

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 62–835

О. Б. Мокін¹
Б. І. Мокін¹
В. А. Лобатюк¹

МЕТОД ТА СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЕМ, ЩО РУХАЄТЬСЯ У МІСЬКОМУ ТРАНСПОРТНОМУ ПОТОЦІ

¹Вінницький національний технічний університет

Запропоновано метод та систему оптимального керування електромобілем, що рухається у міському транспортному потоці зі змінною швидкістю, обумовленою знаками світлофору та впливом транспортних засобів, що рухаються попереду. Показано, що за будь-якої швидкості електромобіля можна сформуванати такий струм у якорі тягового електродвигуна постійного струму з послідовним збудженням, який мінімізуватиме витрати енергії акумулятора.

Ключові слова: електромобіль, змінна швидкість, струм якоря, оптимальне керування, енергія акумулятора, мінімум витрат, система керування

Вихідні передумови та постановка задачі

В роботі [1] доведено, що завантажений електромобіль з тяговим електродвигуном постійного струму з послідовним збудженням, підключеним до акумуляторної батареї згідно зі схемою, показаною на рис. 1, рухатиметься горизонтальним відрізком автомагістралі, мінімізуючи витрати енергії акумуляторної батареї, лише тоді, коли струм у його силовому контурі формуватиметься за законом, математична модель якого має вигляд

$$i(\tau) = \frac{1 - a_1 \left(C_2 e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} - \frac{C_1}{f_1 + 2f_2 v} \right)}{2\alpha + 2b_1 \left(C_2 e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} - \frac{C_1}{f_1 + 2f_2 v} \right)}, \quad (1)$$

де $i = \frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{н}}}$ — відносний струм силового контуру; $\tau = \frac{t}{T_M}$ — відносний час; $v = \frac{V}{V_{\text{н}}}$ — відносна лі-

нійна швидкість електромобіля; $\alpha = \frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{к}}}$ — коефіцієнт нахилу статичної характеристики $u = f(i)$

силового контуру, яка має вигляд

$$u = 1 - \alpha i, \quad (2)$$

і в якій $u = \frac{U}{U_{\text{н}}}$ — відносна напруга; a_1, b_1 — коефіцієнти кривої намагнічування тягового електро-

двигуна, математична модель якої має вигляд

$$\phi(i) = \begin{cases} -a_2 i^2 + b_2 i, & i \in [0, i_{\text{сп}}); \\ a_1 + b_1 i, & i \in [i_{\text{сп}}, \infty), \end{cases} \quad (3)$$

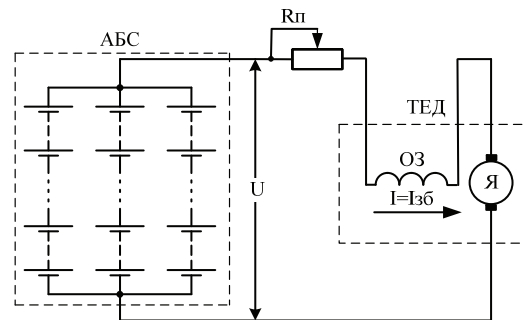


Рис. 1. Електрична схема основного силового контуру електропривода електромобіля з регульованим опором лінії між акумуляторною батареєю та вхідними клеммами тягового електродвигуна

у якій $\phi(i) = \frac{\Phi(I_{03})}{\Phi(I_H)}$ — відносний магнітний потік, що є функцією відносного струму i ; C_1, C_2 —

невідомі коефіцієнти, а $f_1 = \frac{\mu_1 R V_H}{w k_M I_H \Phi(I_H)}$; $f_2 = \frac{\mu_2 R V_H^2}{w k_M I_H \Phi(I_H)}$ — коефіцієнти математичної моделі динаміки електропривода, що у відносних величинах має вигляд

$$\frac{dv}{d\tau} = a_1 i + b_1 i^2 - f_0 - f_1 v - f_2 v^2, \quad (4)$$

у якій є ще й коефіцієнт $f_0 = \frac{\mu_0 R}{w k_M I_H \Phi(I_H)}$. Варто нагадати також, що необхідна для визначення відносного часу електромеханічна стала часу тягового електропривода електромобіля T_M визначається з виразу

$$T_M = \frac{m V_H R}{w k_M I_H \Phi(I_H)}, \quad (5)$$

де m — маса електромобіля; w — передаточне число редуктора від колеса до тягового електродвигуна, R — радіус колеса; k_M — обмоточний коефіцієнт зв'язку між моментом обертання якоря тягового електродвигуна та струмом у обмотці якоря і магнітним потоком його обмотки збудження. Визначається цей коефіцієнт з використанням паспортних даних тягового електродвигуна.

