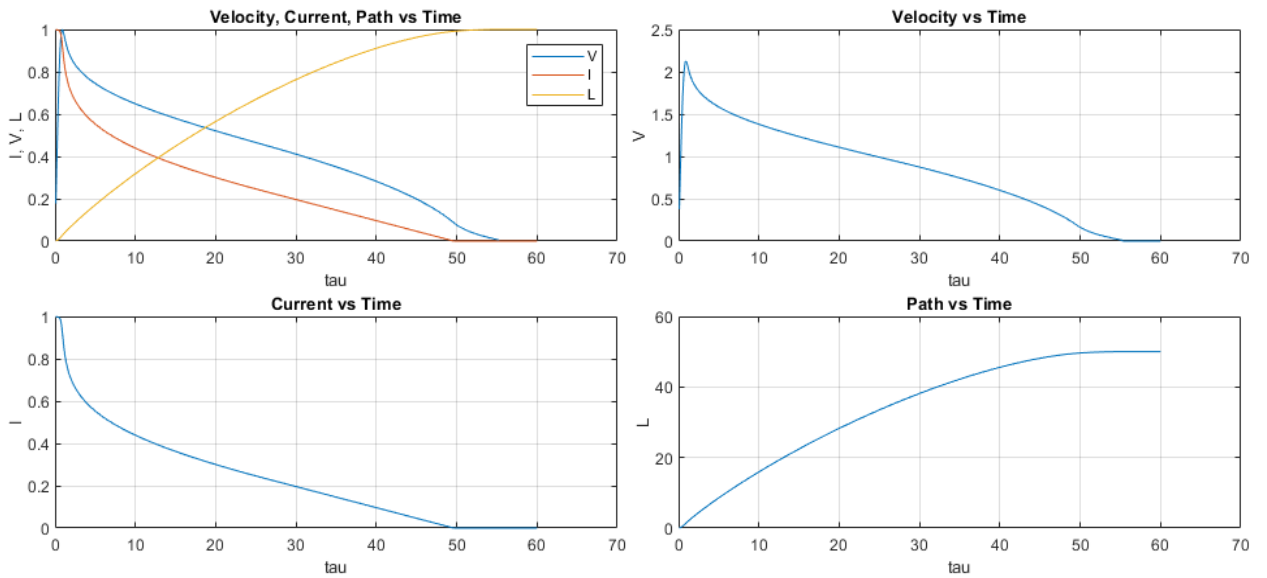


Рис. 7. Варіант 3

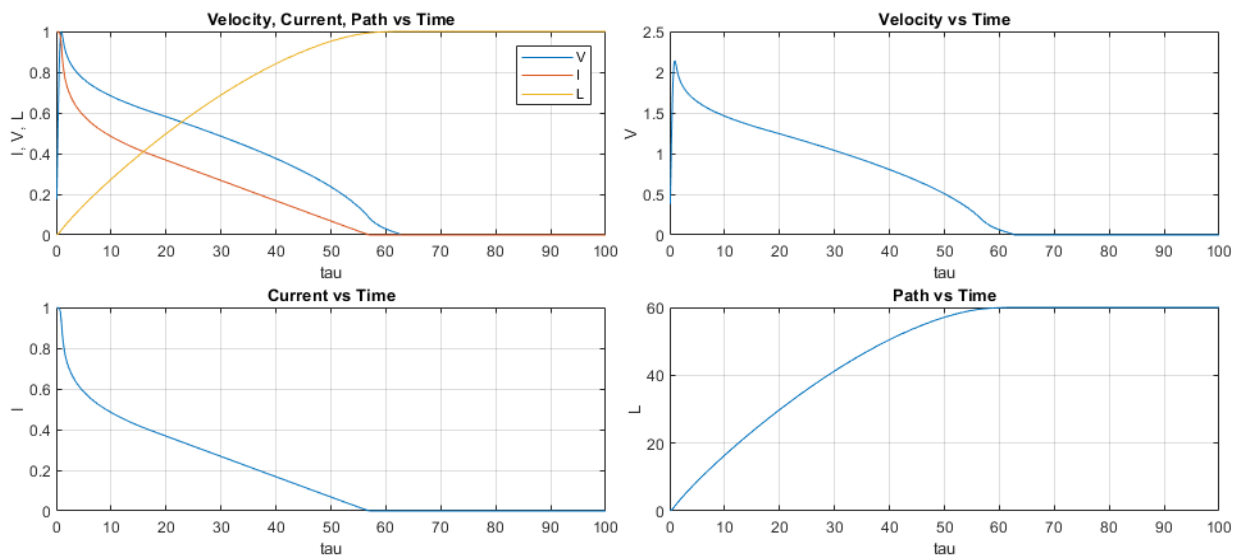


Рис. 8. Варіант 4

Аналіз отриманих результатів

З графіків, проказаних для кожного варіанта моделювання на рис. 5—8, легко бачити, що має місце певна інерційність виконання процесів. Так у момент часу, коли струм уже дорівнює нулю швидкість ще має певну залишкову величину, котра поступово зменшується до нуля. Це є характерним і для реальних автомобілів, які після припинення подання на колеса тягового зусилля від двигуна за відсутності примусового гальмування продовжуватимуть рухатись з від'ємним прискоренням, яке зумовлене реактивними силами (опір повітря, опір кочення тощо), до повної зупинки. Інерційність в моделі залежить від коефіцієнта C_2 .

З графіків за варіантами 1 та 2 можна бачити результати моделювання, які характеризують зв'язок між подоланою відстанню та часом, що близький до мінімально можливого, тобто характеризують максимально швидке проходження заданої відстані.

Коефіцієнт C_3 задає пологість кривої струму, чим він більший тим крутіший нахил кривої, таким чином здійснюється регуляція відстані, яка досягається.

Коефіцієнт C_1 ніяк не впливає на модель перших двох варіантів через обмеження виділеного граничними умовами часу на проходження заданої відстані, який близький до мінімального за якого виконуватимуться граничні умови. А у варіантах 3 і 4 бачимо, що вплив коефіцієнта C_1 уже присутній. Чим більше його абсолютне значення тим більш вигнута буде крива струму і відповідно менше енергії буде затрачено на проходження заданої відстані з більшою затратою часу.

Варто зазначити, що для всіх варіантів значення коефіцієнта C_2 , від числового значення якого залежить інерційність, є однаковим для вибраних граничних умов цих варіантів. Розраховувався він так, як і описано в роботі [3]. Однак, якщо для комп'ютерного моделювання використовувати розрахований, як описано в [3], коефіцієнт C_1 , то він буде однаковим для усіх випадків окрім тих, для яких значення заданого граничного часу і необхідної відстані, яку потрібно подолати, є невеликими (не більше 5—7 відносних одиниць, як для часу так і для відстані). Такі варіанти в цій роботі не розглядалися через те, що тривалість вибігу займе майже весь виділений час на проходження заданої відстані, і таким чином не буде задоволено граничні умови при врахуванні початкових. Тому необхідне числове значення параметра C_1 знаходилось, як і C_3 , шляхом послідовного наближення для кожного варіанта, за яких виконувались задані умови.

Звертає на себе увагу особливість, що добре проявилась у варіанті 4, з якого легко бачити, що задана відстань була пройдена за час, суттєво менший від граничного. І якщо прослідкувати тенденцію зміни коефіцієнтів за всіма представленими варіантами, то можна пересвідчитись у тому, що подальша зміна значень регулюючих коефіцієнтів навіть на порядки дає все менший вплив на результат.

Отже результати моделювання свідчать про те, що існує можливість забезпечення виконання критерію оптимального енергоспоживання шляхом підбору відповідних регулюючих коефіцієнтів.

Висновки

Здійснено моделювання руху електромобіля з асинхронним електроприводом по горизонтальному відрізку дороги, оптимального за критерієм мінімуму електричних втрат, з використанням синтезованих авторами у попередніх роботах моделей, в основу яких покладено математичну модель кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса та варіаційний варіант методу невизначених множників Лагранжа. Чотири варіанти моделювання з різними значеннями параметрів моделей та різними значеннями граничних умов здійснено з використанням пакету прикладних програм MATLAB.

Аналіз результатів моделювання свідчить про здатність синтезованих моделей, використаних для комп'ютерного моделювання, в разі їх використання як основу законів керування електромобілем, забезпечувати виконання критерію оптимальності споживання електричного заряду САБ електроприводом електромобіля та задовольняти обмеження, задані початковими та граничними умовами, чим підтверджено теоретичні виклади та доведено ефективність синтезованих моделей, що були представлені в попередніх роботах авторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, В. В. Горенюк, «До питання оптимізації руху електромобіля з асинхронним електроприводом». *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 32-38, 2019.

