ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 62–838

О. Б. Мокін[1]
Б. І. Мокін[1]
В. А. Лобатюк[1]

ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ МЕТОД ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ВІД ЗУПИНКИ ДО ЗУПИНКИ ЗА ЗАДАНИЙ ЧАС ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ З НЕПРАЦЮЮЧОЮ СИСТЕМОЮ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

[1]Вінницький національний технічний університет

Запропоновано обчислювальний метод для ідентифікації моделей оптимального руху за критерієм мінімуму витрат пального від зупинки до зупинки за заданий час транспортного засобу з комбінованим приводом від двигуна внутрішнього згорання та від електричного двигуна постійного струму при вимкненій системі електропривода.

Ключові слова: модель оптимального руху, гібридний автомобіль, двигун постійного струму, двигун внутрішнього згоряння.

Вихідні передумови та постановка задачі

В роботі [1] нами синтезовані математичні моделі оптимального руху транспортних засобів з комбінованим приводом від двигуна внутрішнього згорання та від електричного двигуна постійного струму в задачі оптимізації руху цих транспортних засобів дорогою, яка крім горизонтальних ділянок містить спуски та підйоми, за умови, що систему електропривода відключено — тобто, за умови, що рух гібридного автомобіля здійснюється виключно лише за допомогою двигуна внутрішнього згорання. Ці математичні моделі мають вигляд:

— для швидкості оптимального руху як горизонтальними ділянками дороги так і на спуск та підйом

$$\nu = \left\{ \frac{q^3}{8C_2^3} - \frac{3q^2}{2C_2}(\tau + C_1) + \left[\left(-\frac{q^3}{8C_2^3} + \frac{3q^2}{2C_2}(\tau + C_1) \right)^2 + \left(-\frac{q^2}{4C_2^2} \right)^3 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} + \left\{ \frac{q^3}{8C_2^3} - \frac{3q^2}{2C_2}(\tau + C_1) - \left[\left(-\frac{q^3}{8C_2^3} + \frac{3q^2}{2C_2}(\tau + C_1) \right)^2 + \left(-\frac{q^2}{4C_2^2} \right)^3 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} + \frac{q}{2C_2}; \quad (1)$$

для оптимальних витрат пального:

— під час руху горизонтальною ділянкою дороги

$$q = \nu \frac{d\nu}{d\tau} + f_0 \nu + f_1 \nu^2 + f_2 \nu^3; \quad (2)$$

— під час руху на спуск

$$q = \nu \frac{d\nu}{d\tau} - f_0^* \nu \sin\beta + f_0 \nu \cos\beta + f_1 \nu^2 + f_2 \nu^3; \tag{3}$$

— під час руху на підйом

$$q = \nu \frac{d\nu}{d\tau} + f_0^* \nu \sin\beta + f_0 \nu \cos\beta + f_1 \nu^2 + f_2 \nu^3 . \tag{4}$$

Нагадаємо, що інформація про значення усіх символів, використаних в математичних моделях (1)—(4), наведена в роботі [2].

Очевидно, що для практичного застосування синтезованих математичних моделей (1)—(4) їх необхідно ідентифікувати, запропонувавши відповідний метод ідентифікації та побудувавши його обчислювальний алгоритм і створивши у такий спосіб процедуру визначення чисельних значень усіх параметрів, що входять в ці моделі, з використанням інформації про значення швидкості $\nu_л, \nu_п$ і витрат $q_л$, $q_п$ на лівій (л) та правій (п) границях відрізка дороги довжиною l_q, рух гібридного автомобіля по якому за час τ_q оптимізується за критерієм мінімуму витрат пального. У цій статті ми розглянемо лише той випадок, коли автомобіль рухається від зупинки до зупинки, долаючи заданий відрізок дороги за заданий відрізок часу.