В роботі [2] доведено, що незавантажений електромобіль з тяговим електродвигуном постійного струму з послідовним збудженням, підключеним до акумуляторної батареї згідно зі схемою, показаною на рис. 1, рухатиметься горизонтальним відрізком автомагістралі, мінімізуючи витрати енергії акумуляторної батареї, лише тоді, коли струм у його силовому контурі формуватиметься за законом, математична модель якого має вигляд

$$i(\tau) = \frac{2\alpha + 2b_2 \lambda_1(\tau) - \sqrt{(2\alpha + 2b_2 \lambda_1(\tau))^2 - 12a_2 \lambda_1(\tau)}}{6a_2 \lambda_1(\tau)}, \quad (6)$$

$$\lambda_1(\tau) = C_2^* e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} - \frac{C_1^*}{f_1 + 2f_2 v},$$

а математична модель динаміки системи електропривода має такий вигляд:

$$\frac{dv}{d\tau} = -a_2 i^3 + b_2 i^2 - f_0 - f_1 v - f_2 v^2. \quad (7)$$

В роботі [3] побудована математична модель для визначення швидкості руху електромобіля горизонтальним відрізком автомагістралі від одного пункту до іншого, адекватної струму тягового електродвигуна електромобіля, оптимальному за критерієм мінімуму витрат енергії акумулятора, визначено структуру закону та алгоритм оптимального руху електромобіля горизонтальним відрізком автомагістралі шляхом переходу від моделей оптимального струму тягового електродвигуна до параметрів швидкості руху, що відповідає цьому струму і вказані шляхи реалізації водієм електромобіля побудованого закону оптимального руху.

В цій роботі *ставиться завдання* синтезувати закон оптимального керування електромобілем, що рухається у міському транспортному потоці зі змінною швидкістю, обумовленою знаками світлофорів та впливом транспортних засобів, що рухаються попереду, показати, що за будь-якої швидкості електромобіля можна сформулювати такий струм у якорі тягового електродвигуна постійного струму з послідовним збудженням, який мінімізуватиме витрати енергії акумулятора, та запропонувати метод і систему оптимального керування електромобілем.

Розв'язання поставленої задачі

Розв'язуючи поставлену задачу, очевидно, необхідно віднайти відповіді на три запитання, а саме:

1. Як для кожного конкретного значення швидкості електромобіля, скориставшись математичними моделями (1) або (6), ідентифікувати оптимальне значення струму якоря його тягового електродвигуна?

2. Яким чином враховувати особливості руху електромобіля на спуск, на підйом та у горизонтальній площині?

3. Яким чином, керуючи електромобілем, реалізувати ідентифіковане оптимальне значення струму якоря його тягового електродвигуна, тобто як побудувати метод і систему оптимального керування цим електромобілем?

Почнемо шукати відповідь на перше з цих питань, задаючись для спрощення пошуку цієї відповіді умовою, що електромобіль завантажений і рухається горизонтальним відрізком дороги, тобто, що для нього справедливими є модель оптимального струму (1) та модель динаміки руху (4).

В моделі оптимального струму (1) невідомими є лише константи C_1 , C_2 , тож для її ідентифікації саме ці дві константи треба і визначити чисельно. А для цього нам потрібна система із двох рівнянь, в яких ці константи виступатимуть невідомими. Для побудови цих рівнянь скористаємось виразом (4), в який підставимо, по-перше, значення струму, що задається моделлю (1), а по-друге наближене значення похідної швидкості:

$$\frac{dv}{d\tau} \approx \frac{v_{i+1} - v_i}{\tau_{i+1} - \tau_i} = \frac{v_{i+1} - v_i}{\tau_c}, \quad i = 0, 1, \quad (8)$$

де τ_c — це період дискретизації відносної швидкості у відносному часі, яке буде більшим нуля при розгоні електромобіля, меншим нуля при його гальмуванні і дорівнюватиме нулю під час їзди електромобіля з незмінною швидкістю.