- [2] Ю. П. Петров, *Вариационные методы теории оптимального управления*. Москва-Ленинград: Энергия, 1965, 220 с.
[3] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, В. В. Горенюк, «Метод ідентифікації моделей оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом». *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 32-38, 2020.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 23.09.20

Мокін Борис Іванович — академік НАПН України, д-р техн. наук, професор, професор кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, професор кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, e-mail: borys.mokin@gmail.com ;

Мокін Олександр Борисович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, e-mail: abmokin@gmail.com ;

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

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

B. I. Mokin¹
O. B. Mokin¹
V. V. Horeniuk¹

Optimal Movement Modeling of an Electric Car with a Traction Induction Motor by a Horizontal Section of the Road

¹Vinnitsia National Technical University

There has been done the simulation of the optimal motion model of an electric car with a traction induction motor by the horizontal road section, optimal by 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 variational variant of the Lagrange's indefinite multipliers method. Four simulation variants with different values of model parameters and different values of boundary conditions were implemented using the MATLAB application package. The obtained results are visualized by constructing appropriate graphs for the output coordinates of the models that characterize the optimal mode of motion.

The analysis of the results of all four modeling variants using synthesized models is carried out, on the basis of which it is established that the movement of an electric car on a horizontal section of the road, if its control system will implement the law based on synthesized models the electric car of the same distance for the same time will use the minimum consumption of electric charge of the power accumulator battery from which the electric drive of the electric car receives the electric power.

Thus, the simulation results and their analysis confirm the theoretical statements and the effectiveness of mathematical optimal motion models of the electric car by a horizontal section of the road, synthesized in authors' previous works.

Keywords: electric car, traction induction electric drive, optimal motion models, simulation, direct and iterative processes.

Mokin Borys I. — Academician of NAPS of Ukraine, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Electromechanical Systems Automation in Industry and Transport, Professor of the Chair of Systems Analysis and Information Technology, e-mail: borys.mokin@gmail.com ;

Mokin Oleksandr B. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Systems Analysis and Information Technology, e-mail: abmokin@gmail.com ;

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

Б. И. Мокин¹
А. Б. Мокин¹
В. В. Горенюк¹

Моделирование оптимального движения электромобиля с асинхронным электроприводом горизонтальным отрезком дороги

¹Вінницький національний технічний університет

Осуществлено моделювання руху електромобіля з асинхронним електроприводом по горизонтальному відрізку дороги, оптимального по критерію мінімуму електричних втрат, з використанням синтезованих авторами моделей, в основу яких покладена математична модель кривої намагнічування в вигляді оберненого гіперболічного синуса і варіаційний варіант методу неопределенних множителей Лагранжа. Чотири варіанти моделювання з різними значеннями параметрів моделей і різними значеннями граничних умов здійснено з використанням пакета прикладних програм MATLAB. Осуществлено візуалізацію отриманих результатів шляхом побудови відповідних графіків для вихідних координат моделей, що характеризують оптимальний режим руху.

Проведено аналіз результатів всіх чотирьох варіантів моделювання з використанням синтезованих моделей, на основі якого встановлено, що рух електромобіля горизонтальним відрізком дороги в тому випадку, якщо його системою управління буде реалізований закон, в основу якого будуть покладені алгоритми, засновані на синтезованих моделях, то для покриття електромобілем однієї і тієї ж відстані за один і той же час буде використано мінімальне споживання електричного заряду силової акумуляторної батареї, від якої отримується електроенергія електроприводу електромобіля.

Слідовательно результати моделювання і їх аналіз підтверджують теоретичні висловлювання і ефективність математичних моделей оптимального руху електромобіля по горизонтальному відрізку дороги, синтезованих в попередніх роботах авторів.

Ключевые слова: електромобіль, тяговий асинхронний електропривод, модель оптимального руху, комп'ютерне моделювання, прямий і ітераційний процеси.

Мокин Борис Иванович — академик НАПН України, д-р техн. наук, професор, професор кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, професор кафедри системного аналізу і інформаційних технологій, e-mail: bogys.mokin@gmail.com ;

Мокин Александр Борисович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу і інформаційних технологій, e-mail: abmokin@gmail.com ;

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