

УДК 681.5.015+62-83:629.33

О. Б. Мокін, канд. техн. наук, доц.;

Б. І. Мокін, д-р техн. наук, проф.;

О. Д. Фолюшняк, студ.

ОПТИМІЗАЦІЯ РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ПРЯМОЛІНІЙНОМУ ВІДРІЗКУ ДОРОГИ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМУМУ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ

Здійснено оптимізацію руху електромобіля по горизонтальному прямолінійному відрізку дороги за критерієм мінімуму витрат енергії акумуляторної батареї. Побудовано математичну модель для струму в колі: акумуляторна батарея — обмотка якоря тягового електричного двигуна постійного струму з незалежним збудженням, реалізація якої дозволяє мінімізувати витрати енергії акумуляторної батареї під час руху за будь-яким законом зміни швидкості руху електромобіля.

Постановка задачі і вихідні передумови

В роботі [1] розв'язана задача оптимізації руху електричного транспортного засобу по горизонтальному прямолінійному відрізку колії. Під час розв'язання задачі була використана система відносних одиниць, яка запропонована в роботі [2]. Математичні моделі струму якоря електричного двигуна постійного струму з послідовним збудженням тягового електропривода та лінійної швидкості руху транспортного засобу, що отримані в результаті розв'язання цієї задачі, в разі їх реалізації дозволяють оптимізувати рух колійного електричного транспорту (електропотягів, трамваїв) від зупинки до зупинки за критерієм мінімуму витрат електричної енергії, яка споживається із контактної мережі, підключеної до тягових підстанцій системи електропостачання.

Якщо поставити задачу оптимізації руху по горизонтальному прямолінійному відрізку дороги не колійного електричного транспортного засобу, а електромобіля, то виявляється, що для розв'язання цієї задачі отримані в роботі [1] математичні моделі оптимізації руху колійного транспорту використаними бути не можуть без суттєвої трансформації одразу з кількох причин.

І причиною першою є те, що в разі збереження в електромобілі коробки передач і муфти зчеплення не може бути використаним як тяговий електродвигун постійного струму з послідовним збудженням, оскільки при виведенні коробки передач на нейтраль навантаження навалу тягового електродвигуна зменшується майже до нуля, що через його гіперболічну механічну характеристику призводить до такого збільшення кутової швидкості обертання його ротора, яку не витримають бандажі якірної обмотки. Тож в якості електроприводного в електромобілі доцільно ставити електричний двигун постійного струму з незалежним збудженням від окремого елемента акумуляторної батареї. А це уже зовсім інша форма механічної характеристики і зовсім інша модель моменту обертання в рівнянні динаміки електропривода.

Причина друга полягає у різних характеристиках напруги контактної мережі та напруги акумуляторної батареї, оскільки потужність контактної мережі є такою, що напруга в ній практично не падає зі зростанням струму в електродвигунах тягового електропривода колійного транспортного засобу від нуля до максимального значення, у той час як напруга акумуляторної батареї внаслідок обмеженого ресурсу її потужності зі зростанням струму тягового електродвигуна лінійно зменшується.

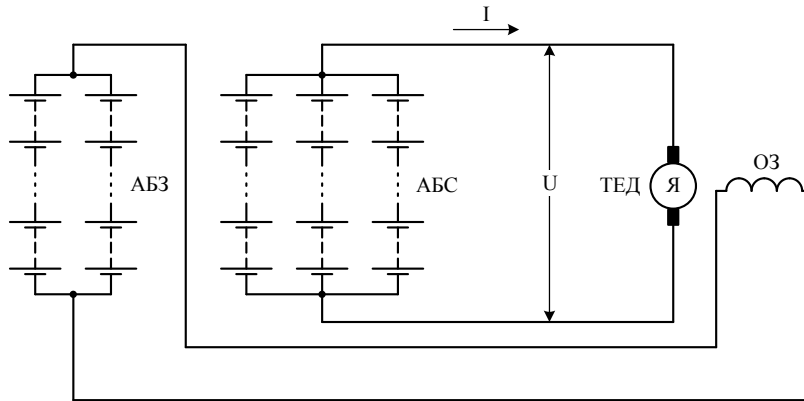
А третя причина полягає у тому, що колійний транспортний засіб має змогу рухатись від зупинки до зупинки без необхідності пригальмовувати або обганяти якийсь інший транспортний засіб, що дозволяє реалізувати його рух на цьому відрізку колії з оптимальною швидкістю, у той час як електромобілю доводиться їхати в транспортному потоці, де виникає потреба постійно змінювати швидкість і пригальмовувати або обганяти.

В наступних розділах статті буде розроблено математичну модель оптимального руху електромобіля по горизонтальному прямолінійному відрізку дороги, яка враховуватиме усі вище охарак-

теризовані відмінності.