В результаті цієї підстановки, фіксуючи три значення часу τ_0 , τ_1 , τ_2 і три значення швидкості v_0 , v_1 , v_2 , взяті через період дискретизації τ_c після початку відліку τ_0 , отримаємо два рівняння:

$$v_{i+1} = -f_0\tau_c + (1 - f_1\tau_c)v_i - f_2\tau_c v_i^2 + a_i\tau_c \left[\frac{1 - a_1 \left(C_2 e^{(f_1+2f_2v_i)\tau_i} - \frac{C_1}{f_1 + 2f_2v_i} \right)}{2\alpha + 2b_1 \left(C_2 e^{(f_1+2f_2v_i)\tau_i} - \frac{C_1}{f_1 + 2f_2v_i} \right)} \right] + b_1\tau_c \left[\frac{1 - a_1 \left(C_2 e^{(f_1+2f_2v_i)\tau_i} - \frac{C_1}{f_1 + 2f_2v_i} \right)}{2\alpha + 2b_1 \left(C_2 e^{(f_1+2f_2v_i)\tau_i} - \frac{C_1}{f_1 + 2f_2v_i} \right)} \right]^2, \quad i = 0, 1, \quad (9)$$

в яких невідомими є лише константи C_1 , C_2 . Тож розв'язуючи ці рівняння відносно вказаних констант, ми отримаємо їх чисельні значення C_1^* , C_2^* , які і є розв'язком задачі ідентифікації оптимального струму, заданого моделлю (1).

Три важливі зауваження стосовно цього розв'язку.

1. Оскільки, розв'язуючи рівняння (9), ми прив'язуємось до швидкості v_0 , то можемо покласти в них $\tau_0 = 0$ та $\tau_1 = \tau_c$, що спростує ці рівняння і полегшує їх розв'язання.

2. Розв'язки C_1^* , C_2^* рівнянь (9) потрібно знаходити окремо для розгону електромобіля, коли $v_{i+1} > v_i$, окремо для гальмування електромобіля, коли $v_{i+1} < v_i$, і окремо для руху з постійною швидкістю, коли $v_{i+1} = v_i$.

3. Отримувати розв'язки для режиму розгону електромобіля, режиму гальмування та режиму руху з незмінною швидкістю необхідно лише один раз, використовуючи стаціонарний комп'ютер, і в базу бортового автомобільного комп'ютера необхідно занести ці розв'язки теж лише один раз, викликаючи їх з цієї бази кожного разу, коли необхідно за формулою (1) обчислити значення оптимального струму в потрібний момент часу.

Цілком очевидно, що якщо електромобіль не завантажений, а тому модель оптимального струму його тягового електродвигуна матиме вигляд (6), то алгоритм її ідентифікації буде аналогічним вищеописаному для моделі (1) з тією лише різницею, що для отримання рівнянь, потрібних для ідентифікації, необхідно підставляти у вираз (7) модель (6) і далі будувати аналог рівнянь (9), уже виходячи з результату цієї підстановки.

Тепер перейдемо до формування відповіді на друге із поставлених вище запитань. Рівняння (9) побудовані нами для випадку, коли електромобіль рухається дорогою, прокладеною у горизонтальній площині. Однак і для випадків, коли електромобіль рухається на спуск чи на підйом, алгоритм їх побудови майже не ускладнюється, оскільки моделі оптимального струму (1), (6) і у цих випадках залишаються правильними, а змінюються лише базові рівняння динаміки електромобіля, які, як показано у роботі [4], набувають вигляду:

для спуску:

— для завантаженого електромобіля

$$\frac{dv}{d\tau} = a_1 i + b_1 i^2 + f_0^* \sin \beta - f_0 \cos \beta - f_1 v - f_2 v^2; \quad (10)$$

— для незавантаженого електромобіля

$$\frac{dv}{d\tau} = -a_2 i^3 + b_2 i^2 + f_0^* \sin \beta - f_0 \cos \beta - f_1 v - f_2 v^2, \quad (11)$$

а для підйому:

— для завантаженого електромобіля

$$\frac{dv}{d\tau} = a_1 i + b_1 i^2 - f_0^* \sin \beta - f_0 \cos \beta - f_1 v - f_2 v^2; \quad (12)$$

— для незавантаженого електромобіля

$$\frac{dv}{d\tau} = -a_2 i^3 + b_2 i^2 - f_0^* \sin \beta - f_0 \cos \beta - f_1 v - f_2 v^2. \quad (13)$$

Нагадаємо [4], що в рівняннях β — кут нахилу поздовжньої осі дорожнього полотна до горизонтальної площини, а $f_0^* = \frac{f_0}{k_0}$, де k_0 — це коефіцієнт тертя коліс електромобіля об дорожнє полотно.

