

канд. техн. наук, доцент, докторант Д. О. Кулагін
Запорізький національний технічний університет

Визначення рівняння екстремалі маршрутної карти для управління параметрами руху тягового рухомого складу

Проведена математична постановка способу визначення геометричного місця точок, що визначають екстремаль маршрутної карти руху тягової одиниці рухомого складу, на основі якої можлива побудова системи автоведення рухомого складу за певними раціональними чи оптимальними алгоритмами керування.

***Ключові слова:** маршрутна карта руху, поїзд, алгоритм, керування, трансверсальність, екстремаль, раціональний спосіб.*

Вступ. Графік руху поїздів визначає технологію експлуатаційної діяльності всієї мережі залізниць, об'єднує і організує роботу всіх лінійних підрозділів, ділянок і напрямів доріг в єдиний транспортний конвеєр. Рівень виконання графіка відображає ступінь реалізації технології перевізного процесу та якості роботи. Виконання графіку руху пасажирських, приміських та вантажних поїздів забезпечує безпеку руху, більш ефективне використання рухомого складу, провізної і пропускної спроможності доріг, поліпшення обслуговування пасажирів і має важливе економічне і соціальне значення [1-5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням дослідження виконання графіка руху та зміни тягових зусиль чи процесу керування тяговою електропередачею присвячено багато робіт [6-10]. Проте ряд питань ще потребує чіткого математичного визначення. В залежності від обставин - відхилення істинного значення ваги рухомого складу від розрахункового, наявності сильного зустрічного або бокового вітру, стану колії, недотримання часу ходу перегонном, порушення розкладу приміських поїздів при посадці-висадці пасажирів через перенаселеність поїзда внаслідок видачі з депо поїздів не повним складом та позапланової відміни приміських поїздів, затримки проходження поїздів за місцем ремонтних робіт на перегоні та інших факторів, можливе відхилення від запланованого графіка руху.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. На основі описаних вимог з боку графіка руху приходимо до висновку, що в наслідок цього необхідно проводити

корегування величини середньої швидкості руху моторвагонного поїзда для виконання встановленого графіка руху [1-5]. Тому питання дослідження керування тяговим процесом для виконання графіка руху або подолання відставання від нього є актуальною та важливою задачею.

Мета роботи - визначення раціонального геометричного місця точок рівняння маршрутної карти руху для управління тяговим зусиллям з метою виконання графіка руху або подолання відставання від нього.

Виклад основного матеріалу дослідження. Припустимо, що верхня межева умова маршрутної карти руху поїзда може переміщуватись вздовж певної кривої (рис. 1)

$$S = \varphi(t). \quad (1)$$

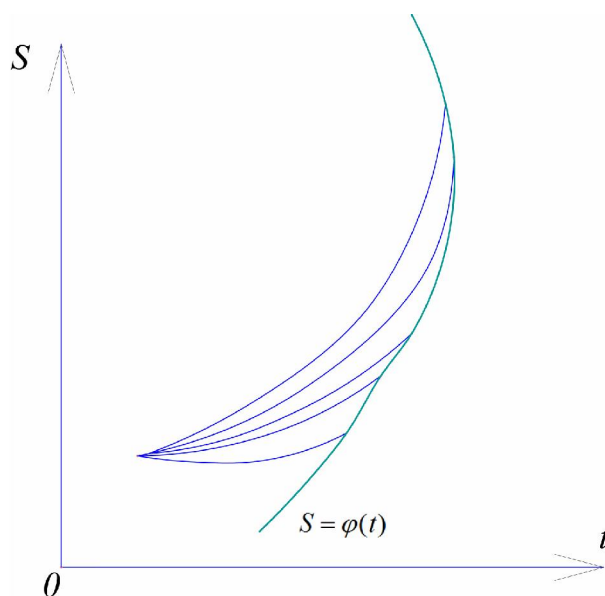


Рис. 1. Крива, вздовж якої розташовано геометричні місця верхніх межових умов маршрутної карти руху

Дана крива проходить через всі можливі місця розташування межових умов пучка екстремалей, що є можливими варіантами рішення поставленої задачі (рис. 1).

Відповідно до [11] відносно вказаної функції для координат верхньої межової умови маршрутної карти руху (t_2, S_2) можна записати наступне:

$$\delta S_2 \approx \frac{d}{dt} \varphi(t) \delta t_2. \quad (2)$$

Тоді використаємо умову трансверсальності [12, 13], відповідно до якої запишемо в загальному вигляді

$$\left[F + \left(\frac{d}{dt} \varphi(t) - \frac{d}{dt} S(t) \right) \cdot F_{\frac{dS}{dt}} \right] \delta t_2 = 0. \quad (3)$$

Враховуючи, що δt_2 змінюється довільно, та на основі досліджень [14] для виразу (2) матимемо

$$\left[F + \left(\frac{d}{dt} \varphi(t) - \frac{d}{dt} S(t) \right) \cdot F_{\frac{dS}{dt}} \right]_{t=t_2} = 0. \quad (4)$$

Відповідно до основного геометричного місця координат руху поїзда, та оптимального функціоналу руху поїзда, використавши позначення $G(S, t) = 2 \cdot \pi \cdot S(t)$, запишемо вираз для знаходження площі поверхні Π , яка утворюється при обертанні кривої виду (1) навколо осі часу:

$$\Pi = \int_{t_1}^{t_2} G(S, t) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dS}{dt} \right)^2} dt. \quad (5)$$

Умова трансверсальності (4) в цьому випадку матиме наступний вигляд:

$$G(S, t) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dS}{dt} \right)^2} + \frac{G(S, t) \cdot \frac{dS}{dt}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dS}{dt} \right)^2}} \cdot \left(\frac{d}{dt} \varphi(t) - \frac{d}{dt} S(t) \right) = 0, \quad (6)$$

або після аналітичний перетворень отримаємо наступне:

$$\frac{G(S, t) \cdot \left(1 + \left[\frac{d}{dt} \varphi(t) \right] \left[\frac{d}{dt} S(t) \right] \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{dS}{dt} \right)^2}} = 0. \quad (7)$$

Для функції $G(S,t) = 2 \cdot \pi \cdot S(t)$ можна стверджувати, що $G(S,t) \neq 0$, бо в противному випадку початкова та кінцева точки маршрутної карти руху поїзда співпадуть. Тоді маємо, що

$$1 + \left[\frac{d}{dt} \varphi(t) \right] \left[\frac{d}{dt} S(t) \right] = 0. \quad (8)$$

Останній вираз еквівалентний до виразу

$$\frac{d}{dt} S(t) = - \left[\frac{d}{dt} \varphi(t) \right]^{-1}. \quad (9)$$

Тобто умова трансверсальності зводиться до умови ортогональності. Робимо висновок, що екстремалі $S = S(t)$ повинні перетинати криву $S = \varphi(t)$, по якій переміщується точка з координатами (t_2, S_2) , під кутом $\frac{\pi}{2}$ (рис. 2).

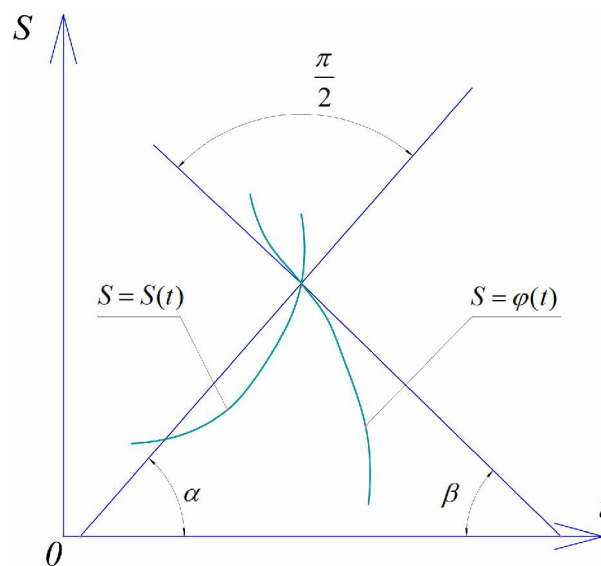


Рис. 2. Геометричний зміст умови трансверсальності для поставленої задачі керування

Доведемо останнє твердження про перетин екстремалі та геометричного місця межових значень маршрутного графіка руху поїзда під кутом $\frac{\pi}{2}$, проілюстроване рис. 2.

Співвідношення (9) можна представити так: нехай дотична до екстремалі в точці з координатами (t_2, S_2) , що лежить на кривій $S = S(t)$, перетинає вісь $0t$ під кутом α , а дотична до геометричного місця можливих значень верхньої межевої точки графіка руху

$S = \varphi(t)$ перетинає вісь Ot під кутом β . Тоді, з огляду на геометричний зміст похідної, справедливі наступні співвідношення:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dS}{dt};$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{d\varphi}{dt}.$$

Тоді запишемо вираз (9) наступним чином:

$$\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta = -1. \quad (10)$$

Використаємо формулу добутку тангенсів в наслідок чого отримаємо за виразом (10) наступне:

$$\frac{\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)}{\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)} = -1. \quad (11)$$

Після аналітичних перетворень маємо:

$$2 \cdot \cos(\alpha - \beta) = 0, \quad (12)$$

або можна стверджувати, що

$$\cos(\alpha - \beta) = 0, \quad (13)$$

що еквівалентно рівності

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos \frac{\pi}{2}. \quad (14)$$

Тоді в кінцевому вигляді маємо

$$\alpha - \beta = \frac{\pi}{2}, \quad (15)$$

звідки запишемо наступне:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \beta, \quad (16)$$

що і треба було довести.

Результати дослідження.

1. Таким чином проведено математичну постановку процесу керування параметрами руху поїзда. Відповідно до основного геометричного місця координат руху поїзда, та оптимального функціоналу руху поїзда визначено математичну модель функціоналу, за яким визначається критерій раціональності зміни параметрів руху тягової одиниці.

2. На основі отриманих співвідношень можлива подальша побудова системи автовведення тягової одиниці на сонові алгоритмів самонавчання та стороннього навчання.

Висновки.

1. Виконання графіка руху конкретною одиницею рухомого складу відображає ступінь реалізації технології перевізного процесу та якості його роботи, забезпечує безпеку руху, більш ефективне використання рухомого складу, провізної і пропускної спроможності доріг, поліпшення обслуговування пасажирів і має важливе економічне і соціальне значення.

2. Математична формалізація процесу керування рухом на основі раціональних принципів керування дозволяє забезпечити чітке виконання руху, подолати відставання від нього. Це в свою чергу призводить до оптимізації витрат первинного енергоносія при русі тягової одиниці рухомого складу.

3. В подальшому дослідження математичної моделі для різних випадків побудови маршрутної карти руху поїзда дозволить конкретизувати алгоритми керування рухом для кожного типу завдання параметрів руху та в залежності від параметрів даного завдання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Інструкція зі складання графіка руху поїздів на залізницях України, затверджена наказом Укрзалізниці від 05.04.2002 № 170-Ц.

2. Інструкція про порядок надання і використання вікон у графіку руху поїздів для ремонтних і будівельних робіт на залізницях України, затверджена наказом Укрзалізниці від 13.03.2000 № 96-Ц.

3. Інструкція з оперативного планування поїзної і вантажної роботи на залізницях України, затверджена наказом Укрзалізниці від 15.12.2004 № 969-ЦЗ.
4. Інструкція з руху поїздів та маневрової роботи, затверджена наказом Міністерства транспорту України від 31.08.2005 № 507.
5. Інструкція з ведення графіка виконаного руху поїздів на залізницях і дирекціях залізничних перевезень, затверджена наказом Укрзалізниці від 17.12.2008 № 544-Ц.
6. Гетьман Г. К. Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств железнодорожного транспорта : монография / Г. К. Гетьман. – Днепропетровский нац. ун-т ж.-д. трансп. – Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп., 2008. – 444 С.
7. Осипов С. И. Основы тяги поездов / Осипов С. И., Осипов С. С. – М. : УМК МПС России, 2000. – 592 С.
8. Логвінова Н. О. Зменшення експлуатаційних витрат за допомогою енергооптимального руху поїздів / Н. О. Логвінова, Д. О. Босий, О. М. Полях // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2012. – Вип. 42. – С. 110-113.
9. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги : монография : в 2 т. / Г. К. Гетьман – Д. : Изд-во Маковецкий, 2011. – Т. 2. – 363 С.
10. Ябко И. А. Численный метод определения энергооптимального управления движением поезда / Ябко И. А. // Железнодорожный транспорт на новом этапе развития : М. : Интекст. – 2003. – С. 129-135.
11. Ванько В. И. Вариационное исчисление и оптимальное управление / В. И. Ванько, О. В. Ермошина, Г. Н. Кувыркин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 488 С.
12. Методы классической и современной теории управления в 5 томах. Том 4. Теория оптимизации систем автоматического управления / [Под ред. Егупова Н. Д., Пупкова К. А.]. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 744 С.
13. Lebedev L. P. The Calculus of Variations and Functional Analysis with Optimal Control and Applications in Mechanics / Lebedev L. P., Cloud M. J. – World Scientific, 2003. – 436 P.
14. Cassel Kevin W. Variational Methods with Applications in Science and Engineering / Cassel Kevin W. – Cambridge University Press, 2013. – 432 P.

Кулагин Д.А. Определение уравнения экстремалей маршрутной карты для управления параметрами движения тягового подвижного состава

Проведена математическая постановка способа определения геометрического места точек, определяющих экстремаль маршрутной карты движения тяговой единицы

подвижного состава, на основе которой возможно построение системы автоведения подвижного состава по определенным рациональным или оптимальным алгоритмам управления.

Ключевые слова: маршрутная карта движения, поезд, алгоритм, управления, трансверсальность, экстремаль, рациональный способ.

Kulagin D. O. Definition of equations of extremals route maps for control of parameters of traction rolling stock

The mathematical formulation of the method of determination of geometrical location of points defining extremal strip map of traction unit rolling stock on the basis of which it is possible to build automatic driving system of rolling stock on certain rational and optimal control algorithms. Mathematical formalization of the process of traffic control on the basis of rational management principles enables to ensure a clear implementation of the movement, to catch up with him. This in turn leads to cost optimization primary source of energy when driving traction units of rolling stock. Further study of mathematical models for different occasions build flowcharts of train traffic will allow to Refine the algorithms of motion control for each job type of motion parameters and depending on the parameters of this task.

Keywords: map route traffic, train, algorithm, control, transversality, extremal, rational way.

REFERENCES

1. Instrukcija zi skladannja grafika ruhu pojizdiv na zaliznicjah Ukrajini, zatverdzhena nakazom Ukrzaliznici vid 05.04.2002 № 170-C.
2. Instrukcija pro porjadok nadannja i vikoristannja vikon u grafiku ruhu pojizdiv dlja remontnih i budivel'nih robit na zaliznicjah Ukrajini, zatverdzhena nakazom Ukrzaliznici vid 13.03.2000 № 96-C.
3. Instrukcija z operativnogo planuvannja pojiznoji i vantazhnoji roboti na zaliznicjah Ukrajini, zatverdzhena nakazom Ukrzaliznici vid 15.12.2004 № 969-CZ.
4. Instrukcija z ruhu pojizdiv ta manevrovoji roboti, zatverdzhena nakazom Ministerstva transportu Ukrajini vid 31.08.2005 № 507.
5. Instrukcija z vedennja grafika vikonanogo ruhu pojizdiv na zaliznicjah i direkciyah zaliznichnih perevezen', zatverdzhena nakazom Ukrzaliznici vid 17.12.2008 № 544-C.
6. Get'man G. K. Nauchnye osnovy opredelenija racional'nogo moshhnostnogo rjada tjagovyh sredstv zheleznodorozhnogo transporta : monografija / G. K. Get'man. – Dnepropetrovskij nac. un-t zh.-d. transp. – D. : Vid-vo Dnipropetr. nac. un-tu zalizn. transp., 2008. – 444 S.

7. Osipov S. I. Osnovy tjagi poezdov / Osipov S. I., Osipov S. S. – M. : UMK MPS Rossii, 2000. – 592 S.
8. Logvinova N. O. Zmshennja ekspluatacijnih vitrat za dopomoguju energooptimal'nogo ruhu pojizdiv / N. O. Logvinova, D. O. Bosij, O. M. Poljah // Visn. Dnipropetr. nac. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazarjana. – 2012. – Vip. 42. – S. 110-113.
9. Get'man G. K. Teorija jelektricheskoj tjagi : monografija : v 2 t. / G. K. Get'man – D. : Izd-vo Makoveckij, 2011. – T. 2. – 363 S.
10. Jabko I. A. Chislennyj metod opredelenija jenergooptimal'nogo upravljenja dvizheniem poezda / Jabko I. A. // Zheleznodorozhnyj transport na novom jetape razvitija : M. : Intekst. – 2003. – S. 129-135.
11. Van'ko V. I. Variacionnoe ischislenie i optimal'noe upravljenje / V. I. Van'ko, O. V. Ermoshina, G. N. Kuvyrkin. – M. : Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2006. – 488 C.
12. Metody klassicheskoj i sovrkemennoj teorii upravljenja v 5 tomah. Tom 4. Teorija optimizacii sistem avtomaticheskogo upravljenja / [Pod red. Egupova N. D., Pupkova K. A.]. – M. : MGTU im. N. Je. Baumana, 2004. – 744 S.
13. Lebedev L. P. The Calculus of Variations and Functional Analysis with Optimal Control and Applications in Mechanics / Lebedev L. P., Cloud M. J. – World Scientific, 2003. – 436 P.
14. Cassel Kevin W. Variational Methods with Applications in Science and Engineering / Cassel Kevin W. – Cambridge University Press, 2013. – 432 P.