Перехід до відносних одиниць та постановка задачі

Виходячи із вихідних передумов, викладених в попередньому розділі статті, побудуємо силову електричну схему електромобіля у вигляді, наведеному на рисунку, на якому показано, що в силовій акумуляторній батареї (АБС) частина елементів включена послідовно для забезпечення необхідного рівня напруги U , а частина — паралельно для забезпечення необхідного рівня струму I , який надходить в якірну обмотку (Я) тягового електродвигуна постійного струму (ТЕД), незалежна обмотка збудження (ОЗ) якого підключена до окремої акумуляторної батареї (АБЗ). На цій схемі для спрощення розуміння основних процесів не показані контакти комутаційної апаратури.



Електрична схема основного силового контуру тягового електропривода електромобіля

За критерій оптимізації руху електромобіля використаємо функціонал

$$E = \int_0^T UI dt, \quad (1)$$

де E — це енергія, яку витрачає АБС за період T часу t , необхідний для покриття електромобілем відстані;

$$S = \int_0^T V dt, \quad (2)$$

де V — це лінійна швидкість руху електромобіля, яка зв'язана рівнянням динаміки електромобіля;

$$m \frac{dV}{dt} = F_T - F_{\text{оп}}; \quad (3)$$

$$\begin{cases} V(0) = V_0; \\ V(T) = V_T \end{cases} \quad (4)$$

з його масою m , силою тяги F_{mT} та силою $F_{\text{оп}}$ опору руху.

Використовуючи відомі співвідношення [3—5]:

$$F_m = \frac{\omega}{R} M_m; \quad (5)$$

$$M_m = k_f I; \quad (6)$$

$$F_{\text{оп}} = \mu_0 + \mu_1 V + \mu_2 V^2, \quad (7)$$

де M_m — тяговий момент ТЕД з незалежним збудженням; R — радіус колеса, а ω — передатне число коробки передач електромобіля від вала ТЕД до вала колеса, рівняння (3) можна переписати у вигляді

$$m \frac{dV}{dt} = \frac{\omega k_I}{R} I - \mu_0 - \mu_1 V - \mu_2 V^2 \quad (8)$$

або, застосовуючи відносні одиниці, у вигляді

$$\frac{dv}{d\tau} = i - f_0 - f_1 v - f_2 v^2; \quad (9)$$

$$v(0) = v_0; \quad (10)$$

$$v(\tau_k) = v_k,$$

де

$$v = \frac{V}{V_H}; \quad i = \frac{I}{I_H}; \quad \tau = \frac{t}{T_M}; \quad \tau_k = \frac{T}{T_M}; \quad (11)$$

$$T_M = \frac{m V_H R}{\omega k_I I_H}; \quad f_0 = \frac{\mu_0 R}{\omega k_I I_H}; \quad f_1 = \frac{\mu_1 R V_H}{\omega k_I I_H}; \quad f_2 = \frac{\mu_2 R V_H^2}{\omega k_I I_H};$$

I_H — номінальний струм якоря ТЕД; V_H — лінійна швидкість колеса, обумовлена для заданого значення передатного числа ω номінальним значенням ω_H кутової швидкості обертання вала якоря ТЕД, а T_M — механічна стала електропривода електромобіля.

Приводячи вирази (1), (2) до відносних одиниць, матимемо:

$$e = \int_0^{\tau_k} (1 - \alpha i) i d\tau; \quad (12)$$

$$s = \int_0^{\tau_k} v d\tau, \quad (13)$$

де

$$e = \frac{E}{U_0 I_H T_M}; \quad s = \frac{S}{V_H T_M}; \quad \alpha = \frac{I_H}{I_K}, \quad (14)$$

а U_0 — напруга на виході повністю зарядженої АБС у разі її відключення від навантаження; I_K — це струм короткого замикання повністю зарядженої АБС.

Для розуміння того, як із формули (1) при переході до відносних одиниць отримана формула (12), зазначимо, що нами прийнятий лінійний закон зміни напруги на виводах АБС у функції струму, тобто ми вважаємо, що

$$U = U_0 - I r_{ABC} = U_0 - I \frac{U_0}{I_K} = U_0 \left(1 - \frac{1}{I_K} I \right), \quad (15)$$

де r_{ABC} — це внутрішній опір АБС.

Сформулюємо задачу так: знайти такий закон зміни струму i в силовому електричному контурі електромобіля, який забезпечував би виконання програми (13) його руху від однієї зупинки до наступної з мінімальними витратами енергії e згідно з критерієм (12) в умовах довільного закону зміни лінійної швидкості v та обмеження, що задається рівнянням (9) динаміки руху електромобіля.

