

$$T = -2 \cdot 10^{-5} v^3 + 0,0069v^2 - 0,3222v + 40.$$

Таким образом, в результате исследований установлено, что двухрядные конические подшипники имеют более низкую температуру нагрева по сравнению с цилиндрическими. Это свидетельствует об их лучших эксплуатационных характеристиках, более высокой безотказности и долговечности.

1. Горбенко А. П., Мартынов И.Э., Донченко А.В. К проблеме совершенствования буксового узла вагонов // Железнодорожный транспорт Украины. – 1999. – №6. – С. 39-42.
2. Цюренко В.Н., Жданов И. П., Иванов С. Г. Полиамидный сепаратор для буксовых узлов вагона // Железнодорожный транспорт. – 1995. – №3. – С.34-37.
3. Прешель З. Подшипники качения для нового подвижного состава // Железнодорожный транспорт. – 1993. – № 4. – С.39-41.

Получено 10.09.2002

УДК 621.333

Е.І.КАРПУШИН, канд. техн. наук

Харківська державна академія міського господарства

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ЗА ВИТРАТАМИ ЕНЕРГІЇ ПОКАЗНИКІВ КЕРУВАННЯ РУХОМОЮ ОДИНИЦЕЮ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ НА ПРОСТОМУ ПЕРЕГОНІ

Для встановлення еталонного керування рухомою одиницею міського електротранспорту на простих перегонах запропоновано використання попередньо розрахованого оптимального за витратами енергії плану змін режимів руху.

Проходження простого, тобто без факторів, що викликають проміжні гальмування, перегону довжиною S_n є випадковим процесом, в якому тривалості проходження T_n утворюють усічений нормальний розподіл. Розглянемо математичну модель проходження перегону, на якому після реостатного пуску та ослаблення поля на шляху $S_{рп-оп}$ за час $T_{рп-оп}$ і руху від швидкості $V_{оп}$ виходу на автоматичну характеристику ослабленого поля до кінцевої швидкості розбігу V_p дотримання заданого часу T_n потребує тільки одного повторного пуску від швидкості V_1 закінчення першого вибігу до швидкості V_2 на початку другого вибігу, що закінчується при швидкості початку гальмування V_g . При цьому рухома одиниця з вагою тари G_p , коефіцієнтом інерції обертливих частин γ і часткою ваги пасажирів λ відносно тари виконує механічну роботу

$$A_{\text{мех}} = 51G_m(1+\gamma+\lambda)(V_p^2 - V_{\text{он}}^2) \left[1 + \frac{(1+\lambda)[a+0,5b(V_p^2 + V_{\text{он}}^2)]}{102(1+\gamma)f[V_p(V_{\text{он}}+g)+gV_{\text{он}}+h]} \right] +$$

$$+ 51G_r(1+\gamma+\lambda)(V_2^2 - V_1^2) \left[1 + \frac{(1+\lambda)[a+0,5b(V_2^2 + V_1^2)]}{102(1+\gamma)f[V_2(V_1+g)+gV_1+h]} \right],$$

яка крім згаданих параметрів визначається коефіцієнтами a, b функції опору рухові і коефіцієнтами f, g, h функції апроксимації питомої характеристики діючих сил. На відміну від магістрального транспорту, при експлуатації трамвайних вагонів і тролейбусів один і той же ходовий час $T_{\text{п}}$ може бути реалізований різними комбінаціями швидкості закінчення розбігу після зупинки V_p , швидкості початку гальмування V_r і вже згаданих V_1, V_2 . Відповідно до цих швидкостей мають місце різні значення витрат енергії: так, проходження за 45с тролейбусом ЗіУ-9 перегону в 350 м при $V_p=11,5, V_1=9,0$ та $V_2=11$ м/с потребує механічної роботи $A_{\text{мех}}=2300$ кВтс, а при $V_p=11,0, V_1=10$ та $V_2=11,5$ м/с і тій же тривалості – всього 2080 кВтс, тобто на 10,7% менше. Практичний інтерес являють умови, за яких реалізуються ліві межі функцій розподілів витрат енергії, щоб отримати рекомендації щодо підвищення енергоефективності.

Математично це означає пошук набору $V^* = \{V_p, V_1, V_2, V_r\}$ з простору дійсних позитивних значень $\mathfrak{R}^{V_p, V_1, V_2, V_r}$, який забезпечує мінімум цільовій функції $\Phi(V^*)$, що визначає механічну роботу $A_{\text{мех}}(S_{\text{п}}, T_{\text{п}})$ при проходженні перегону за умови дотримання обмежень

$$\Lambda_i : \Phi(V^*) = \min_{V \in \Omega} \Phi(V), \Omega = \{V : V \in \mathfrak{R}^{V_p, V_1, V_2, V_r}; \Lambda_i(V) = 0, i = 1, 2, \dots, n; V_j \geq 0, j = \overline{1, 4}\}$$

Функції обмежень $\varphi(V)$ відповідають вимогам проходження довжини $S_{\text{п}}$ за час $T_{\text{п}}$, а також природним співвідношенням швидкостей $V_p \geq V_1; V_2 \geq V_r$. Послідовність оптимальних швидкостей визначатиме еталонне керування рухомою одиницею. Скориставшись узагальненим методом невизначених множників Лагранжа [1], складемо систему диференціальних рівнянь виду

$$\frac{\partial}{\partial V} (\Phi(V) + \sum_{i=1}^m \Lambda_i \varphi_i(V_p, V_1, V_2, V_r)) = 0,$$

розв'язання якої дає шуканий набір швидкостей.. Тягову при розбігу та гальмівну при службовому гальмуванні характеристики апроксимуємо квадратичними тричленами з коефіцієнтами $A_{p,r}$, $B_{p,r}$, $C_{p,r}$, тоді коефіцієнти рівнянь руху для розбігу, вибігу та гальмування матимуть вигляд [2]

$$f_{p,r} = \frac{C_{p,r} \pm bG_T(1+\lambda)}{102G_T(1+\lambda)}; \quad 2g_{p,r} = \frac{B_{p,r}}{C_{p,r} - bG_T(1+\lambda)};$$

$$h_{p,r} = \frac{A_{p,r} \pm G_T(1+\lambda)a}{C_{p,r} - bG_T(1+\lambda)}; \quad f_B = \frac{b(1+\lambda)}{102(1+\gamma+\lambda)}; \quad h_B = \frac{a}{b}.$$

Сума довжин, що помножиться на невизначений множник, має вигляд

$$\left[S_{pn-on} + \frac{V_p^2 - V_{on}^2}{2f_p[V_p V_{on} + g(V_p + V_{on}) + h_p]} + \frac{V_p(V_p - V_1)}{f_B(V_p^2 + h_B)} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2f_p[V_1 V_2 + g(V_1 + V_2) + h_p]} + \frac{V_2(V_2 - V_r)}{f_B(V_2^2 + h_B)} + \frac{V_r^2}{2f_r(g_r V_r + h_r)} - S_{II} \right] \Lambda_1.$$

Аналогічно для суми відрізків часу:

$$\left[T_{pn-on} + \frac{V_p - V_{on}}{2f_p[V_p V_{on} + g_p(V_p + V_{on}) + h_p]} + \frac{2(V_p - \sqrt{V_p V_1})}{f_B(V_p^2 + h_B)} + \frac{V_2 - V_1}{f_p[V_1 V_2 + g_p(V_1 + V_2) + h_p]} + \frac{2V_2 - 2\sqrt{V_2 V_r}}{f_B(V_2^2 + h_B)} + \frac{V_r}{f_r(g_r V_r + h_r)} - T_{II} \right] \Lambda_2.$$

Оскільки швидкість закінчення першого вибігу менша за швидкість розбігу і більша за швидкість гальмування, маємо ще два множники: $(V_2 - V_1 - 1)\Lambda_3$; $(V_r - V_1 - 1)\Lambda_4$, тобто $m=4$. Розв'язання проведено методом ітерацій, що входить до складу стандартної програми MathCad. Уявлення про діапазони оптимальних швидкостей можна отримати на прикладі проходження перегону $S_{II}=350$ м при різних тривалостях руху T_n .

Таблиця 1 – Оптимальні швидкості руху на простому перегоні довжиною 350 м

Час проходження перегону T_p , с	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Швидкість в кінці розбігу V_p , м/с	13,2	12,6	12,4	12,1	11,5	11,2	11,0	10,8	10,6	10,4
Швидкість в кінці 1 вибігу V_1 , м/с	12,2	11,3	10,4	10,2	10,1	9,8	9,5	9,2	8,9	8,7
Те ж в кінці повторного пуску V_2	12,2	12,3	11,4	11,0	10,9	10,8	10,5	10,2	9,9	9,7
Те ж в кінці 2 вибігу V_r , м/с	12,2	12,3	11,4	10,7	9,6	9,1	8,6	8,2	7,8	7,4
Механічна робота $A_{мех}$, кВт·год	0,70	0,69	0,67	0,63	0,57	0,55	0,53	0,51	0,49	0,48

Як свідчать розрахунки, керування з дотриманням оптимальних швидкостей дає зменшення витрат енергії на 5-12%. Але треба рахуватися з необхідністю водієві весь час контролювати швидкість, щоб вчасно змінити режим для забезпечення оптимального керування, що суперечить вимогам безпеки руху. Тому пропонується встановлювати зміни режимів не за задалегідь розрахованими швидкостями, а за довжинами відповідних відрізків шляху, які завжди можна прив'язати до орієнтирів уздовж траси, і таким чином позбутися необхідності весь час стежити за спідометром. Наприклад, для того ж перегону довжиною 350 м, використавши функції довжин розбігу $S_p(V_p)$, повторного пуску $S_{п.п}(V_1, V_2)$ та вибігів $S_{В1}(V_p, V_1)$, $S_{В2}(V_2, V_r)$, в яких аргументами слугують розглянуті вище швидкості, зміни режимів повинні відбуватися на відстанях:

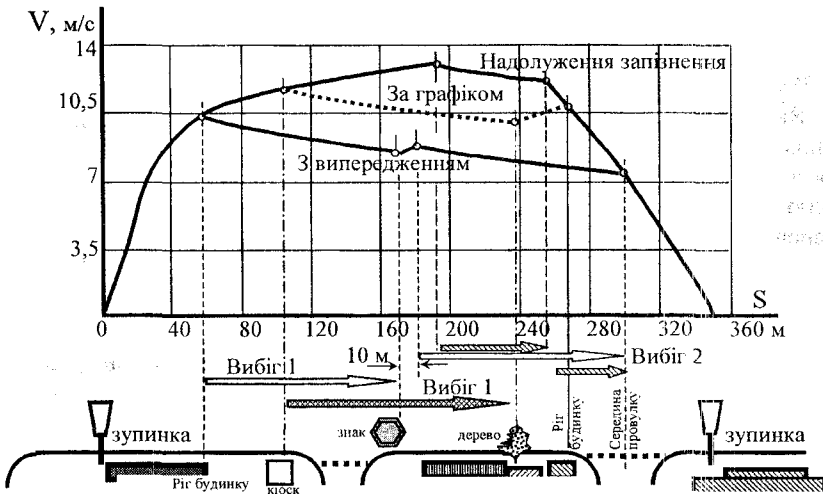
Таблиця 2 – Довжини ділянок, на яких досягаються оптимальні швидкості

Довжини відрізків траси, м	Час	Надолуження				За графіком			Випередження			
	T_p , с	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	
	S_p	190	137	125	109	87	79	73	69	65	62	
	$S_{В1}$	68	86	128	151	91	89	95	100	104	105	
	$S_{п.п}$	-	41	23	16	20	17	14	12	11	10	
	$S_{В2}$	-	-	-	-	95	105	115	119	123	132	

Крім того, залежно від поточної ситуації можна визначити орієнтири місць змін режимів не тільки для руху за розкладом, а й для надолуження запізнення та компенсації випередження графіка, причому будуть реалізовані оптимальні за витратами енергії швидкості (рисунк).

Таким чином, енергозберігаюче керування полягає у змінах режиму руху – переходах з тяги на вибіг і напика – у задалегідь розрахованих і наперед відомих водієві місцях, зазначених постійними оріє-

нтирами вздовж перегону. Наприклад, при потребі компенсувати випередження ($T_n=50$ с) рухома одиниця повинна розбігатися до першого орієнтиру – рогу будинку, далі до другого орієнтиру – дорожнього знака йти вибігом, потім до середини провулку рухатися знову вибігом. Якщо рух здійснюється за графіком ($T_n=44$ с), розбіг повинен тривати доти, доки рухома одиниця не пройде кіоск, після чого повинен бути вибіг аж до наступного орієнтира – дерева. При надолуженні запізнення ($T_n=41$ с) розбіг треба припинити за 20 м після знака, і т.д.



Приклад реалізації оптимальних за витратами енергії планів проходження простого перегону

З уваги на те, що транспортні підприємства України споживають більше 1 млрд. кВт·год електроенергії за рік, навчання водіїв енергозберігаючому керуванню на підставі визначення наборів оптимальних швидкостей і встановлення орієнтирів місць змін режимів є вельми актуальним, оскільки без будь-яких капіталовкладень можна забезпечити суттєве зменшення енергоспоживання.

1. Сеа Ж. Оптимизация. Теория и алгоритмы. – М.: Мир, 1973. – 467 с.

2. Карлушин Е.І. Застосування моделювання руху для визначення мінімуму механічної роботи при проходженні заданого перегону // Вестн. нац. техн. ун-та «ХПИ». Вып. 14. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. – С. 305 – 307.

Отримано 10.09.2002