

УДК 681.5.015+62-83:629.33

О. Б. Мокін, д. т. н., доц.; Б. І. Мокін, д. т. н., проф.;
О. Д. Фолішняк; В. А. Лобатюк

СИНТЕЗ ЗАКОНУ КЕРУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИМ РУХОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИМ ВІДРІЗКОМ АВТОМАГІСТРАЛІ

У роботі синтезовано закон керування рухом електромобіля горизонтальним відрізком автомагістралі, оптимальним за критерієм мінімуму витрат енергії акумуляторної батареї.

Ключові слова: синтез, оптимізація, математична модель, електромобіль, тяговий електричний двигун, акумуляторна батарея, витрати енергії.

Вступ

Стаття з циклу публікацій щодо питання оптимізації та ідентифікації математичних моделей руху електромобіля з тяговим електродвигуном постійного струму послідовного збудження по горизонтальному прямолінійному відрізку дороги присвячена синтезу закону керування рухом електромобіля горизонтальним відрізком автомагістралі, оптимальним за критерієм мінімуму витрат енергії акумуляторної батареї.

Вихідні передумови та постановка завдання

У роботі [1] доведено, що завантажений електромобіль із тяговим електродвигуном постійного струму з послідовним збудженням, підключеним до акумуляторної батареї згідно зі схемою, наведеною на рис. 1,

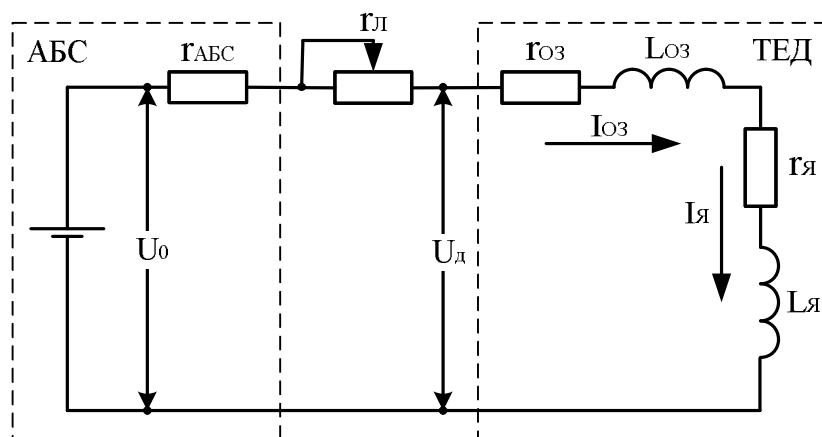


Рис. 1. Електрична схема основного силового контуру електропривода електромобіля з регульованим опором лінії між акумуляторною батареєю та вхідними клемми тягового електродвигуна

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 $i = \frac{I_{я}}{I_n}$ – відносний струм силового контуру, $\tau = \frac{t}{T_M}$ – відносний час, $v = \frac{V}{V_n}$ – відносна лінійна швидкість електромобіля, $\alpha = \frac{I_n}{I_k}$ – коефіцієнт нахилу статичної характеристики $u = f(i)$ силового контуру, яка має вигляд

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

де $u = \frac{U}{U_n}$ – відносна напруга, а a_1, b_1 – коефіцієнти кривої намагнічування тягового електродвигуна, математична модель якої має вигляд

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

де $\phi(i) = \frac{\Phi(I_{оз})}{\Phi(I_n)}$ – відносний магнітний потік, що є функцією відносного струму i , C_1, C_2 –

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

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

а коефіцієнт $f_0 = \frac{\mu_0 R}{w k_M I_n \Phi(I_n)}$.

Варто також нагадати, що необхідну для визначення відносного часу електромеханічну сталу часу тягового електропривода електромобіля T_M визначають із виразу

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

де m – маса електромобіля, w – передаточне число редуктора від колеса до тягового електродвигуна, R – радіус колеса, k_M – обмотувальний коефіцієнт зв'язку між моментом обертання якоря тягового електродвигуна та струмом у обмотці якоря й магнітним потоком його обмотки збудження (цей коефіцієнт визначають із використанням паспортних даних тягового електродвигуна).