Розв'язання поставленої задачі

Найпростіше поставлена вище задача розв'язується для випадку, коли на лівій границі відрізка дороги довжиною l_q гібридний автомобіль рушає з місця, збільшуючи витрати палива, починаючи з витрат холостого ходу q_0, на правій границі цього відрізка дороги автомобіль зупиняється з включеним двигуном внутрішнього згорання, працюючи після зупинки з тими ж таки витратами холостого ходу q_0, а на подолання цього відрізку дороги автомобілем витрачається заздалегідь заданий відрізок часу τ_q. У цьому випадку граничні умови запишуться так:

— на лівій границі

$$\begin{aligned} \nu\big|_{\tau=0} &= 0; \\ q\big|_{\tau=0} &= q_0; \end{aligned} \tag{5}$$

— на правій границі

$$\begin{aligned} \nu\big|_{\tau=\tau_q} &= 0; \\ q\big|_{\tau=\tau_q} &= q_0. \end{aligned} \tag{6}$$

Підставляючи у вираз (1) граничні умови (5), отримаємо рівняння:

$$\begin{aligned} &\left\{ \frac{q_0{}^3}{8C_2^3} - \frac{3q_0{}^2}{2C_2} C_1 + \left[\left(-\frac{q_0{}^3}{8C_2^3} + \frac{3q_0{}^2}{2C_2} C_1 \right)^2 + \left(-\frac{q_0{}^2}{4C_2^2} \right)^3 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} + \\ &+ \left\{ \frac{q_0{}^3}{8C_2^3} - \frac{3q_0{}^2}{2C_2} C_1 - \left[\left(-\frac{q_0{}^3}{8C_2^3} + \frac{3q_0{}^2}{2C_2} C_1 \right)^2 + \left(-\frac{q_0{}^2}{4C_2^2} \right)^3 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} + \frac{q_0}{2C_2} = 0, \end{aligned} \tag{7}$$

в якому невідомими є лише C_1, C_2, а підставляючи у цей же вираз (1) граничні умови (6), отримаємо рівняння:

$$\left\{\frac{q_0{}^3}{8C_2^3}-\frac{3q_0{}^2}{2C_2}(\tau_q+C_1)+\left[\left(-\frac{q_0{}^3}{8C_2^3}+\frac{3q_0{}^2}{2C_2}(\tau_q+C_1)\right)^2+\left(-\frac{q_0{}^2}{4C_2^2}\right)^3\right]^{\frac{1}{2}}\right\}^{\frac{1}{3}}+$$
$$+\left\{\frac{q_0{}^3}{8C_2^3}-\frac{3q_0{}^2}{2C_2}(\tau_q+C_1)-\left[\left(-\frac{q_0{}^3}{8C_2^3}+\frac{3q_0{}^2}{2C_2}(\tau_q+C_1)\right)^2+\left(-\frac{q_0{}^2}{4C_2^2}\right)^3\right]^{\frac{1}{2}}\right\}^{\frac{1}{3}}+\frac{q_0}{2C_2}=0, \quad (8)$$

в якому теж невідомими є лише C_1, C_2. Тож розв'язуючи рівняння (7), (8) сумісно, як систему двох рівнянь з двома невідомими, отримаємо чисельні значення C_1^*, C_2^* констант C_1, C_2, підставляючи які потім у вираз (1) замість цих, символьно виражених констант, матимемо математичну модель оптимальної за витратами палива швидкості автомобіля, який за заданий відрізок часу τ_q долає заданий відрізок дороги l_q, у вигляді:

$$\nu=\left\{\frac{q^3}{8\left(C_2^*\right)^3}-\frac{3q^2}{2C_2^*}\left(\tau+C_1^*\right)+\left[\left(-\frac{q^3}{8\left(C_2^*\right)^3}+\frac{3q^2}{2C_2^*}\left(\tau+C_1^*\right)\right)^2+\left(-\frac{q^2}{4\left(C_2^*\right)^2}\right)^3\right]^{\frac{1}{2}}\right\}^{\frac{1}{3}}+$$
$$+\left\{\frac{q^3}{8\left(C_2^*\right)^3}-\frac{3q^2}{2C_2^*}\left(\tau+C_1^*\right)-\left[\left(-\frac{q^3}{8\left(C_2^*\right)^3}+\frac{3q^2}{2C_2^*}\left(\tau+C_1^*\right)\right)^2+\left(-\frac{q^2}{4\left(C_2^*\right)^2}\right)^3\right]^{\frac{1}{2}}\right\}^{\frac{1}{3}}+\frac{q}{2C_2^*}. \quad (9)$$

Вираз (9) являє собою параметричне по τ рівняння з двома невідомими ν, q, а тому розв'язувати його необхідно сумісно з рівнянням (2) під час руху автомобіля горизонтальним відрізком дороги, сумісно з рівнянням (3) під час руху автомобіля на спуск, або сумісно з рівнянням (4) під час руху автомобіля на підйом, не забуваючи припасовувати ці рішення в точках зміни характеру дороги.

Як бачимо, нам потрібно побудувати дві обчислювальні процедури — одну для розв'язання системи рівнянь (7), (8) відносно невідомих констант C_1, C_2, а другу для розв'язання системи рівнянь (9), (2) чи (9), (3) або (9), (4) відносно невідомих змінних ν, q, які визначають оптимальний за витратами палива рух гібридного автомобіля в заданих умовах.

Почнемо з побудови першої обчислювальної процедури, за допомогою якої визначатимуться числові значення C_1^*, C_2^* невідомих констант C_1, C_2. Для цього спочатку перепишемо рівняння (8) таким чином:

$$f_1\left(C_1, C_2\right)+f_2\left(C_1, C_2\right)+\frac{q_0}{2C_2}=0, \quad (10)$$

де функцією $f_1\left(C_1, C_2\right)$ позначено вираз $\left((*)+(**)\right)^{\frac{1}{3}}=\sqrt[3]{(*)+(**)}$, а функцією $f_2\left(C_1, C_2\right)$ позначено вираз $\left((*)-(**)\right)^{\frac{1}{3}}=\sqrt[3]{(*)-(**)}$.

А далі трансформуємо рівняння (10) до такого вигляду:

$$C_2 = -\frac{q_0}{2\left(f_1\left(C_1,\, C_2\right) + f_2\left(C_1,\, C_2\right)\right)}, \tag{11}$$

який уже є придатним для побудови ітераційної процедури визначення чисельного значення константи C_2 у вигляді

$$C_2^{(i+1)} = -\frac{q_0}{2\left(f_1\left(C_1^{(i)},\, C_2^{(i)}\right) + f_2\left(C_1^{(i)}, C_2^{(i)}\right)\right)}, \quad i = 0, 1, 2, \ldots. \tag{12}$$

А тепер аналогічним чином перепишемо і рівняння (7), тобто представимо його так:

$$f_1^{\bullet}\left(C_1, C_2\right) + f_2^{\bullet}\left(C_1, C_2\right) + \frac{q_0}{2C_2} = 0, \tag{13}$$

де функцією $f_1^{\bullet}\left(C_1, C_2\right)$ позначено вираз $((\bullet) + (\bullet\bullet))^{\frac{1}{3}} = \sqrt[3]{(\bullet) + (\bullet\bullet)}$, а функцією $f_2\left(C_1, C_2\right)$ позначено вираз $((\bullet) - (\bullet\bullet))^{\frac{1}{3}} = \sqrt[3]{(\bullet) - (\bullet\bullet)}$. А далі рівняння (13) перепишемо у вигляді

$$f_1^{\bullet}\left(C_1, C_2\right) = -\left(f_2^{\bullet}\left(C_1, C_2\right) + \frac{q_0}{2C_2}\right) \tag{14}$$

і піднімемо його обидві частини до третього степеня, після чого отримаємо:

$$\begin{aligned} &\frac{q_0{}^3}{8C_2^3} - \frac{3q_0{}^2}{2C_2}C_1 + \left[\left(-\frac{q_0{}^3}{8C_2^3} + \frac{3q_0{}^2}{2C_2}C_1\right)^2 + \left(-\frac{q_0{}^2}{4C_2^2}\right)^3\right]^{\frac{1}{2}} = \\ &= -\left\{\left[\frac{q_0{}^3}{8C_2^3} - \frac{3q_0{}^2}{2C_2}C_1 - \left[\left(-\frac{q_0{}^3}{8C_2^3} + \frac{3q_0{}^2}{2C_2}C_1\right)^2 + \left(-\frac{q_0{}^2}{4C_2^2}\right)^3\right]^{\frac{1}{2}}\right]^{\frac{1}{3}} + \frac{q_0}{2C_2}\right\}^3. \end{aligned} \tag{15}$$

