

V.O. ПОЛЯКОВ, С.Ю. ПОСЛАВСЬКИЙ
Інститут транспортних систем і технологій НАН України

БАЖАНІ АТРАКТОРИ ЗОБРАЖУЮЧОЇ ТОЧКИ СТАНУ ЯК ПАТЕРНИ ПОБУДУВАННЯ ПОЗДОВЖНЬОГО РУХУ МЕХАНІЧНОЇ ПІДСИСТЕМИ МАГНІТОЛЕВІТУЮЧОГО ПОЇЗДА

Якість руху механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда є одним з основних критеріїв, що визначають споживчі властивості транспортного комплексу, до складу якого такий поїзд включено. Практична імплементація цієї якості обмежена: з одного боку, необхідністю задовольняти вимоги перевізного процесу, з іншого – неприпустимістю витратити на неї надмірні узагальнені ресурси. Задля уникнення цієї колізії для кожного типового експлуатаційного та аварійного режиму повинен бути апріорно сформований раціональний патерн бажаної динаміки, якому її натурна реалізація повинна найбільш точно слідувати.

Метою дослідження є виявлення зазначеного патерну і з його використанням створення методики побудови бажаних поздовжніх рухів механічної підсистеми поїзда.

Як репрезентативний носій будь-якого з можливих рухів динамічної системи з успіхом може бути використаний аттрактор, який повно і синтетично відображає усі його властивості. Якщо система є керованою, синтез таких рухів стає можливим виходячи із властивостей аттрактора.

У силу обмеженості динамічної достатності підсистеми бажана еталонна фазова траєкторія може залишитися недосяжною. Із цієї причини кожен зі згаданих патернів доцільно призначати у вигляді не відокремленої фазової траєкторії, а їх сімейства, яке утворює «трубку» еталонних рухів.

Процес синтезу руху інтерпретується як двоетапний: примусове переведення зображуючої точки з початкового її положення на аттрактор; подальший рух уздовж нього. На обох цих етапах підсистема під впливом накладеного керування повинна протягом часу, що задається, переходити з початкового фазового стану в необхідний кінцевий. Тому на обох цих етапах зазначене керування раціонально будувати згідно з термінальними принципами, а патерни рухів, а також переходи на них, – згідно з методикою, яка була розроблена одним із авторів дослідження.

Співвідношення, що реалізують синтезовану методичку, були прийняті як алгоритмічна основа програмного комплексу, який здійснює побудову бажаних поздовжніх рухів підсистеми. Побудову здійснено для параметрів поїзда, який складений з японських магнітолевітуючих вагонів MLU-002. Ілюстративні результати відповідають рухам у режимах рушіння, розгону, службового та екстреного гальмування. Аналіз цих результатів свідчить про те, що з використанням розробленої методики побудова руху механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда, виходячи з необхідного аттрактора зображуючої точки її стану, успішно здійсненна у випадках, що відповідають усім його реальним експлуатаційним режимам.

Ключові слова: магнітолевітуючий поїзд, механічна підсистема, якість руху, побудова руху, зображуюча точка стану, аттрактор, експлуатаційні режими руху.

V.O. POLYAKOV, S.YU. POSLAVSKY
Ukraine's National Academy's of Sciences Institute
of Transport Systems and Technologies

DESIRABLE ATTRACTORS OF THE STATE'S REPRESENTATIVE POINT AS A PATTERNS FOR A MAGNETOLEVITATION TRAIN'S MECHANICAL SUBSYSTEM'S LONGITUDINAL MOTION CONSTRUCTING

The quality of a magnetically levitated train's mechanical subsystem's motion is one of the main criteria that determine the consumer properties of the transport complex, which includes such a train. The practical implementation of this quality is limited: on the one hand, by the need to meet the requirements of the transportation process, and, on the other, by the inadmissibility of spending excessive generalized resources on it. To avoid this collision, for each typical operational and emergency mode, a rational pattern of desired dynamics must be formed a priori, which its in-kind implementation must follow as accurately as possible.

The aim of the study was to identify the specified pattern and, using it, create a methodology for constructing the desired longitudinal motions of the train's mechanical subsystem.

An attractor, that fully and synthetically reflects all of a dynamic system's properties, can be successfully used as a representative carrier of any of its possible movements. If the system is controllable, the synthesis of such movements becomes possible based on the properties of the attractor.

Due to the limited dynamic sufficiency of the subsystem, the desired reference phase trajectory may remain unattainable. For this, in particular, reason it is advisable to designate each of the aforementioned patterns not as a separate phase trajectory, but as their family, which forms a «tube» of reference motions.

The process of motion synthesis is interpreted as two-stage: forced transfer of the representing point from its initial position to the attractor; further motion along it. At both of these stages, the subsystem, under the influence of the imposed control, must, within a given time, transition from the initial phase state to the required final state. Therefore, at both stages, the specified control should be rationally constructed according to terminal principles. Motion patterns, as well as transitions to them, should be rationally constructed according to the methodology developed by one of the study's authors.

The relations, that implement the synthesized methodology, were accepted as the algorithmic basis of the software complex which carry out the construction of the desired longitudinal motions of the subsystem. The constructions were carried out for the parameters of a train, which is composed of Japanese MLU-002 magnetic levitation cars. The illustrative results correspond to movements in the modes of starting, acceleration, service and emergency braking. The analysis of the obtained results indicates that, using the developed methodology, the construction of a magnetically levitated train's mechanical subsystem's desired motions, based on its state's representative point's corresponding attractors, can be successfully implemented in cases that correspond to all operating modes.

Key words: magnetically levitated train, mechanical subsystem, motion quality, motion construction, state representation point, attractor, operational modes of motion.

Постановка проблеми

Якість руху механічної підсистеми (МП) магнітолевітуючого поїзда (МЛП) є одним з основних критеріїв, що визначають споживчі властивості транспортного комплексу, до складу якого такий поїзд включено. Водночас імплементація цієї якості амбівалентно обмежена природними причинами: з одного боку, вона має бути достатньо високою, щоб задовольняти вимоги перевізного процесу, з іншого – таке підвищення не повинно вимагати надмірних витрат узагальнених капітальних та експлуатаційних ресурсів. Задля уникнення цієї колізії для кожного типового експлуатаційного, а також аварійного режиму повинен бути апріорно сформований раціональний патерн бажаної динаміки підсистеми поїзда, що розглядається, якому з урахуванням адаптації до обстановки натурна реалізація руху повинна слідувати.

Формування кожного з таких патернів є комплексною проблемою, ключовими етапами вирішення якої є:

- ідентифікація та аналіз передбачуваних експлуатаційних та аварійних режимів функціонування;
- системне, а також імітаційне прогнозує моделювання таких режимів із метою тестування різних сценаріїв та виявлення шуканих раціональних або оптимальних динамічних патернів;
- попереднє розроблення алгоритмів керування, що сприяють мінімізації відхилень від таких патернів, у тому числі за рахунок структурної та алгоритмічної адаптації до ситуації руху;
- превентивний аналіз ризиків із метою виявлення потенційних аварійних ситуацій та їхніх можливих наслідків;
- розроблення планів ліквідації аварій, включаючи алгоритми швидкого реагування та відновлення підсистеми;
- реалізація пілотних проєктів із тестування в реальних експлуатаційних умовах, а також збору інформації зворотного зв'язку від операторів із метою коригування патернів, що розробляються;
- регулярне навчання операторів раціональним методам роботи з патернами у передбачуваних штатних та позаштатних експлуатаційних ситуаціях.

Сучасний стан досліджень із проблеми

Авторам поки що не відомі дослідження, які б стосувалися побудови рухів МП МЛП у просторах їхніх станів.

Мета дослідження

Одним з основних шляхів підвищення якості дослідження динамічної системи, який дає змогу суттєво раціоналізувати цей процес, є формалізація шляхом уведення носія розгляданого руху, здатного його холистично представляти. Актуальність знаходження такого носія посилюється, зокрема, тим, що зазвичай має місце вимушена обмеженість натурних спостережень, яка не дає змоги будувати інтегральний многовид підсистеми. Це стосується як природних, так і конструйованих шляхом керування ними цілеспрямованих рухів. Тому метою дослідження є виявлення вказаного носія і з його використанням створення методики побудови бажаних поздовжніх рухів МП МЛП.

Виклад основного матеріалу дослідження

Як репрезентативний носій будь-якого з можливих рухів динамічної системи з успіхом може бути використаний атрактор [1; 2], який повно і синтетично відображає усі його властивості. У разі коли система є керованою, ці рухи визначаються властивостями системи: її структурою і параметрами елементів, початковими та граничними умовами рухів, природними збуреннями, а також прикладеними керуваннями. Тому синтез руху такої системи у кожному конкретному випадку стає можливим виходячи з його бажаного, у відповідному режимі та обстановці, патерну. Однак точна його реалізація, цілком можливо, може вимагати занадто великих необхідних для цього керувань. Ба більше, навіть якщо необхідне керування вдається точно відтворити регулятором, то в силу обмеженості динамічної достатності підсистеми бажана еталонна фазова траєкторія може все ж залишатися недосяжною. Така невідповідність має об'єктивний характер і є наслідком природної нестаціонарності об'єкта керування. Із цієї причини кожен зі згаданих патернів доцільно призначати у вигляді не відокремленої фазової траєкторії, а їхнього сімейства, яке утворює «трубку» еталонних рухів [3; 4]. Кожна з траєкторій, з яких складається така «трубка», аналітично або чисельно може бути задана шляхом виключення аргументу часу зі співвідношень, що визначають бажані закони зміни фазових координат. Далі, задана, таким чином, траєкторія вважається такою, що належить ансамблю, який є згаданим атрактором зображуючої точки стану системи і до якого її рух має прагнути. При цьому процес синтезу руху інтерпретується як двоетапний:

- примусове переведення зображуючої точки з початкового її положення на атрактор;
- подальший рух уздовж нього.

За необхідності до руху на різних етапах його побудови можуть пред'являтися різні вимоги. Однак якщо такі фундаментальні властивості, як:

- асимптотична стійкість загалом чи принаймні у потрібній області фазового простору;
- автономність;
- заданий час протікання та характер загасання перехідних процесів,

підсистема повинна мати інваріантно – на будь-якому етапі побудови руху, то деякі інші властивості специфічні та особливо бажані лише на окремих фазах зазначеної побудови – залежно від їхніх особливостей. Так, на етапі, коли зображуюча точка стану належить атрактору, її рух може відбуватися неминуче досить довго і вимагати для своєї реалізації витрати значних ресурсів. На цьому етапі рух, як правило, бажано оптимізувати за критеріями енергетичної економічності, ексклюзивної безпеки, швидкоплинності або будь-якими іншими, які є особливо критичними для режиму, що розглядається, у поточній обстановці. Водночас процес руху зображуючої точки з вихідного положення до атрактора повинен бути за можливості досить швидкоплинним, і основною специфічною є вимога плавності і «безударності» протікання процесів.

Із викладеного випливає, що на обох етапах – до попадання зображуючої точки стану на атрактор і після цього – підсистема під впливом накладеного керування повинна протягом часу, що задається, переходити з початкового фазового стану в необхідний кінцевий. Тому на обох етапах зазначене керування раціонально будувати згідно з термінальними принципами [5; 6].

Патерни руху слід формувати, виходячи з такого. Обстановка руху може змінюватися загалом непередбачувано. Вона може бути класифікована за принципом дихотомії у вигляді вкладених рівнів класів. Натурне впізнання будь-якого з них можна здійснити за відповідним набором значень, доступних для спостереження, однозначно його ідентифікуючих параметрів і вимагає виконання відносно невеликого обсягу додаткових операцій. Під час створення регулятора кожного класу α очікуваної обстановки у відповідність можуть бути поставлені й зафіксовані в програмному запам'ятовуючому пристрої регулятора (ПЗУ) необхідні (у цьому класі): фазові траєкторії зображуючої точки стану $\{\eta_\alpha^p(\bullet), \dot{\eta}_\alpha^p(\bullet)\}$ – патерн, якому рух повинен прагнути слідувати; потрібні (такі, що гарантовано стабілізують цей патерн) програмні керування $f_\alpha^p(\bullet)$. Тоді під час руху після впізнання реалізованого класу α обстановки та зчитування з ПЗУ відповідних йому $\{\eta_\alpha^p(\bullet), \dot{\eta}_\alpha^p(\bullet)\}$ та $f_\alpha^p(\bullet)$ згаданий патерн стає доступним для використання.

Отже, для найкращої відповідності своєму призначенню, окрім широкого, точного та оперативного доступу до оперативних відомостей про поточну обстановку руху, програмний рівень регулятора повинен мати якомога повніший набір законів $\{\eta_\alpha^p(t), \dot{\eta}_\alpha^p(t)\}$ і $f_\alpha^p(t)$, де t – змінна часу, а також, безумовно, розвинений пошуковий модуль, який дає змогу ефективно здійснювати відображення виду

$$M : T \rightarrow F; \quad T = \{\eta_\alpha^p(\bullet), \dot{\eta}_\alpha^p\}; \quad F = \{f_\alpha^p(\bullet)\}, \quad (1)$$

де T, F – множини бажаних у різних обстановках рухів фазових траєкторій зображуючої точки стану підсистеми, а також програмних керувань, які необхідні для реалізації цих траєкторій;

M – оператор відображення, що діє з TCF .

Тут скрізь будь-яка функція з точкою на місці аргументу передбачає сукупність її (функції) значень за всіх допустимих значень такого аргументу. Однією з доцільних форм організації зазначеного відображення може бути розміщення в пам'яті описуваного рівня регулятора словника «траєкторія – керування», виділення якого у вигляді окремого блоку дасть змогу спростити логічну структуру алгоритму, а також достатньо просто змінювати і нарощувати правила реагування в процесі обробки інформації.

У процесі формування патернів руху фазові траєкторії зображуючої точки стану підсистеми доцільно будувати згідно з методикою, розробленою у [7]. Тоді зміни фазових координат цієї точки залежно від часу можуть бути описані виразами:

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_\alpha^p(t) &= \dot{\eta}_{\alpha s}^p + E_0^p \cdot t + E_1^p \cdot \frac{t^{(2)}}{2} + E_2^p \cdot \frac{t^{(3)}}{3}; \\ \eta_\alpha^p(t) &= \eta_{\alpha s}^p + \dot{\eta}_{\alpha s}^p \cdot t + E_0^p \cdot \frac{t^{(2)}}{2} + E_1^p \cdot \frac{t^{(3)}}{6} + E_2^p \cdot \frac{t^{(4)}}{12}, \end{aligned} \quad (2)$$

у яких, своєю чергою, значення коефіцієнтів E_0^p, E_1^p, E_2^p визначаються відповідно до співвідношень:

$$\begin{aligned} E_0^p &= -\frac{12}{\tau_p^{(2)}} \cdot (\eta_{\alpha s}^p - \eta_{\alpha f}^p) - \frac{6}{\tau_p} \cdot (\dot{\eta}_{\alpha s}^p + \dot{\eta}_{\alpha f}^p) + \ddot{\eta}_{\alpha f}^p; \\ E_1^p &= \frac{48}{\tau_p^{(3)}} \cdot (\eta_{\alpha s}^p - \eta_{\alpha f}^p) + \frac{1}{\tau_p^{(2)}} \cdot (18 \cdot \dot{\eta}_{\alpha s}^p + 30 \cdot \dot{\eta}_{\alpha f}^p) - \frac{6}{\tau_p} \cdot \ddot{\eta}_{\alpha f}^p; \\ E_2^p &= -\frac{36}{\tau_p^{(4)}} \cdot (\eta_{\alpha s}^p - \eta_{\alpha f}^p) - \frac{12}{\tau_p^{(3)}} \cdot (\dot{\eta}_{\alpha s}^p + 2 \cdot \dot{\eta}_{\alpha f}^p) + \frac{6}{\tau_p^{(2)}} \cdot \ddot{\eta}_{\alpha f}^p. \end{aligned} \quad (3)$$

У виразах (2) та (3) уведено позначення:

τ_p – термінальний проміжок часу, на якому будується патерн руху;

$\eta_{\alpha s}^p, \dot{\eta}_{\alpha s}^p; \eta_{\alpha f}^p, \dot{\eta}_{\alpha f}^p$ – значення фазових координат зображуючої точки стану підсистеми в крайових точках побудови патерну, створюваного для α –> обстановки руху;

$\ddot{\eta}_{\alpha f}^p$ – бажане прискорення центру мас підсистеми після закінчення реалізації цього патерну.

Згідно з тією ж методикою, можуть будуватися і рухи підсистеми в режимах переходу зображуючої точки її стану на кожен з атракторів. Специфіка таких перехідних режимів, як зазначено, полягає, з одного боку, в їхній швидкоплинності, а з іншого – у дуже бажаній плавності та «безударності». Такі якості перехідних процесів, очевидно, з успіхом можуть бути забезпечені шляхом коректного завдання необхідних для цього значень їхніх термінальних проміжків і граничних умов. Виходячи із цього, поведінка фазових координат зображуючої точки в кожному із зазначених перехідних режимів може бути описана співвідношеннями, аналогічними (2) і (3):

$$\begin{aligned} \dot{\eta}^i(t) &= \dot{\eta}_s^i + E_0^i \cdot t + E_1^i \cdot \frac{t^{(2)}}{2} + E_2^i \cdot \frac{t^{(3)}}{3}; \\ \eta^i(t) &= \eta_s^i + \dot{\eta}_s^i \cdot t + E_0^i \cdot \frac{t^{(2)}}{2} + E_1^i \cdot \frac{t^{(3)}}{6} + E_2^i \cdot \frac{t^{(4)}}{12}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} E_0^i &= -\frac{12}{\tau_i^{(2)}} \cdot (\eta_s^i - \eta_f^i) - \frac{6}{\tau_i} \cdot (\dot{\eta}_s^i + \dot{\eta}_f^i) + \ddot{\eta}_f^i; \\ E_1^i &= \frac{48}{\tau_i^{(3)}} \cdot (\eta_s^i - \eta_f^i) + \frac{1}{\tau_i^{(2)}} \cdot (18 \cdot \dot{\eta}_s^i + 30 \cdot \dot{\eta}_f^i) - \frac{6}{\tau_i} \cdot \ddot{\eta}_f^i; \\ E_2^i &= -\frac{36}{\tau_i^{(4)}} \cdot (\eta_s^i - \eta_f^i) - \frac{12}{\tau_i^{(3)}} \cdot (\dot{\eta}_s^i + 2 \cdot \dot{\eta}_f^i) + \frac{6}{\tau_i^{(2)}} \cdot \ddot{\eta}_f^i. \end{aligned} \quad (5)$$

У виразах (4) та (5) додатково позначено:

τ_i – термінальний проміжок часу, протягом якого зображуюча точка стану підсистеми переходить із вихідного положення, з якого починається побудова руху, на атрактор;

$\eta_s^i, \dot{\eta}_s^i; \eta_f^i, \dot{\eta}_f^i$ – значення фазових координат зображуючої точки стану підсистеми в крайових точках переходу на атрактор;

$\ddot{\eta}_f^i$ – бажане прискорення центру мас підсистеми після закінчення переходу на атрактор.

Важливою характеристикою кожного атрактора є його басейн тяжіння. У контексті аналізованої проблеми, це – множина початкових положень зображуючої точки стану підсистеми, які за рахунок її динаміки сходяться до цього атрактора. Для хорошої керованості підсистеми басейни тяжіння створюваних атракторів повинні бути в деякому сенсі великими. Загалом такі басейни можуть бути досить складними множинами, опис яких є нетривіальним завданням. Ці інтуїтивні міркування формалізовані шляхом уведення способів кількісної оцінки характеристик згаданих басейнів. Запропоновано, наприклад, підходи, що дають змогу оцінювати:

– басейнову стійкість [8], що характеризує обсяг басейну тяжіння у фазовому просторі;

– поріг стійкості [9], що визначає найкоротшу відстань від атрактора до межі такого басейну.

У процесі побудови описуванним способом перехідного руху зображуючої точки стану на атрактор для нього у превентивному порядку повинні визначатися значення зазначених чи альтернативних їм показників. Далі після оцінки цих значень перехідний рух може бути виконано лише, якщо виявиться, що зображуюча точка стану підсистеми належить басейну тяжіння відповідного атрактора.

Із використанням співвідношень (2) і (3), відповідно до викладеної методики, можуть будуватися необхідні атрактивні фазові траєкторії аналізованої підсистеми. А з використанням рівностей (4) та (5) – траєкторії переходів зображуючої точки стану на атрактори. Тому зазначені рівності були прийняті як алгоритмічна основа програмного комплексу, що реалізує такі побудови. Елементи комплексу програмно фіксовані на вхідній мові системи комп'ютерної математики Mathematica і поділяються на «розрахункову» та «графічну» частини. Перша із цих частин виконує необхідні розрахунки, а друга – перетворює їхні результати на графічну форму.

Побудови здійснено для параметрів поїзда, який складений з японських магнітолевітуючих вагонів MLU-002 [10; 11]. Ілюстративні результати відповідають рухам досліджуваної

підсистеми у різних експлуатаційних режимах. Такими нестационарними режимами були прийняті рушіння, розгін, службове та екстрене гальмування поїзда. Нижче наведено деякі результати дослідження. Відповідності між змінними наведених математичних співвідношень та ідентифікаторами програмного комплексу, використаними на рисунках, описано в табл. 1.

Таблиця 1

Відповідності між змінними математичних співвідношень та ідентифікаторами програмного комплексу, які використані на рисунках

Змінні математичних співвідношень	Ідентифікатори програмного комплексу	Одиниці вимірювання
	t	s
η	eta	m
$\dot{\eta}$	$deta$	m/s

Ілюстративні приклади результатів побудови фазових траєкторій варіантів переходу зображуючої точки стану (ЗТС) МП МЛП на атрактори, що вибираються для цих переходів, наведено на рис. 1–12. Рис. 1 – 3 відповідають режиму рушіння з місця; рис. 4–6 – режиму розгону; рис. 7–9 – режиму службового гальмування; рис. 10–12 – режиму гальмування екстремного. На кожному із цих рисунків пунктирною лінією нанесено атрактивну фазову траєкторію, а суцільною лінією – траєкторію переходу на неї.

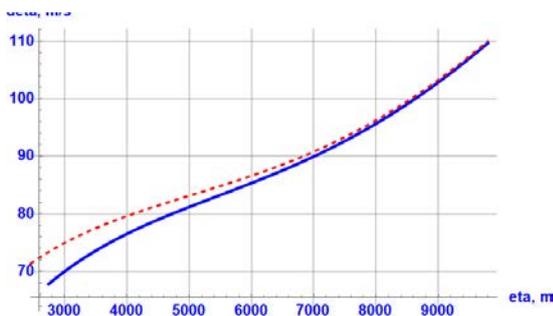


Рис. 1. Фазова траєкторія ЗТС МП МЛП у режимі його рушіння. Варіант 1 переходу на вибраний атрактор

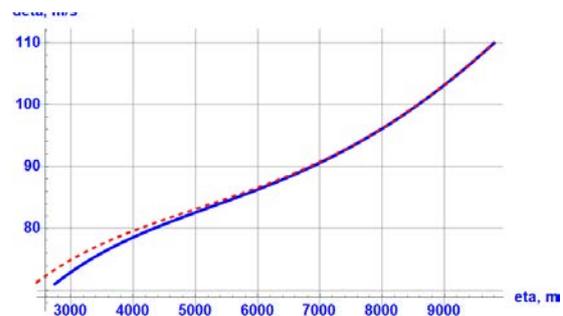


Рис. 2. Фазова траєкторія ЗТС МП МЛП у режимі його рушіння. Варіант 2 переходу на вибраний атрактор

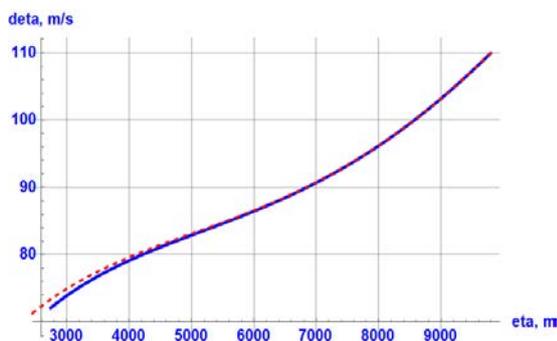


Рис. 3. Фазова траєкторія ЗТС МП МЛП у режимі його рушіння. Варіант 3 переходу на вибраний атрактор

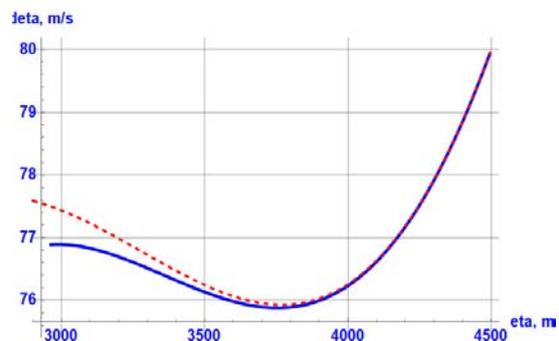


Рис. 4. Фазова траєкторія ЗТС МП МЛП у режимі його розгону. Варіант 1 переходу на вибраний атрактор

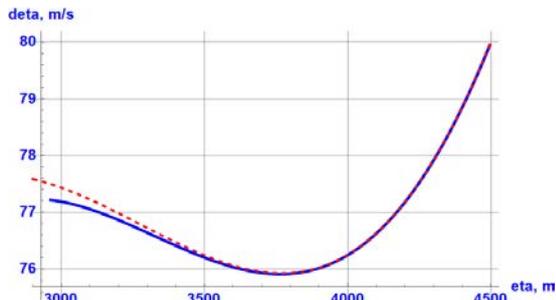


Рис. 5. Фазова траєкторія ЗТС МП МЛП у режимі його розгону. Варіант 2 переходу на вибраний атрактор

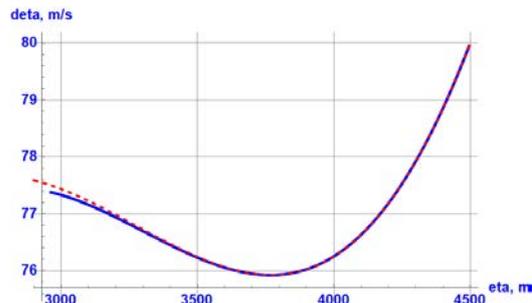


Рис. 6. Фазова траєкторія ЗТС МП МЛП у режимі його розгону. Варіант 3 переходу на вибраний атрактор

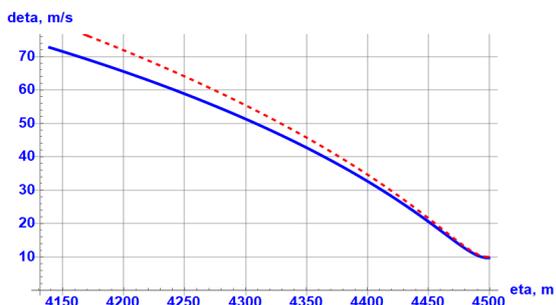


Рис. 7. Фазова траєкторія ЗТС МП МЛП у режимі його службового гальмування. Варіант 1 переходу на вибраний атрактор

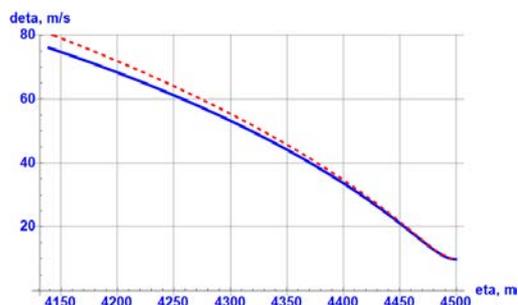


Рис. 8. Фазова траєкторія ЗТС МП МЛП у режимі його службового гальмування. Варіант 2 переходу на вибраний атрактор

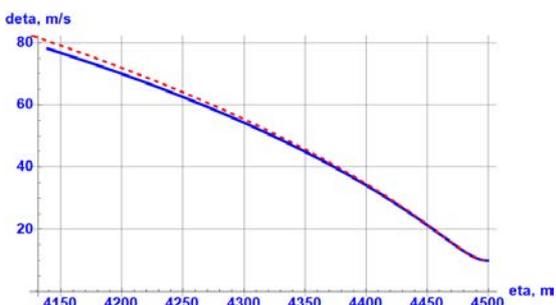


Рис. 9. Фазова траєкторія ЗТС МП МЛП у режимі його службового гальмування. Варіант 3 переходу на вибраний атрактор

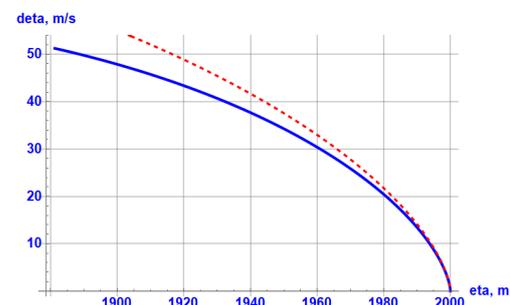


Рис. 10. Фазова траєкторія ЗТС МП МЛП у режимі його екстреного гальмування. Варіант 1 переходу на вибраний атрактор

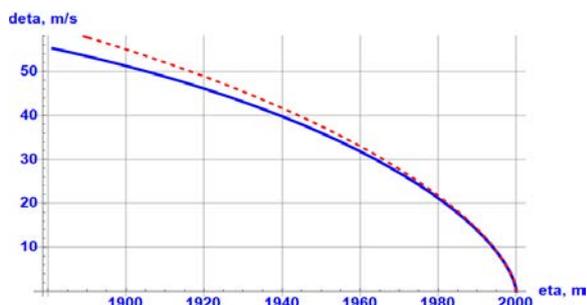


Рис. 11. Фазова траєкторія ЗТС МП МЛП у режимі його екстреного гальмування. Варіант 2 переходу на вибраний атрактор



Рис. 12. Фазова траєкторія ЗТС МП МЛП у режимі його екстреного гальмування. Варіант 3 переходу на вибраний атрактор

Висновки

Аналіз наведених ілюстративних прикладів побудови поздовжнього руху механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда, виходячи з необхідного атрактора зображуючої точки її стану, свідчить про те, що з використанням розробленої методики така побудова успішно здійсненна у випадках, що відповідають усім експлуатаційним режимам. Тому мету цього етапу дослідження досягнуто.

Водночас одержувані в такий спосіб рухи задовольняють лише граничним умовам згаданої побудови і, цілком можливо, є часом не лише не оптимальними, а й навіть раціональними на проміжних етапах. Гранично ж можливе поліпшення якості результуючого руху в кожному конкретному випадку може бути досягнуто лише в рамках підходу, що гарантує таке граничне поліпшення, шляхом постановки та вирішення відповідної диференційно-ігрової мінімаксної задачі.