А про те, чим є параметри, що входять до формул, за якими визначають усі вищевказані відносні величини, можна прочитати у вже цитованій вище роботі [1].

У роботі [2] доведено, що незавантажений електромобіль із тяговим електродвигуном постійного струму з послідовним збудженням, підключеним до акумуляторної батареї згідно зі схемою, наведеною 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

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

де

$$\lambda_1(\tau) = C_2^* e^{(f_1 + 2f_2v)\tau} - \frac{C_1^*}{f_1 + 2f_2v}, \quad (7)$$

а математична модель динаміки системи електропривода має вигляд

$$\frac{dv}{d\tau} = -a_2i^3 + b_2i^2 - f_0 - f_1v - f_2v^2. \quad (8)$$

У математичних моделях оптимального струму (1) і (6), який забезпечує рух електромобіля горизонтальним відрізком автомагістралі з мінімальними витратами енергії акумулятора, невідомими параметрами є пари констант C_1, C_2 чи C_1^*, C_2^* , до визначення яких і зведено завдання ідентифікації цих моделей, яке розв'язано в роботі [3].

У цій роботі поставлено завдання віднайти спосіб реалізації синтезованих та ідентифікованих моделей оптимального руху, що задають зміну відносного струму у відносному часі, тобто віднайти закон керування оптимальним рухом електромобіля горизонтальним відрізком автомагістралі, відштовхувшись від синтезованих моделей. До розв'язання цієї задачі ми й перейдемо.

Розроблення способів розв'язання поставленого завдання

Почнемо з того, що, як і в роботі [4], складемо рівняння з використанням електротехнічних параметрів тягового електропривода електромобіля, за допомогою яких забезпечують управління його рухом.

Оскільки схема силового контуру системи електропривода не залежить від того, яку гілку кривої намагнічування (3) використовують під час синтезу моделей оптимального струму, то рівняння другого закону Кірхгофа для цього контуру не залежатиме від моделей оптимального струму й буде одним і тим же, а саме

$$U_0 = I_{\text{я}} r_{\text{АБС}} + I_{\text{я}} (r_{\text{я}} + r_{\text{оз}}) + I_{\text{я}} r_{\text{л}} + E_{\omega} + (L_{\text{я}} + L_{\text{оз}}) \frac{dI_{\text{я}}}{dt}, \quad (9)$$

або

$$U_0 - I_{\text{я}} r_{\text{АБС}} - I_{\text{я}} r_{\text{л}} = U_{\text{д}} = I_{\text{я}} (r_{\text{я}} + r_{\text{оз}}) + E_{\omega} + (L_{\text{я}} + L_{\text{оз}}) \frac{dI_{\text{я}}}{dt}. \quad (10)$$

У цих рівняннях U_0 – електрорушійна сила силової акумуляторної батареї (АБС), $r_{\text{АБС}}$ – внутрішній активний опір цієї батареї, $r_{\text{л}}$ – активний опір лінії, що з'єднує силову акумуляторну батарею з вхідними клемми тягового електродвигуна, $U_{\text{д}}$ – напруга на цих клеммах, $r_{\text{я}}, L_{\text{я}}$ – активний опір і індуктивність обмотки якоря тягового електродвигуна, $r_{\text{оз}}, L_{\text{оз}}$ – активний опір і індуктивність обмотки збудження тягового електродвигуна, а

$$E_{\omega} = k_{\omega} \omega \Phi(I_{\text{оз}}) = k_{\omega} \omega \Phi(I_{\text{я}}), \quad (11)$$

електрорушійна сила обертання, яка наводиться в обмотці якоря і залежить від кутової швидкості обертання ω якоря, обмотувального коефіцієнта k_{ω} зв'язку між електрорушійною силою обертання, кутовою швидкістю й магнітним потоком Φ обмотки

збудження, який, у свою чергу, залежить від струму I_{O3} в обмотці збудження, якій дорівнює для електродвигуна послідовного збудження струмові $I_{Я}$ якоря.

Із рівнянь (9) і (10) бачимо, що задавати потрібне нам значення оптимального струму тягового електродвигуна (ТЕД) можна, або змінюючи опір $r_{л}$ лінії між акумуляторною батареєю АБС та його вхідними клемми, як показано на рис. 1, або змінюючи напругу U_{∂} , що подається на ці клемми, наприклад, за допомогою керованого електронного підсилювача (ЕП), як це показано на рис. 2.

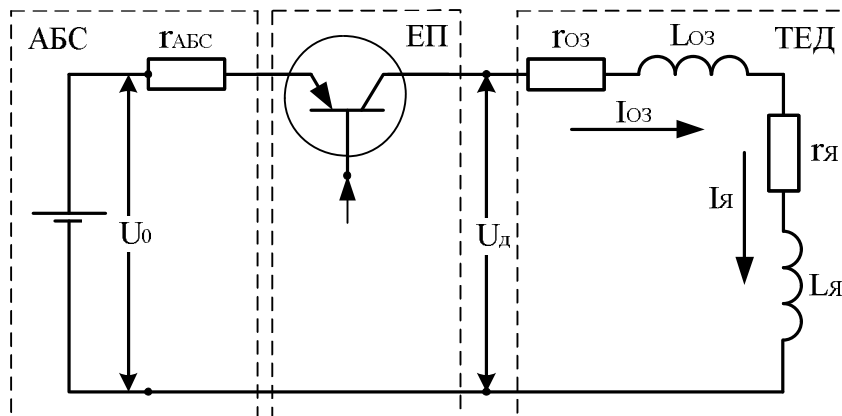


Рис. 2. Електрична схема основного силового контуру електропривода електромобіля з керованим електронним підсилювачем (ЕП) між силовою акумуляторною батареєю (АБС) та вхідними клемми тягового електродвигуна (ТЕД)

Цілком очевидно, що з позицій надійності роботи системи електропривода вибирати потрібно варіант з керованим електронним підсилювачем. Його в подальшому ми й розглядатимемо.

Поділивши рівняння (10) на U_0 та виконавши низку допоміжних перетворень, отримаємо його аналог у відносних одиницях

$$u = \theta i + \beta \frac{di}{dt} + \gamma v \phi(i), \quad (12)$$

де

$$\beta = \frac{(L_{Я} + L_{O3})I_H}{U_0 T_M}, \gamma = \frac{k_{\omega} V_H \Phi(I_H)}{U_0 R}, \theta = \frac{(r_{Я} + r_{O3})}{U_0},$$

$$u = \frac{U_{\partial}}{U_0}, T_M = \frac{m V_H R}{\omega k_M I_H \Phi(I_H)}. \quad (13)$$

Виходячи з отриманих моделей, можна стверджувати, що можливими є два випадки оптимального керування електромобілем, а саме:

1) електромобіль завантажений і керується з використанням керованого електронного підсилювача;

2) електромобіль не завантажений і керується з використанням керованого електронного підсилювача.

У першому випадку – під час синтезу закону оптимального керування завантаженим

електромобілем – необхідно у вираз (12) підставити вираз (1) і нижню гілку виразу (3), у результаті чого матимемо

$$\begin{aligned}
 u^*(\tau) &= \theta i + \beta \frac{di}{dt} + \gamma v \phi(i) = \theta i + \beta \frac{di}{dt} + \gamma v (a_1 + b_1 i) = \\
 &= \beta \frac{d}{d\tau} \left(\frac{f_1 + 2f_2 v - (f_1 + 2f_2 v) a_1 C_2 e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} + a_1 C_1}{2\alpha (f_1 + 2f_2 v) + 2b_1 C_2 (f_1 + 2f_2 v) e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} - 2b_1 C_1} \right) + \\
 &+ (\theta + \gamma v b_1) \left(\frac{f_1 + 2f_2 v - (f_1 + 2f_2 v) a_1 C_2 e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} + a_1 C_1}{2\alpha (f_1 + 2f_2 v) + 2b_1 C_2 (f_1 + 2f_2 v) e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} - 2b_1 C_1} \right) + \gamma v a_1, \quad (14)
 \end{aligned}$$

або

$$F_1(u^*, v, \tau) = 0, \quad (15)$$

а у другому випадку – під час синтезу закону оптимального керування незавантаженим електромобілем – необхідно у вираз (12) підставити вираз (6) і верхню гілку виразу (3), у результаті чого матимемо

$$\begin{aligned}
 u^*(\tau) &= \theta i + \beta \frac{di}{dt} + \gamma v \phi(i) = \theta i + \beta \frac{di}{dt} + \gamma v (-a_2 i^2 + b_2 i) = \\
 &= \beta \frac{d}{d\tau} \left(\frac{2\alpha (f_1 + 2f_2 v) + 2(f_1 + 2f_2 v) b_2 C_2^* e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} - 2b_2 C_1^*}{6\alpha_2 (C_2^* (f_1 + 2f_2 v) e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} - C_1^*)} - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\sqrt{(2\alpha (f_1 + 2f_2 v) + 2b_2 C_2^* (f_1 + 2f_2 v) e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} - 2b_2 C_1^*)^2 -}}{6\alpha_2 (C_2^* (f_1 + 2f_2 v) e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} - C_1^*)} \times \right. \\
 &\quad \left. \times \frac{\sqrt{-12a_2 (f_1 + 2f_2 v)^2 C_2^* e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} + 12\alpha_2 C_1^* (f_1 + 2f_2 v)}}{6\alpha_2 (C_2^* (f_1 + 2f_2 v) e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} - C_1^*)} \right) + \\
 &+ (\theta + \gamma v a_2) \left(\frac{2\alpha (f_1 + 2f_2 v) + 2(f_1 + 2f_2 v) b_2 C_2^* e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} - 2b_2 C_1^*}{6\alpha_2 (C_2^* (f_1 + 2f_2 v) e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} - C_1^*)} - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\sqrt{(2\alpha (f_1 + 2f_2 v) + 2b_2 C_2^* (f_1 + 2f_2 v) e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} - 2b_2 C_1^*)^2 -}}{6\alpha_2 (C_2^* (f_1 + 2f_2 v) e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} - C_1^*)} \times \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \times \frac{\sqrt{-12a_2(f_1 + 2f_2v)^2 C_2^* e^{(f_1+2f_2v)\tau} + 12\alpha_2 C_1^*(f_1 + 2f_2v)}}{6\alpha_2(C_2^*(f_1 + 2f_2v)e^{(f_1+2f_2v)\tau} - C_1^*)} \Bigg) - \\
 & - \gamma v a_2 \left(\frac{2\alpha(f_1 + 2f_2v) + 2(f_1 + 2f_2v)b_2 C_2^* e^{(f_1+2f_2v)\tau} - 2b_2 C_1^*}{6\alpha_2(C_2^*(f_1 + 2f_2v)e^{(f_1+2f_2v)\tau} - C_1^*)} - \right. \\
 & \left. - \frac{\sqrt{(2\alpha(f_1 + 2f_2v) + 2b_2 C_2^*(f_1 + 2f_2v)e^{(f_1+2f_2v)\tau} - 2b_2 C_1^*)^2 -}}{6\alpha_2(C_2^*(f_1 + 2f_2v)e^{(f_1+2f_2v)\tau} - C_1^*)} \times \right. \\
 & \left. \times \frac{\sqrt{-12a_2(f_1 + 2f_2v)^2 C_2^* e^{(f_1+2f_2v)\tau} + 12\alpha_2 C_1^*(f_1 + 2f_2v)}}{6\alpha_2(C_2^*(f_1 + 2f_2v)e^{(f_1+2f_2v)\tau} - C_1^*)} \right)^2, \tag{16}
 \end{aligned}$$

або

$$F_2(u^*, v, \tau) = 0. \tag{17}$$

Рівняння (15), (17) можна переписати

$$\begin{cases} v = F_1^*(u^*, \tau); \\ v = F_2^*(u^*, \tau). \end{cases} \tag{18}$$

Обчислювальний алгоритм для залежностей (18), побудований з використанням виразів (14), (16) і придатний для реалізації в бортовому комп'ютері електромобіля, буде представлено в окремій статті, а в подальших викладках цієї статті виходитимемо з того, що ці залежності ми вже маємо.