Розв'язання задачі

Із формулювання задачі випливає, що вона відноситься до класу ізопериметричних задач оптимізації. Тож з урахуванням функціоналів (12), (13) та рівняння динаміки (9) функція Лагранжа для неї матиме вигляд

$$L(i, s, v, i', s', v', \tau) = i - \alpha i^2 + \lambda_0 (s' - v) + \lambda_1 (v' - i + f_0 + f_1 v + f_2 v^2), \quad (16)$$

а система рівнянь Ейлера —

$$\begin{cases} L_i - \frac{d}{d\tau} L_{i'} = 0; \\ L_s - \frac{d}{d\tau} L_{s'} = 0; \\ L_v - \frac{d}{d\tau} L_{v'} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Підставляючи функцію Лагранжа (16) в систему рівнянь Ейлера (17), тобто, беручи усі необхідні частинні і звичайні похідні від $L(i, s, v, i', s', v', \tau)$ по $i, s, v, i', s', v', \tau$, отримуємо систему рівнянь

$$\begin{cases} 1 - 2\alpha i - \lambda_1 = 0; \\ -\frac{d\lambda_0}{d\tau} = 0; \\ -\lambda_0 + \lambda_1 (f_1 + 2f_2 v) - \frac{d\lambda_1}{d\tau} = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Із першого рівняння системи (18) знайдемо, що

$$i = \frac{1 - \lambda_1}{2\alpha} \quad (19)$$

або

$$\lambda_1 = 1 - 2\alpha i, \quad (20)$$

а із другого рівняння системи (18) випливає, що

$$\lambda_0 = -C_0, \quad (21)$$

де λ_0 є невідомою константою.

Підставляючи вирази (20) і (21) в третє рівняння системи (18), отримаємо диференціальне рівняння:

$$C_0 + f_1 + 2f_2 v - 2\alpha (f_1 + 2f_2 v) i + 2\alpha \frac{di}{d\tau} = 0. \quad (22)$$

Розділяючи змінні в рівнянні (22), матимемо:

$$-d\tau = \frac{di}{\frac{C_0 + f_1 + 2f_2 v}{2\alpha} - (f_1 + 2f_2 v) i}. \quad (23)$$

Інтегруючи рівняння (23), знайдемо, що

$$-\tau + C_1 = -\frac{1}{f_1 + 2f_2 v} \ln \left(\frac{C_0 + f_1 + 2f_2 v}{2\alpha} - (f_1 + 2f_2 v) i \right), \quad (24)$$

де C_1 — невідома стала інтегрування рівняння (23).

Розв'язуючи рівняння (24) відносно i , матимемо:

$$i = \frac{C_0 + f_1 + 2f_2 v}{2\alpha (f_1 + 2f_2 v)} - \frac{1}{f_1 + 2f_2 v} e^{(f_1 + 2f_2 v)(\tau - C_1)}. \quad (25)$$

Це i є закон формування струму i якоря ТЕД електромобіля, реалізуючи який будемо мати мінімальні витрати енергії e АБС при тому значенні лінійної швидкості v , з якою рухається електромобіль в цей момент. Але для реалізації цього закону необхідно спочатку визначити в моделі (25) числове значення поки що невідомих констант C_0, C_1 . Однак це питання, як і питання фізичної реалізації даного закону, будуть розглянуті у окремій статті.

Висновки

Побудовано закон зміни струму якоря електродвигуна постійного струму з незалежним збудженням, що використовується в електромобілі як тяговий. Реалізація цього закону забезпечує найменші витрати електроенергії під час руху електромобіля зі зміною швидкості за довільним законом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мокін О. Б. Оптимізація режиму руху завантаженого електричного транспортного засобу на прямолінійному відрізьку колії, прокладеній на горизонтальній площині / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. — Кременчук : КДПУ, 2010. — № 3/2010 (62), частина 2. — С. 162—165.
2. Мокін О. Б. Відносні моделі руху електричного транспортного засобу по горизонтальному прямолінійному відрізьку колії / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2010. — № 2. — С. 20—24.
3. Павловський М. А. Теоретична механіка / М. А. Павловський. — Київ : Техніка, 2002. — 512 с.
4. Андреев В. П. Основы электропривода / В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин. — М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963. — 772 с.
5. Мокін Б. І. Математична модель двовісного автомобіля в задачі керування його рухом у відсутності об'їздів і обгонів [Електронний ресурс] / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Англ., рос. та укр. мовами. — 2009. — № 4. — С. 1—7. — Режим доступу до журн. : http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009-4/2009-4.files/uk/09admdao_ua.pdf.

Рекомендована кафедрою відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів

Надійшла до редакції 25.03.11
Рекомендована до друку 28.04.11

Мокін Олександр Борисович — завідувач кафедри, **Мокін Борис Іванович** — професор.

Кафедра відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів;

Фолошніак Олена Дмитрівна — студентка Інституту електроенергетики та електромеханіки.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця