

## МОДЕЛЮВАННЯ СЛУЖБОВОГО ГАЛЬМУВАННЯ РУХОМОЇ ОДИНИЦІ МАРШРУТНОГО ТРАНСПОРТУ ПРИ ВИПАДКОВИХ ПОЧАТКОВИХ УМОВАХ

к.т.н., проф. Е.І. Карпушин

Обґрунтовано методику моделювання службового гальмування рухомих одиниць маршрутного транспорту при випадкових початкових умовах на підставі моделі дорожньої поведінки Буркардта.

Визначення поздовжньої координати рухомої одиниці на смузі руху та її похідних (швидкості, прискорення чи уповільнення), а також розрахунки механічної роботи і відповідних витрат енергії здійснюються за допомогою математичних моделей, які в практиці залізничного та міського електричного транспорту мають спеціальну назву тягових розрахунків.

В своїй основі тягові розрахунки мають інтегрування тим чи іншим методом рівняння руху як окремого різновиду другого закону Ньютона. Оскільки функції приведених до ободу коліс тягових та гальмівних сил, а також сил опору рухові є суттєво нелінійними, тягові розрахунки базувалися на кусочно-лінійній апроксимації цих функцій та послідовному розв'язанні лінеаризованих на відтинках рівнянь руху.

На відміну від магістрального, при експлуатації маршрутного транспорту тягові розрахунки не знайшли широкого практичного застосування і використовуються, в основному, при обґрунтуванні технічних вимог до перспективного рухомого складу. Пояснюється це малою імовірністю того, що конкретна рухома одиниця за визначений тяговим розрахунком час досягне визначеної швидкості на визначеній довжині з-за великої кількості варіантів реалізації руху, що робить процес руху детермінованим лише в середньому. Тому необхідність моделювання величезної кількості варіантів руху на маршрутному транспорті унеможливило застосування тягових розрахунків в практиці, і там, де практика вимагає попереднього визначення параметрів руху, зокрема при складанні розкладів, замість тягових розрахунків організуються пробні, тобто експериментальні, поїздки з хронометражем.

Крім того, існуюча методика виконання тягових розрахунків для маршрутного, зокрема для міського електротранспорту, в цілому непридатна тому, що при інтегруванні рівняння руху аргументом завжди виступає прирощення швидкості, а функціями - час та пройдений шлях. Дійсно,

для будь-якого режиму похідна швидкості  $dV$  функціонально пов'язана з питомою діючою силою  $f_d$  і інтегрування рівняння руху за першою формою дає відтинки часу та відстані:

$$t_2 - t_1 = k_1 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{f_d}; \quad S_2 - S_1 = k_2 \int_{V_1}^{V_2} \frac{V dV}{f_d},$$

( $k_1, k_2$  – системні коефіцієнти), чим автоматично визнається незмінність питомої діючої сили на цих відтинках. Але таке припущення справедливе тільки при незмінному питомому опорі рухові, зокрема при незмінному ухилі, незмінному радіусі кривої тощо, та при гарантованій можливості проходження визначеного відтинку шляху без необхідності зміни режиму.

Головною перепорою застосування існуючої методики моделювання руху на маршрутному транспорті з використанням тягових розрахунків є невизначеність місця повної зупинки рухомої одиниці при випадкових значеннях початкової швидкості та відстані до зупинки, що примушує визначати місце початку службового гальмування побудовою кривої гальмування з кінця до перетинання з відтинком кривої попереднього перед гальмуванням режиму [1]. Ясно, що таке моделювання не має нічого спільного з реальністю, оскільки параметри початку гальмування насправді утворюють певну множину випадкових значень. В реальних умовах експлуатації водій починає гальмування з певним запасом по відстані, бо точно визначити положення рухомої одиниці відносно зупинки, миттєву швидкість та уповільнення за допомогою зорової оцінки людина не може. Загальним для всіх випадків є інтенсивний початок гальмування (так зване пристрілювальне гальмування), корекція відстані до бажаного місця зупинки переходом на менше уповільнення чи вибіг, та догальмування механічним (колодковим чи пневматичним) гальмом.

Оскільки гальмування починається з випадкової швидкості на випадковій відстані від зупинки, потрібно попередньо встановити відстані між черговими перемиканнями гальмівного контролера. Хоча службове гальмування є випадковим процесом, ця випадковість не є абсолютною – при певній швидкості початку гальмування  $V_{gr}$  на відстані  $S_r$  від майбутнього місця повної зупинки, дії водія рухомого складу підпорядковані певній стратегії: зупинити рухому одиницю найближче до запланованого місця за найменший час. При цьому стаж та досвід водія визначає дисперсію довжини  $S_r$  і часу гальмування  $T_r$ .

Змоделюємо процес службового гальмування на підставі моделі дорожньої поведінки Буркардта [2], за якою дії водія складають низку циклічних процесів, кожний з яких відбувається згідно з набутими аналогами у формі рефлексів та стереотипів. Врахуємо, що сприйняття водієм швидкості приблизно пропорційне її квадрату, а темп зменшення швидкості, в основному, недооцінюється, тобто оцінка водієм швидкості під

час гальмування менша від її фактичного значення [2]. Процес службового гальмування представимо як поступове досягнення наперед визначеного місця, що в момент початку гальмування оцінюється водієм відстанню  $S$ . Рух одиниці на тій чи іншій позиції контролера водія вважатимемо рівноприскореним, тобто знехтуємо перехідними процесами та нелінійністю залежності квадрату швидкості від гальмівного шляху.

Для плавного входження у гальмівний режим водій спочатку виконує часткове гальмування, під час якого оцінює відстань до потрібного місця, і якщо прогнозується значне її перевищення, на відстані  $S_1$  збільшує уповільнення. Рухаючись з більшим уповільненням, водій продовжує оцінювати відстань, що залишилась до місця зупинки, і якщо ця відстань здається замалою, то за  $S_2$  до визначеного місця переходить на нижчу позицію або навіть на вибіг, прогножуючи відстань до повної зупинки при такому темпі зміни швидкості.

Враховуючи припущення дотримання уповільнень, можна записати:

$$\frac{V_{\text{пр}}^2 - V_1^2}{2b_1} + S_1 = S_r; \quad \frac{V_1^2 - V_2^2}{2b_2} + S_2 = S_1; \quad \frac{V_2^2 - V_3^2}{2b_1} + S_3 = S_2; \quad \frac{V_3^2}{2b_2} = S_3,$$

де  $b_2$ ,  $b_1$  - уповільнення на високій та низькій (або нульовій) позиціях контролера,  $V_{\text{пр}}$  - швидкість початку гальмування,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  - швидкості в моменти перемикавання контролера.

Відстані  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  витримуються водієм виходячи з наміру досягти зазначеного місця, додержуючи сталим темп зменшення відстані у припущенні співпадання оцінок відстаней з самими відстанями. У геометричному представленні таке намагання відображається мінімізацією різниці між площею, окреслену відрізками  $V^2(S)$  для часткового та повного уповільнень, і площею трикутника  $V_{\text{пр}}^2 - 0 - S_r$ . Математично це означає достачання мінімуму функціоналу

$$F = \min_{S_1, S_2, S_3 \in S_r} \left( \frac{1}{2} (V_{\text{пр}}^2 - V_1^2) (S_r - S_1) + V_1^2 (S_r - S_1) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} (V_1^2 - V_2^2) \cdot (S_1 - S_2) + V_2^2 (S_1 - S_2) + \frac{1}{2} (V_2^2 - V_3^2) \cdot (S_2 - S_3) + \right. \\ \left. + V_3^2 (S_2 - S_3) + \frac{1}{2} (V_{\text{пр}}^2 - V_3^2) (S_r - S_3) + V_3^2 (S_2 - S_3) + \frac{1}{2} (V_{\text{пр}}^2 - V_3^2) (S_r - S_3) \right).$$

Вилучивши квадрати швидкостей, маємо умову достачання мінімуму

$$\frac{\partial F}{\partial S_j} = 0, \quad j = 1, 2, 3; \quad S_j \in S_r.$$

Після належних перетворень отримуємо систему алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} 3 - 2k_1 + 3k_2 = 0; \\ 2b_1k_2 - 2b_2k_3 - b_1 + b_1k_1 = 0; \\ b_2 - 2b_2k_3 - 2b_2k_2 + 2b_1k_3 = 0, \end{cases}$$

в якій відстані замінені відповідними частками відносно  $S_r$ :

$$k_1 = \frac{S_1}{S_r}; \quad k_2 = \frac{S_2}{S_r}; \quad k_3 = \frac{S_3}{S_r}.$$

Розв'язання цих рівнянь утруднень не викликає.

Таким чином, моделювання службового гальмування при випадкових параметрах початку зводиться до попереднього встановлення максимальної та мінімальної меж повного гальмівного шляху, залежних від середнього та дисперсії швидкостей транспортного потоку на смузі руху, і визначення частин цього шляху на пристрілювальне гальмування, на вибіг або гальмування з меншим уповільненням, та на остаточне догальмовування. Урахування варіацій мас, тобто різного пасажирського наповнення, відбувається множенням прийнятих для ваги тари розрахункових уповільнень на відповідний коефіцієнт. Точне, у зазначеному вище сенсі, моделювання гальмування тепер не викликає утруднень, оскільки довжини частин гальмівного шляху, що припадають на почергові позиції контролера гальмування ( а відповідно до позицій - коефіцієнти рівнянь руху) відомі [3].

## ЛІТЕРАТУРА

1. Байрыева Л.С., Шевченко В.В. Электрическая тяга. – М.: Транспорт, 1986. – 206 с.
2. Burkardt F. Fahrbbahn, Fahrzeug und Fahrverhalten // Psychologie des Straßenverkehrs. – Bern: Huber, 1965.
3. Карпушин Е.І. Аналітичне моделювання руху на міському електротранспорті // Коммунальное хозяйство городов. – К.: Техніка. – 2000. – Вып. 23. – С. 198 - 204.

*Подана до редколегії 11.12.2000*