Але цілком зрозуміло, що з використанням в якості базових рівнянь динаміки електромобіля виразів (10)—(12) ми отримаємо при ідентифікації моделей оптимального струму (1), (6) уже не пари числових констант C_1^* , C_2^* , які різняться для розгону, гальмування і руху з незмінною швидкістю, а пари залежностей $C_1^*(\beta)$, $C_2^*(\beta)$, для визначення яких необхідно, задаючись різними значеннями кута $\beta = \beta_q$, $q = 1, 2, \dots, N$, для кожного з цих значень визначити пари чисел $C_1^*(\beta_q)$, $C_2^*(\beta_q)$, які потім апроксимувати функціями $C_1^*(\beta)$, $C_2^*(\beta)$, і в базу автомобільного комп'ютера закласти уже не три пари чисел C_1^* , C_2^* (для розгону, гальмування та руху з незмінною швидкістю) а три пари функцій $C_1^*(\beta)$, $C_2^*(\beta)$ (для тих самих режимів руху).

А тепер перейдемо до формування відповіді на третє з поставлених на початку цього розділу запитань, тобто, перейдемо до розроблення методу і системи керування електромобілем за законами оптимального руху.

Прив'яжемо процедуру обґрунтування нашої розробки до рис. 2, на якому уже показана функціональна схема системи оптимального керування електромобілем у завершеному вигляді, де 1 — акумуляторна батарея, 2 — тяговий електродвигун, 3 — змінний опір в якірному ланцюгу електродвигуна, 4 — амперметр, 5 — бортовий комп'ютер, 6, 7, 8 — аналого-цифрові перетворювачі струму якоря, швидкості руху електромобіля та кута нахилу його поздовжньої осі до горизонтальної площини, 9, 10, 11 — вимірювальні перетворювачі (датчики) струму якоря, швидкості руху та кута нахилу, 12 — екран бортового комп'ютера, 13 — пристрій регулювання змінним опором, 14 — водій електромобіля.

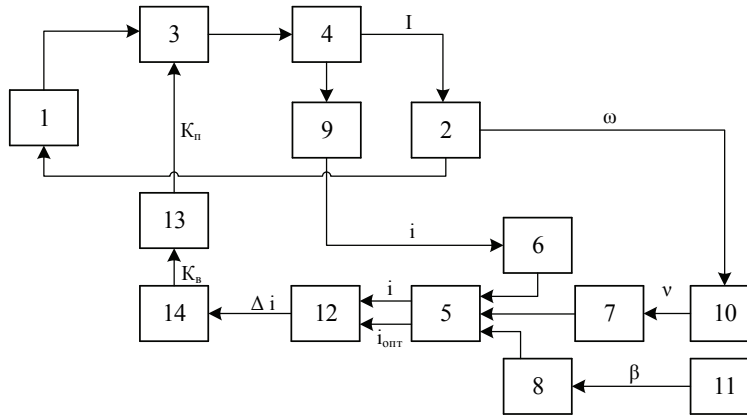


Рис. 2. Функціональна схема системи оптимального керування електромобілем

З рис. 2 видно, що змінювати струм якоря I приводного електродвигуна 2 при заданій швидкості руху V можна шляхом зміни опору 3 в якорному ланцюгу, замкненому на акумуляторну батарею 1. Цей змінний опір можна зробити регульованим, якщо його реалізувати на силовому транзисторі, сигнал на базу якого формуватиметься водієм електромобіля 14 за допомогою відповідного пристрою 13. Зміряний амперметром 4 струм якоря через перетворювач 9 і АЦП 6 уже у вигляді відносного струму i подається на бортовий комп'ютер 5 і відображається на його екрані 12 точкою, що рухається по відповідній траєкторії. На два інших входи бортового комп'ютера подається від датчика 11 через АЦП 8 кут нахилу повздожньої осі електромобіля до горизонтальної площини, а від датчика 10 через АЦП 7 відносна швидкість руху електромобіля. Бортовий комп'ютер, використовуючи математичну модель (1) у випадку завантаженого електромобіля чи (6) у випадку не завантаженого, розраховує оптимальне значення i_{opt} відносного струму, яке відповідає вимірним значенням відносної швидкості v та кута β нахилу осі електромобіля, і виводить його на екран у вигляді другої точки, що рухається по відповідній траєкторії. Водієві електромобіля необхідно, дивлячись на екран бортового комп'ютера, шляхом впливу через пристрій керування (рукою чи ногою — залежно від конструкції) на змінний опір так формувати струм якоря тягового електродвигуна, щоб мінімізувати відстань на екрані бортового комп'ютера між траєкторіями i та i_{opt} .