Із виразів (14), (16) бачимо, що вони є нелінійними диференційними рівняннями першого порядку відносно координати v , а тому, переходячи до дискретного часу k , залежності (18) можна представити

$$\begin{cases} v_{k+1} = F_1^{**}(u_k^*, v_k, k); \\ v_{k+1} = F_2^{**}(u_k^*, v_k, k). \end{cases} \tag{19}$$

Нехай v_{k+1} – це реальне значення відносної швидкості руху електромобіля в дискретний момент часу $k + 1$, яке ми бачимо на електронному спідометрі електромобіля, установленому на панелі приладів, а

$$\Delta v_{k+1} = |v_{k+1}^p - v_{k+1}| \tag{20}$$

– це похибка, яка матиме місце в разі подачі в дискретний момент часу k на вхідні клеми тягового електродвигуна електромобіля відносної напруги u_k^* . Тоді, установлюючи значення u_k^* таким, щоб виконувались рівності (14), (16) і мінімізувалась похибка (20), змушуватимемо електромобіль рухатись із такою швидкістю, яка згідно з виразами (14), (16) та (1), (6) мінімізуватиме витрати енергії акумулятора.

У реальних умовах керування електромобіля водієм це означає: якщо водій, їдучи з відносною швидкістю v_k в дискретний момент часу k за допомогою акселератора, з'єднаного з керуючим органом електронного підсилювача, задасть таке значення u_k^* , яке забезпечить у дискретний момент часу $k+1$ згідно з виразом (19) значення відносної швидкості V_{k+1} , виведене на дисплей бортового комп'ютера, контроль за встановленням якого згідно з критерієм (20) здійснюють за значенням v_{k+1}^p , що висвітлюється на електронному спідометрі електромобіля, то тяговий електродвигун електромобіля споживатиме струм, який забезпечуватиме виконання заданої програми руху з мінімальними витратами енергії акумулятора.

Висновки

1. Побудовано математичну модель для визначення швидкості руху електромобіля горизонтальним відрізком автостради від одного пункту до іншого, адекватної струму тягового електродвигуна електромобіля, оптимальному за критерієм мінімуму витрат енергії акумулятора.

2. Визначено структуру закону та алгоритм оптимального руху електромобіля горизонтальним відрізком автостради шляхом переходу від моделей оптимального струму тягового електродвигуна до параметрів швидкості руху, що відповідає цьому струму.

3. Зазначено шляхи реалізації водієм електромобіля побудованого закону оптимального руху.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мокін О. Б. Оптимізація руху завантаженого електромобіля з тяговим електродвигуном постійного струму послідовного збудження по горизонтальному прямолінійному відрізьку дороги / О. Б. Мокін, О. Д. Фолюшняк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – №1. – С. 56 – 60.

2. Мокін О. Б. Оптимізація руху незавантаженого електромобіля з тяговим електродвигуном постійного струму послідовного збудження по горизонтальному прямолінійному відрізьку дороги / О. Б. Мокін, О. Д. Фолюшняк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – №2. – С. 48 – 51.

3. Мокін О. Б. Ідентифікація математичних моделей оптимального руху електромобіля горизонтальним відрізьком автомагістралі / О. Б. Мокін, О. Д. Фолюшняк, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – №1. – С. 89 – 92.

4. Мокін О. Б. Метод параметричної ідентифікації моделі оптимального струму електромобіля / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, О. Д. Фолюшняк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – №3. – С. 89 – 92.

Мокін Олександр Борисович – д. т. н., доцент, завідувач кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів (ВЕТЕСК), e-mail: abmokin@gmail.com.

Мокін Борис Іванович – акад. НАПНУ, д. т. н., проф., професор кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів (ВЕТЕСК).

Фолюшняк Олена Дмитрівна – аспірант кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів (ВЕТЕСК).

Лобатюк Віталій Анатолійович – аспірант кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів (ВЕТЕСК).

Вінницький національний технічний університет.