Із рівняння (15) знайдемо, що

$$\begin{aligned} C_1 = \frac{2C_2}{3q_0^2}\Bigg\{ &\frac{\mathrm{q}_0^3}{8\mathrm{C}_2^3} + \left[\left(-\frac{q_0^3}{8C_2^3} + \frac{3q_0^2}{2C_2}C_1\right)^2 + \left(-\frac{q_0^2}{4C_2^2}\right)^3\right]^{\frac{1}{2}} + \\ &+ \left\{\left[\frac{q_0^3}{8C_2^3} - \frac{3q_0^2}{2C_2}C_1 - \left[\left(-\frac{q_0^3}{8C_2^3} + \frac{3q_0^2}{2C_2}C_1\right)^2 + \left(-\frac{q_0^2}{4C_2^2}\right)^3\right]^{\frac{1}{2}}\right]^{\frac{1}{3}} + \frac{q_0}{2C_2}\right\}^3\Bigg\}. \end{aligned} \tag{16}$$

Цей вираз уже є придатним для побудови ітераційної процедури визначення чисельного значення константи C_1 у вигляді

$$C_1^{(i+1)} = \frac{2C_2^{(i)}}{3q_0^2}\left\{\frac{q_0^3}{8\left(C_2^{(i)}\right)^3} + \left[\left(-\frac{q_0^3}{8\left(C_2^{(i)}\right)^3} + \frac{3q_0^2}{2C_2^{(i)}}C_1^{(i)}\right)^2 + \left(-\frac{q_0^2}{4\left(C_2^{(i)}\right)^2}\right)^3\right]^{\frac{1}{2}} + \right.$$

$$\left. + \left\{\left[\frac{q_0^3}{8\left(C_2^{(i)}\right)^3} - \frac{3q_0^2}{2C_2^{(i)}}C_1^{(i)} - \left[\left(-\frac{q_0^3}{8\left(C_2^{(i)}\right)^3} + \frac{3q_0^2}{2C_2^{(i)}}C_1^{(i)}\right)^2 + \left(-\frac{q_0^2}{4\left(C_2^{(i)}\right)^2}\right)^3\right]^{\frac{1}{2}}\right]^{\frac{1}{3}} + \frac{q_0}{2C_2^{(i)}}\right\}^3\right\}, \tag{17}$$

$i = 0, 1, 2, \ldots$.

Як бачимо, для визначення чисельних значень C_1^*, C_2^* невідомих констант C_1, C_2 в ітераційній процедурі наближень необхідно одночасно використовувати як ітерацію (12), так і ітерацію (17).

Починати ітераційний процес доцільно зі значень

$$C_1^{(0)} = 1; \quad C_2^{(0)} = 1, \tag{18}$$

оскільки через наявність як прямих так і обернених кубічних процедур в ітераційних виразах (12), (17), які чисельно швидко наростають при основах, більших одиниці, і чисельно швидко спадають при основах, менших одиниці, ітераційний процес буде швидко сходитись до прийнятних для нас значень C_1^*, C_2^*, за які можна взяти ті ітераційні значення $C_1^{(i)}, C_2^{(i)}$, котрі задовольняють заданим нами оцінкам ε похибки, тобто для яких одночасно виконуватимуться нерівності:

$$\left|\frac{C_1^{(i+1)} - C_1^{(i)}}{C_1^{(i)}}\right| \le \varepsilon; \quad \left|\frac{C_2^{(i+1)} - C_2^{(i)}}{C_2^{(i)}}\right| \le \varepsilon. \tag{19}$$

Звертаємо увагу на те, що вирази (12), (17), (19) містять в собі лише алгебраїчні операції, тому цілком логічним є припущення, що їх обчислення на кожному ітераційному кроці не перевищуватиме кількох мікросекунд, що, в свою чергу, дозволяє зробити припущення, що весь ітераційний процес визначення чисельних значень C_1^*, C_2^* за достатніх для задачі практичної оптимізації значень $\varepsilon = 0,05$ займатиме не більше кількох десятків мікросекунд.

А тепер перейдемо до побудови другої обчислювальної процедури, необхідної нам для розв'язання системи рівнянь (9), (2) чи (9), (3) або (9), (4) відносно невідомих змінних ν, q, які визначають оптимальний за витратами палива рух гібридного автомобіля в заданих умовах в заданий момент часу τ. Оскільки для усіх трьох випадків структура обчислювальної процедури одна і та ж, то побудуємо її лише для наближеного розв'язання системи рівнянь (9), (2), вказавши після цього лише на особливості, які вона матиме при наближеному розв'язанні систем рівнянь (9), (3) та (9), (4).

Спочатку проаналізуємо можливості трансформації рівняння (2) до вигляду, придатного для реалізації обчислювальної процедури. Переходячи в цьому рівнянні від похідної до відношення різниць значень функції та аргументу в конкретний момент часу τ_i, отримаємо:

$$q_i \approx \nu_i \frac{\Delta\nu_i}{\Delta\tau_i} + f_0\nu_i + f_1\nu_i^2 + f_2\nu_i^3, \quad i = 0,1,2,\ldots, \tag{20}$$

де
$$\Delta\tau_i = \tau_{i+1} - \tau_i; \tag{21}$$
$$\Delta\nu_i = \nu_{i+1} - \nu_i\,. \tag{22}$$

Оскільки відносний час τ є величиною, кратною механічній сталій автомобіля, яка може мати значення від долі секунди до кількох секунд, а на подолання відрізку дороги від зупинки до зупинки навіть в містах з великою кількістю світлофорів автомобілю потрібно не менше ніж кілька десятків секунд, то параметр τ_q в реальних умовах вимірюватиметься десятками відносних одиниць. А це у свою чергу означає, що без внесення суттєвої похибки в розрахунки сусідні значення τ_i ми можемо брати через одиницю, тобто, що замість виразу (21) ми можемо використовувати вираз
$$\Delta\tau_i = 1\,. \tag{23}$$

З урахуванням вищевикладеного рівняння (20) ми можемо переписати так:
$$q_i \approx \nu_i(\nu_{i+1} - \nu_i) + f_0\nu_i + f_1\nu_i^2 + f_2\nu_i^3,\;\; i = 0, 1, 2, ... \tag{24}$$
або
$$q_i \approx \nu_i\nu_{i+1} + f_0\nu_i + (f_1 - 1)\nu_i^2 + f_2\nu_i^3,\;\; i = 1, 2, ... \,. \tag{25}$$

З виразу (25) видно, що для розрахунку витрат палива q_i в момент часу τ_i нам потрібно знати значення швидкості ν_i в цей момент часу і задатись прогнозним значенням швидкості ν_{i+1} в наступний момент часу τ_{i+1}.

А тепер проаналізуємо можливості трансформації виразу (1) до вигляду, придатного для реалізації обчислювальної процедури.

Цілком очевидно, що саме цей вираз дозволяє нам розрахувати значення швидкості ν_i автомобіля в момент часу τ_i після приведення його до вигляду
$$\begin{aligned}\nu_i = &\left\{\frac{q_i^3}{8(C_2^*)^3} - \frac{3q_i^2}{2C_2^*}\left(\tau_i + C_1^*\right) + \left[\left[-\frac{q_i^3}{8(C_2^*)^3} + \frac{3q_i^2}{2C_2^*}\left(\tau_i + C_1^*\right)\right]^2 + \left(-\frac{q_i^2}{4(C_2^*)^2}\right)^3\right]^{\frac{1}{2}}\right\}^{\frac{1}{3}} + \\ &+\left\{\frac{q_i^3}{8(C_2^*)^3} - \frac{3q_i^2}{2C_2^*}(\tau_i + C_1^*) - \left[\left[-\frac{q_i^3}{8(C_2^*)^3} + \frac{3q_i^2}{2C_2^*}\left(\tau_i + C_1^*\right)\right]^2 + \left(-\frac{q_i^2}{4(C_2^*)^2}\right)^3\right]^{\frac{1}{2}}\right\}^{\frac{1}{3}} + \frac{q_i}{2C_2^*},\end{aligned} \tag{26}$$
$$i = 1, 2, ... \,.$$

Але і тут нам без ітераційної процедури не обійтись, тому що згідно з виразом (25) q_i необхідно розраховувати, знаючи значення ν_i, а згідно з виразом (26) навпаки ν_i необхідно розраховувати, знаючи q_i. Тож для реалізації обчислювальної процедури для визначення чисельного значення ν_i необхідно вираз (25) трансформувати до вигляду
$$\begin{aligned}&\nu_i^{(n+1)} = \frac{1}{f_0}\left(q_i^{(n)} - \nu_i^{(n)}\nu_{i+1} - \left(f_1 - 1\right)(\nu_i^{(n)})^2 - f_2\left(\nu_i^{(n)}\right)^3\right),\\ &n = 0, 1, 2, ... ,\end{aligned} \tag{27}$$

а для реалізації обчислювальної процедури для визначення чисельного значення q_i необхідно вираз (26) трансформувати до вигляду

$$
\begin{aligned}
q_i^{(n+1)} = 2C_2^* \Bigg\{ \nu_i^{(n)} - \Bigg\{ & \frac{\left(q_i^{(n)}\right)^3}{8\left(C_2^*\right)^3} - \frac{3\left(q_i^{(n)}\right)^2}{2C_2^*}(\tau_i + C_1^*) + \left[\left[-\frac{(q_i^{(n)})^3}{8(C_2^*)^3} + \frac{3\left(q_i^{(n)}\right)^2}{2C_2^*}\left(\tau_i + C_1^*\right) \right]^2 + \right. \\
& \left. + \left(-\frac{(q_i^{(n)})^2}{4(C_2^*)^2} \right)^3 \right]^{\frac{1}{2}} \Bigg\}^{\frac{1}{3}} - \Bigg\{ \frac{\left(q_i^{(n)}\right)^3}{8(C_2^*)^3} - \frac{3\left(q_i^{(n)}\right)^2}{2C_2^*}\left(\tau_i + C_1^*\right) - \left[\left[-\frac{\left(q_i^{(n)}\right)^3}{8(C_2^*)^3} + \frac{3\left(q_i^{(n)}\right)^2}{2C_2^*}\left(\tau_i + C_1^*\right) \right]^2 + \right. \\
& \left. + \left(-\frac{\left(q_i^{(n)}\right)^2}{4\left(C_2^*\right)^2} \right)^3 \right]^{\frac{1}{2}} \Bigg\}^{\frac{1}{3}} \Bigg\},
\end{aligned}
\tag{28}
$$

$n = 0, 1, 2, \ldots .$

Задаючись відносною похибкою ε^* визначення числових значень q_i, ν_i, обчислювальний процес зупиняємо, як тільки матимемо:

$$
\begin{aligned}
& \left| \frac{q_i^{(n+1)} - q_i^{(n)}}{q_i^{(n)}} \right| \le \varepsilon^*; \\
& \left| \frac{\nu_i^{(n+1)} - \nu_i^{(n)}}{\nu_i^{(n)}} \right| \le \varepsilon^*.
\end{aligned}
\tag{29}
$$

З тих же міркувань, які були наведені нами вище відносно процедури обчислення числових значень констант C_1, C_2, обчислювальна процедура для визначення числових значень змінних оптимального руху q_i, ν_i на кожному кроці обчислень буде теж такою, що сходиться не довше ніж за кілька десятків мікросекунд.

Викладена вище обчислювальна процедура побудована для сумісного наближеного розв'язання системи рівнянь (9), (2). Неважко переконатись, що обчислювальна процедура для сумісного наближеного розв'язання системи рівнянь (9), (3), якими описується оптимальний рух гібридного автомобіля в заданих умовах на спуск, буде відрізнятись від вищевикладеного лише тим, що у ній замість послідовних наближень для швидкості згідно з виразом (27) слід формувати наближення, користуючись виразом

$$
\nu_i^{(n+1)} = \frac{1}{f_0 \cos\beta - f_0^* \sin\beta} \left(q_i^{(n)} - \nu_i^{(n)} \nu_{i+1} - \left(f_1 - 1\right)\left(\nu_i^{(n)}\right)^2 - f_2\left(\nu_i^{(n)}\right)^3 \right), \quad n = 0, 1, 2, \ldots . \tag{30}
$$

А обчислювальна процедура для сумісного наближеного розв'язання системи рівнянь (9), (4), якими описується оптимальний рух гібридного автомобіля в заданих умовах на підйом, буде відрізнятись від викладеного вище лише тим, що у ній замість послідовних наближень для швидкості згідно з виразом (27) слід формувати наближення, користуючись виразом

$$
\nu_i^{(n+1)} = \frac{1}{f_0 \cos\beta + f_0^* \sin\beta} \left(q_i^{(n)} - \nu_i^{(n)} \nu_{i+1} - \left(f_1 - 1\right)\left(\nu_i^{(n)}\right)^2 - f_2\left(\nu_i^{(n)}\right)^3 \right), \quad n = 0, 1, 2, \ldots . \tag{31}
$$

Що ж до послідовних наближень для витрат пального, то вони і у випадках спуску та підйому здійснюються за виразом (28).

Висновки

Запропоновано метод ідентифікації моделей оптимального за критерієм мінімуму витрат пального руху від зупинки до зупинки за заданий час транспортного засобу з комбінованим приводом від двигуна внутрішнього згорання та від електричного двигуна постійного струму при вимкненій системі електропривода.

Побудовані обчислювальні процедури запропонованого методу ідентифікації, котрі дозволяють визначати чисельні значення параметрів та змінних моделей оптимального руху за короткі проміжки часу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Оптимізація руху гібридного автомобіля з непрацюючою системою електропривода / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк, О. П. Кубрак. [Електронний ресурс] // «Наукові праці Вінницького національного технічного університету». — 2015. — № 4. — Режим доступу : http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci.

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

Рекомендована кафедрою відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 9.10.2015

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

A. B. Mokin[1]
B. I. Mokin[1]
V. A. Lobatiuk[1]

Computational Method for Identifying Models of Optimal Motion of Hybrid Car with Broken Electric Drive System from Stop to Stop Within a Specified Time Frame

[1]Vinnytsia National Technical University

Computational method for identifying models of motion of a vehicle with a combined drive of internal combustion engine and DC motor when the electric drive system is broken from stop to stop within a specified time frame optimal by minimum fuel consumption criterion has been proposed in the paper.

Keywords: optimal motion model, hybrid vehicle, DC motor, internal combustion engine.

Mokin Oleksandr 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. Мокин[1]
Б. И. Мокин[1]
В. А. Лобатюк[1]

Вычислительный метод для идентификации моделей оптимального движения от остановки до остановки за заданное время гибридного автомобиля с неработающей системой электропривода

[1]Винницкий национальный технический университет

Предложен вычислительный метод для идентификации моделей оптимального движения по критерию минимума расхода топлива движения от остановки до остановки за заданное время транспортного средства с комбинированным приводом от двигателя внутреннего сгорания и от электрического двигателя постоянного тока при выключенной системе электропривода.

Ключевые слова: модель оптимального движения, гибридный автомобиль, двигатель постоянного тока, двигатель внутреннего сгорания.

Мокин Александр Борисович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов, e-mail: abmokin@gmail.com;

Мокин Борис Иванович — акад. НАПН Украины, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов;

Лобатюк Виталий Анатольевич — аспирант кафедры возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов