

Програмування стану механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.075>

Владислав Поляков

Інститут транспортних систем і технологій НАН України
м. Дніпро, Україна

Анотація—Розроблено методику програмування стану механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда в його експлуатаційних режимах.

Ключові слова—магнітолевітуючий поїзд; механічна підсистема; розрахункова схема; фазовий простір; фазові координати; зображуюча точка стану.

I. ВСТУП

Результати теоретико-експериментальних досліджень у галузі перспективних наземних транспортних технологій [1] свідчать про практичну неможливість подальшого суттєвого нарощування їх інтенсивності без переходу на безконтактні системи підвищення, спрямування та руху екіпажів. Дуже перспективною [2, 3] виявилася реалізація цих систем, з використанням електромагнітного поля, у складі магнітолевітуючих поїздів.

II. ТИП КЕРУВАННЯ РУХОМ

Рух кожного такого поїзда, маючи основною своєю задачею переміщення пасажирів і вантажів, при реалізації регламентується графіком руху, що вимагає приведення його об'єкта до призначених моментів часу, або точок путі в апіорно задану послідовність станів. Тому керування цим рухом досить коректно і повно може здійснюватися в термінальній постановці [4] з накладенням реальних обмежень на простори фазових координат, збурень та керувань. Залежно від цілей та задач дослідження, ці множини можуть бути по-різному фізично інтерпретовані. У той самий час, у принциповому плані, керування практично будь-яким реальним рухом магнітолевітуючого поїзда може розглядатися як термінальне і, отже, синтезуватися як таке.

Шляхом класифікації та параметризації обстановки, в якій відбувається рух механічної підсистеми поїзда [5], а також побудови для кожної типової ситуації оптимального, у необхідному сенсі, керування цим рухом, може бути вирішена задача синтезу абстрактного розімкнутого [6] термінального цілеспрямованого його примусу. Однак на практиці при розробці конструктивних систем такого примусу неминуче виникає проблема необхідності одночасного задоволення сукупності інженерних вимог, які пред'являються до якості зазначеного руху. Одним з засобів побудови оптимального керування у цьому випадку є запровадження векторних критеріїв, кожен із яких, у свою чергу, складається з низки вторинних

критеріїв, яким одночасно має задовольняти рух механічної підсистеми поїзда.

Аналіз викладеного свідчить про двоїстість керування, яке синтезоване виходячи з концепції гарантованого результату, і тому, у кожному режимі руху поїзда, оптимальне за деяким, у загальному випадку, векторним критерієм якості. З одного боку, таке керування, безсумнівно, має вищу якість, принаймні щодо зазначеного критерію, порівняно з примусом, синтезованим у виключно термінальній постановці. Однак, з іншого боку, побудова такого оптимального керування вимагає багаторазового, поєданого з процесом руху, оперативного вирішення ігрової мінімаксної задачі. Це, посилаючись, у загальному випадку, векторністю мінімізованого функціоналу і необхідністю вирішення підпорядкованої задачі ідентифікації об'єкта руху, пред'являє дуже високі вимоги до обчислювального, а також інших пристроїв регулятора, який здійснює синтез шуканого керування. Тому остаточне рішення щодо найбільш прийняттого, у кожній конкретній ситуації, типу стратегії формування примусового впливу на рух має прийматися з обов'язковим врахуванням реальних обмежень на характеристики керуючого пристрою, які визначаються, з одного боку, рівнем обов'язкових вимог до якості цього руху і, з іншого боку, технічними, економічними, а також іншими ресурсами, які можливо і доцільно витратити на створення цього пристрою.

III. МІСЦЕ РОЗТАШУВАННЯ РЕГУЛЯТОРА

Залежно від місця розташування регулятора, системи керування рухом поїзда поділяються [7] на стаціонарні та бортові. Стаціонарні системи мають такі привабливі властивості, як менша критичність до енергоспоживання, обчислювальної потужності керуючого комп'ютера, габаритів і ваги, більш легкі умови експлуатації (зниження рівня перешкод і збурень, менш гострий дефіцит оперативної інформації) та деякі інші (менш значущі). У той самий час, бортові системи, своєю чергою, мають підвищену автономність, набагато меншу інерційність і вищу точність, а також низку інших принципових переваг [8]. Завдяки цим властивостям, бортові системи, у багатьох випадках, очевидно, більш прийнятні у якості термінальних для керування рухом магнітолевітуючих поїздів. Виходячи з цього, у подальшому викладі можливі підходи до вирішення задачі синтезу термінального

керування зазначеним рухом конкретизуються стосовно систем бортового типу.

IV. ОБМЕЖЕННЯ КЕРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ

При синтезі бортової термінальної системи керування рухом механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда, з метою зниження вимог щодо її надійності, ваги і так далі, доцільним є накладення деяких додаткових обмежень на свободу вибору керуючого пристрою. Практична прийнятність результатів згаданого синтезу значною мірою, очевидно, залежить від способу формалізації цих обмежень. Для бортових термінальних систем, у якості додаткових, найбільш зручними виявилися [9] обмеження по структурі системи, які визначаються, як правило, необхідною ємністю оперативної та довготривалої пам'яті керуючого пристрою, а також видом операцій, що ним реалізуються. Із загальної теорії керування випливає, що зменшення необхідної ємності оперативної пам'яті вимагає зниження кількості інформації, що переробляється регулятором при формуванні керуючого впливу. Ефективним же засобом обмеження необхідної ємності довгострокової пам'яті є скорочення загальної кількості змін параметрів алгоритму керування за весь час руху [9]. Нарешті, доцільним є прийняття, у якості допустимого типу операцій, що реалізуються згаданим керуючим пристроєм, арифметичних операцій, кількість яких заздалегідь обмежена.

V. ВИХІДНА ПОСТАНОВКА СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРА

Результати аналізу викладених міркувань з імплементації бортових термінальних систем керування рухом механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда свідчать про те, що спрямовані на таку імплементацію перспективні розробки повинні базуватися на багатовимірних розрахункових схемах об'єктів руху, які найбільш можливо більш точно відображають їхню структурно-функціональну організацію, а також ігрових мінімаксних методах синтезу такого руху, що гарантують його оптимальність по відношенню до критеріїв якості, що вводяться в широкому діапазоні режимів і цілей. У той же час, необхідність врахування наведених доцільних обмежень структури регуляторів, які використовуються, а також наявних технічних можливостей і економічної доцільності їх створення в сучасних умовах призводять до висновку про раціональність синтезу вихідної версії таких регуляторів у виключно термінальній постановці, виходячи з одномасової розрахункової схеми механічної підсистеми поїзда. Один із можливих підходів до вирішення задачі такого синтезу, ініційований викладеними міркуваннями, описаний нижче.

VI. МОДЕЛЮВАННЯ РУХА ПОЇЗДА

Для вивчення лише поздовжнього руху механічної підсистеми поїзда, в якості її розрахункової схеми приймемо матеріальну точку C , яка розташована, наприклад, у його голові і має масу m . Будь-який фізично реалізований керований рух цієї точки може, з використанням другого закону Ньютона, бути описаний рівнянням

$$m \cdot \ddot{\eta}(t) = F_n + F_c, \quad (1)$$

де $\eta(t)$ – відстань, яка пройдена точкою від початку спостереження вздовж кривої, паралельно зсунутої відносно осі путі, під впливом проекції на дотичну до згаданої кривої рівнодіючої природних збуджуючих F_n і керуючих F_c сил.

ПРОГРАМУВАННЯ СТАНУ МЕХАНІЧНОЇ ПІДСИСТЕМИ

При цьому рух зображуючої точки стану механічної підсистеми, яка розглядається, цілком конструктивно може бути представлений його програмою, складеною щодо узагальненої координати η [10] і відображає рух моделюючої точки C . Фізична сутність процесу, що розглядається, така, що закон $\ddot{\eta}(t)$ завжди є безперервною дійсною функцією свого аргументу. Тому, згідно з теоремою Вейерштрасса про рівномірне наближення безперервної функції багаточленами [11], згадана програма руху точки C може бути прийнята у вигляді

$$\ddot{\eta}(t) = E_i \cdot t^{(i)} \cdot e^i \forall i \in [0, j], \quad (2)$$

де $E_i \forall i \in [0, j]$ – коефіцієнти апроксимаційного полінома, що підлягають визначенню;

$e^i = [1, 1, \dots, 1]^T \forall i \in [0, j]$ – одинична матриця-стовпець.

Значення $E_i \forall i \in [0, j]$ мають бути визначені з крайових умов руху на його термінальному інтервалі $[t_s, t_f]$. Тому, для забезпечення однозначності цього визначення, в (2) приймемо

$$j = \rho + n - 1, \quad (3)$$

де $\rho = 2$ – прийнята розмірність фазового простору аналізованої підсистеми;

n – число обмежень, що накладаються на її кінцевий стан.

В реальних умовах експлуатації механічної підсистеми поїзда $n \in [0, 2]$. Тобто, протягом термінального проміжку часу $\tau = t_f - t_s$, може знадобитися забезпечити задану зміну координати, швидкості та прискорення об'єкта руху від значень $\eta_s, \dot{\eta}_s, \ddot{\eta}_s$ до значень $\eta_f, \dot{\eta}_f, \ddot{\eta}_f$. При $n = 2$, згідно з (3), $j = 3$ і, в записі для термінального моменту $t = t_f$, розгорнута форма виразу (2) набуває вигляду

$$\ddot{\eta}_f = E_0 + E_1 \cdot \tau + E_2 \cdot \tau^{(2)}. \quad (4)$$

Послідовно інтегруючи останній вираз за часом, для того ж моменту $t = t_f$ отримуємо

$$\dot{\eta}_f = \dot{\eta}_s + E_0 \cdot \tau + E_1 \cdot \frac{\tau^{(2)}}{2} + E_2 \cdot \frac{\tau^{(3)}}{3};$$

$$\eta_f = \eta_s + \dot{\eta}_s \cdot \tau + E_0 \cdot \frac{\tau^{(2)}}{2} + E_1 \cdot \frac{\tau^{(3)}}{6} + E_2 \cdot \frac{\tau^{(4)}}{12}. \quad (5)$$

З рішення системи рівнянь (4) та (5), вирази для визначення значень шуканих коефіцієнтів E_0, E_1, E_2 можуть бути отримані у вигляді

$$E_0 = -\frac{12}{\tau^{(2)}} \cdot (\eta_s - \eta_f) - \frac{6}{\tau} \cdot (\dot{\eta}_s + \dot{\eta}_f) + \ddot{\eta}_f;$$

$$E_1 = \frac{48}{\tau^{(3)}} \cdot (\eta_s - \eta_f) + \frac{1}{\tau^{(2)}} \cdot (18 \cdot \dot{\eta}_s + 30 \cdot \dot{\eta}_f) - \frac{6}{\tau} \cdot \ddot{\eta}_f;$$

$$E_2 = -\frac{36}{\tau^{(4)}} \cdot (\eta_s - \eta_f) - \frac{12}{\tau^{(3)}} \cdot (\dot{\eta}_s + 2 \cdot \dot{\eta}_f) + \frac{6}{\tau^{(2)}} \cdot \ddot{\eta}_f. \quad (6)$$

Підстановкою у них значень $\tau, \eta_s, \eta_f, \dot{\eta}_s, \dot{\eta}_f$, а також $\ddot{\eta}_f$, необхідних на кожному з термінальних інтервалів руху підсистеми, можуть бути отримані і конкретні чисельні значення цих аппроксимаційних коефіцієнтів.

Необхідні програми зміни фазових координат зображуючої точки стану механічної підсистеми поїзда на термінальному інтервалі τ можуть бути отримані з виразів (5) шляхом заміни в них значення цього інтервалу значенням поточного часу t . Ці програми мають вигляд

$$\dot{\eta}(t) = \dot{\eta}_s + E_0 \cdot t + E_1 \cdot \frac{t^{(2)}}{2} + E_2 \cdot \frac{t^{(3)}}{3};$$

$$\eta(t) = \eta_s + \dot{\eta}_s \cdot t + E_0 \cdot \frac{t^{(2)}}{2} + E_1 \cdot \frac{t^{(3)}}{6} + E_2 \cdot \frac{t^{(4)}}{12}. \quad (7)$$

З використанням цих співвідношень, можуть будуватися як програмні фазові траєкторії руху зазначеної зображуючої точки, так і графіки функціональних залежностей від часу її програмних фазової координати і швидкості. Тому рівності (7), що визначають алгоритм керування станом

досліджуваної підсистеми, були прийняті як алгоритмічна основа програмного комплексу, який реалізує таку побудову. Елементи комплексу програмно фіксовані на вхідній мові системи комп'ютерної математики Mathematica та поділяються на “розрахункову” та “графічну” частини. Перша з цих частин виконує необхідні розрахунки, а друга – перетворює їхні результати в графічну форму.

Аналіз отриманих результатів побудови програмних термінальних рухів механічної підсистеми поїзда дозволяє зробити висновок про те, що, з використанням розробленої методики, така побудова успішно здійснена у випадках, що відповідають різним експлуатаційним режимам.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] J. Gou, “Development Status and Global Competition Trends Analysis of Maglev Transportation Technology Based on Patent Data,” *Urban Rail Transit*, vol. 4, 2018, pp. 117–129. <https://doi.org/10.1007/s40864-018-0087-3>.
- [2] L. Zhendong, S. Stichel, and M. Berg, “Overview of technology and development of maglev and hyperloop systems,” Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2022.
- [3] K. Nagashima, and T. Sasakawa, “Research and Development of Maglev and Application of Related Technologies to Conventional Railways,” *QR of RTRI*, vol. 62(3), 2021, pp. 163–166.
- [4] R.E. Bellman, “Adaptive control processes,” New Jersey: Princ. Univ. Press, 1961.
- [5] Поляков В. А. Приспособляемость движения железнодорожного поезда. Динамика поезда и подвижного состава железных дорог: межвуз. сб. научн. тр. Днепропетровск: ДИИТ, 1990. С. 107–117.
- [6] Блохин Е. П., Поляков В. А. Целенаправленное движение железнодорожного поезда. Нагруженность и надежность механических систем: сб. научн. тр. Киев: Наук. думка, 1987. С. 76–83.
- [7] Ерофеев Е. В. Принципы построения систем автоведения поездов метрополитена и пассажирских поездов при электрической тяге: автореф. дис. ... докт. техн. наук / Е. В. Ерофеев – Москва, 1985. 42 с.
- [8] Петров Б. Н., Портнов-Соколов Ю. П., Андриенко А. Я., Иванов В. П. Бортовые терминальные системы управления: Принципы построения и элементы теории. Москва: Машиностроение, 1983. 200 с.
- [9] Ротач В. Я. Теория автоматического управления. Москва: Изд-во МЭИ, 2004. 400 с.
- [10] Корнев Г. В. Очерки механики целенаправленного движения. Москва: Наука, 1980. 192 с.
- [11] Ильин В. А., Садовничий В. А., Сендов Бл. Х. Математический анализ. Продолжение курса. Под ред. А. Н. Тихонова. Москва: Изд-во МГУ, 1987. 358 с.