Список використаної літератури

1. Milnor J.W. Attractor. *Scholarpedia*. URL: <http://www.scholarpedia.org/article/Attractor> (дата звернення: 07.10.2025).
2. Collier B.D., Holmes P. Suppression of Bursting. *Automatica*. 1997. Vol. 33, № 1. P. 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(96\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(96)00137-9)
3. Morse A.S. Global stability of parameter-adaptive control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1980. Vol. 25, June. P. 433–439.
4. Narendra K.S., Lin Y.-H., Valavani L.S. Stable adaptive controller design. Pt. II. Proof of stability. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1980. Vol. 25, June. P. 440–448.
5. Bellman R. *Adaptive control processes*. Princeton : Univ. press, 1961. 255 p.
6. Matthews M.V., Steeg C.W. Terminal controller synthesis. *MIT Rep.* 1955. Nov. 4. № 55–272. P. 10–11.
7. Поляков В.О. Фазовий портрет подовжнього руху механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2024. Т. 7, № 2. С. 166–176. DOI: <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2024-7-2-15>
8. Menck P.J., Heitzig J., Marwan N., Kurths J. How basin stability complements the linear-stability paradigm. *Nature Physics*. 2013. № 9(2). P. 89–92. DOI: <https://doi.org/10.1038/nphys2516>
9. Klinshov V.V., Nekorkin V.I., Kurths J. Stability threshold approach for complex dynamical systems. *New Journal of Physics*. 2016. № 18(1). 013004. DOI: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/1/013004>
10. Zhendong L., Stichel S., Berg M. Overview of technology and development of maglev and hyperloop systems. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2022. 60 p.
11. Takao K. Vehicles for superconducting Maglev system on Yamanashi test line. *Transactions on the Built Environment*. 1994. Vol 7. WIT Press. Retrieved from www.witpress.com.

References

1. Milnor, J.W. Attractor. Scholarpedia. (2018). [Official site]. Retrieved from <http://www.scholarpedia.org/article/Attractor> [in English].
2. Collier, B.D., & Holmes, P. (1997). Suppression of Bursting. *Automatica*, 33 (1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(96\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(96)00137-9) [in English].
3. Morse, A.S. (1980). Global stability of parameter-adaptive control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 25, June, 433–439 [in English].
4. Narendra, K.S., Lin, Y.-H., & Valavani, L.S. (1980). Stable adaptive controller design. Pt. II. Proof of stability *IEEE Transactions on Automatic Control*. Vol. 25, June, 440–448 [in English].
5. Bellman, R. (1961). *Adaptive control processes*. Princeton : Univ. press [in English].
6. Matthews, M.V., & Steeg, C.W. (1955). Terminal controller synthesis. *MIT Rep.* Nov. 4, 55–272, 10–11 [in English].

7. Poliakov, V.O. (2024). Fazovyi portret podovzhnogo rukhu mekhanichnoi pidsystemy mahnitolevituiuchoho poizda [Maglev Train's mechanical Subsystem's longitudinal Motion's phase Portrait]. *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuвання – Applied issues of mathematical modeling*, 7(2), 166–176 [in Ukrainian].
8. Menck, P.J., Heitzig, J., Marwan, N., & Kurths, J. (2013). How basin stability complements the linear-stability paradigm. *Nature Physics*, 9 (2), 89–92. <https://doi.org/10.1038/nphys2516> [in English].
9. Klinshov, V.V., Nekorkin, V.I., & Kurths, J. (2016). Stability threshold for complex dynamical systems. *New Journal of Physics*, 18 (1), 013004. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/1/013004> [in English].
10. Zhendong, L., Stichel, S., & Berg, M. (2022). *Overview of technology and development of maglev and hyperloop systems*. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology [in English].
11. Takao, K. (1994). Vehicles for superconducting Maglev system on Yamanashi test line. *Transactions on the Built Environment*, 7, WIT Press. Retrieved from www.witpress.com [in English].

Поляков Владислав Олександрович – к.т.н., старший науковий співробітник відділу динаміки та міцності нових видів транспорту Інституту транспортних систем і технологій НАН України. E-mail: pva78125@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4957-8028.

Пославський Сергій Юрійович – к.ф.-м.н., старший науковий співробітник відділу динаміки та міцності нових видів транспорту Інституту транспортних систем і технологій НАН України. E-mail: itst@gmail.com, ORCID: 0009-0007-8972-5823.

Polyakov Vladislav Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Senior Research Officer of Ukraine's National Academy's of Sciences Institute of Transport Systems and Technologies. E-mail: pva78125@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4957-8028.

Poslavskyi Serhiy Yuriyovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Officer of Ukraine's National Academy's of Sciences Institute of Transport Systems and Technologies. E-mail: itst@gmail.com, ORCID: 0009-0007-8972-5823.



Отримано: 27.10.2025
Рекомендовано: 03.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025