Цілком очевидно, що в бортовий комп'ютер необхідно завантажити і інформацію про попередньо визначені на стаціонарному комп'ютері залежності $C_1^*(\beta)$, $C_2^*(\beta)$ для режимів розгону, гальмування та руху з незмінною швидкістю і програми визначення значень оптимального струму за допомогою математичних моделей (1) і (6), програму встановлення режиму руху в залежності від знаку похідної швидкості і програму вибору пари констант із базових залежностей $C_1^*(\beta)$, $C_2^*(\beta)$ для конкретних значень кута нахилу.

Висновки

Запропоновано метод та систему оптимального керування електромобілем, що рухається у міському транспортному потоці зі змінною швидкістю, обумовленою знаками світлофору та впливом транспортних засобів, що рухаються попереду.

Показано, що за будь-якої швидкості електромобіля можна сформувати такий струм у якорі тягового електродвигуна постійного струму з послідовним збудженням, який мінімізуватиме витрати енергії акумулятора.

Визначено шляхи реалізації запропонованих методу та системи оптимального керування електромобілем, адаптованих до режимів руху при розгоні, гальмуванні і незмінній швидкості та до руху на спуск, підйом і горизонтальною площиною.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Оптимізація руху завантаженого електромобіля з тяговим електродвигуном постійного струму послідовного збудження по горизонтальному прямолінійному відрізку дороги / О. Б. Мокін, О. Д. Фолюшняк, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2013. — № 1. — С. 56—60.
2. Оптимізація руху незавантаженого електромобіля з тяговим електродвигуном постійного струму послідовного збудження по горизонтальному прямолінійному відрізку дороги / О. Б. Мокін, О. Д. Фолюшняк, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2013. — № 2. — С. 48—51.

3. Синтез закону керування оптимальним рухом електромобіля горизонтальним відрізком автомагістралі [Електронний ресурс] / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, О. Д. Фолушняк, В. А. Лобатюк // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. — 2014. — № 1. — С. 1—7. — Режим доступу : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/392/390> .

4. Мокін О. Б. Декомпозиція задачі оптимізації руху транспортного засобу з комбінованим приводом [Електронний ресурс] / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк, О. П. Кубрак // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. — 2015. — № 3. — С. 1—9. — Режим доступу : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/9/9> .

Рекомендована кафедрою відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів ВНТУ

Стаття надійшла 17.06.2016

Мокін Олександр Борисович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, e-mail: abmokin@gmail.com;

Мокін Борис Іванович — акад. НАПН України, д-р техн. наук, професор, професор кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів;

Лобатюк Віталій Анатолійович — аспірант кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

О. В. Mokin¹
В. І. Mokin¹
V. A. Lobatiuk¹

Method and System for Optimal Control of an Electric Car Moving in a City Traffic Flow

¹Vinnitsia National Technical University

A method and system for optimal control of an electric car moving in a city traffic flow with variable speed caused by traffic lights and impact of vehicles moving ahead of it have been proposed. It has been demonstrated that at any speed of the electric car it is possible to generate current in the anchor of DC traction motor with series excitation that will minimize the accumulator power consumption.

Keywords: electric car, variable speed, armature current, optimal control, energy battery, minimum cost management system.

Mokin Olexandr B. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Renewable Energy and Transport Electrical Systems and Complexes, e-mail: abmokin@gmail.com;

Mokin Borys I. — Academician of NAPS of Ukraine, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Renewable Energy and Transport Electrical Systems and Complexes;

Lobatiuk Vitalii A. — Post-Graduate Student of the Chair of Renewable Energy and Transport Electrical Systems and Complexes

А. Б. Мокін¹
В. И. Мокін¹
В. А. Лобатюк¹

Метод и система оптимального управления электромобилем, движущегося в городском транспортном потоке

¹Винницкий национальный технический университет

Предложены метод и система оптимального управления электромобилем, движущегося в городском транспортном потоке с переменной скоростью, определяемой знаками светофора и влиянием транспортных средств, движущихся впереди. Показано, что при любой скорости электромобиля можно сформировать такой ток в якоре тягового электродвигателя постоянного тока с последовательным возбуждением, который минимизирует затраты энергии аккумулятора.

Ключевые слова: электромобиль, переменная скорость, ток якоря, оптимальное управление, энергия аккумулятора, минимум затрат, система управления.

Мокін Олександр Борисович — д-р техн. наук, професор, заведуючий кафедрою возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов, e-mail: abmokin@gmail.com;

Мокін Борис Іванович — акад. НАПН України, д-р техн. наук, професор, професор кафедри возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов;

Лобатюк Віталій Анатолійович — аспірант кафедри возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов