

В.О. ПОЛЯКОВ

Інститут транспортних систем та технологій
Національної академії наук України

ФАЗОВИЙ ПОРТРЕТ ПОДОВЖНЬОГО РУХУ МЕХАНІЧНОЇ ПІДСИСТЕМИ МАГНІТОЛЕВІТУЮЧОГО ПОЇЗДА

Ключовим критерієм оцінки споживчих властивостей магнітолевітуючого поїзда є якість транспортування. Домінуючий вплив на цю якість справляють динамічні характеристики, зокрема, безпеки та комфортності. Особливо критичними, а тому такими, які лімітують під час оцінювання зазначених характеристик, є нестационарні режими руху. Досі дослідження динаміки поїзда не були комплексними. Як правило, дослідженням піддавалася не цілісна система, а її елементи. Крім того, розгляд такої динаміки не виконувався якісними методами з побудовою фазових портретів рухів. Це неминуче негативно впливало на об'єктивність, а тому й на кінцеву цінність результатів таких досліджень.

Метою цього дослідження є оцінка динамічних якостей та навантаженості одиниці рухомого складу магнітолевітуючого поїзда – вагона – у різних нестационарних режимах його одновимірного руху.

Пропоноване дослідження дає змогу радикально підвищити візуальну осяжність постановки, проведення та результатів аналізу і синтезу динамічних процесів, які протікають у системі. Така візуалізація, безперечно, може суттєво підвищити рівень дослідження та, як наслідок, якості його результатів. Завдяки цьому розроблену методіку дослідження може бути рекомендовано до широкого використання під час проведення подібних робіт для полегшення постановки їх цілей, ходу проведення та підвищення якості результатів.

Дослідження було проведено з використанням методів якісного аналізу динамічних систем на основі аналізу просторів їхніх станів.

У дослідженні:

- показано, що еволюцію моделі подовжнього руху механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда доцільно вивчати, зокрема, методами якісного аналізу динамічних систем;
- аргументовано обґрунтовані переваги використання таких методів дослідження під час проведення подібних досліджень;
- з використанням методів якісного аналізу встановлено геометричне місце точок спокою досліджуваної динамічної системи, їхній тип та рівновагу в них;
- проаналізовано власні та вимушені рухи об'єкта дослідження;
- наведено ілюстративні приклади результатів побудови багатолістного фазового портрета, а також відповідних йому залежностей від часу фазових координат і швидкості в різних експлуатаційних режимах.

Ключові слова: магнітолевітуючий поїзд, механічна підсистема, розрахункова схема, фазові координати, якісні методи дослідження, зображувальна точка стану, фазовий портрет.

V.O. POLYAKOV

Institute of Transport Systems and Technologies
of National Academy of Sciences of Ukraine

MAGLEV TRAIN'S MECHANICAL SUBSYSTEM'S LONGITUDINAL MOTION'S PHASE PORTRAIT

The key criterion for a maglev train's evaluating consumer properties is the quality of transportation. Dynamic characteristics, in particular, safety and comfort, have a dominant influence on this quality. Non-stationary modes of motion are especially critical, and therefore limiting when evaluating the specified characteristics. Until now, studies of train's dynamics have not been comprehensive. As a rule, these studies were conducted not on the whole system, but on its elements. In addition, studies of such dynamics were not carried out using qualitative methods with the construction of phase portraits of motions. This inevitably had a negative impact on objectivity, and therefore on the resulting value of the such studies results.

The purpose of this study is to evaluate the dynamic qualities and load of a car – maglev train's rolling stock's unit – in various non-stationary modes of its one-dimensional motion.

The proposed study makes it possible to radically increase the visual scope of the setting, conduct and results of the analysis and synthesis of dynamic processes occurring in the system. Such visualization can undoubtedly significantly increase the level of research and, as a result, the quality of its results. Thanks to this, the developed research methodology can be recommended for wide use in the conduct of similar works to facilitate the setting of their goals, the progress of the implementation and the improvement of the results quality.

The research was conducted using the methods of dynamic's qualitative analysis based on the systems state spaces. In the study:

- *it is shown that the evolution of a maglev's mechanical subsystem's longitudinal motion model is advisable to study in particular, by methods of systems qualitative analysis;*
- *the benefits of such research methods using during the conduct of similar studies are well-argued;*
- *using the methods of qualitative analysis, the geometric location of the resting points of the dynamic system under study, their type and equilibrium in them were established;*
- *own and forced motions of the research object were analyzed;*
- *illustrative examples of building a system's multi-leaf phase portrait, as well as the corresponding dependencies on time of its phase coordinates and speed in various operational modes, are given.*

Key words: maglev, mechanical subsystem, calculation scheme, phase space, qualitative research methods, state representing point, phase portrait.

Постановка проблеми

Магнітолевітуючий поїзд – велика, складна система, елементи якої дуже різнотипні. Її основне призначення – транспортування пасажирів та вантажів. Тому ключовим критерієм оцінки споживчих властивостей поїзда є якість транспортування. Домінуючий вплив на цю якість мають динамічні характеристики, зокрема, безпеки та комфортності. Особливо критичними, а тому такими, які лімітують під час оцінювання зазначених характеристик, є нестационарні режими руху поїзда.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Досі дослідження динаміки магнітолевітуючого поїзда не були комплексними. Як правило, дослідженням піддавалася не цілісна підсистема, а її елементи. Крім того, розгляд такої динаміки не виконувався якісними методами з побудовою фазових портретів рухів. Це неминуче негативно впливало на об'єктивність, а тому й на результуючу цінність результатів таких досліджень.

Мета дослідження

Результуюче дослідження динаміки магнітолевітуючого поїзда має бути виконано у багатовимірній постановці. Водночас на попередньому етапі розгляду підлягають окремі компоненти згаданої динаміки. Тому, виходячи з викладеного, метою цього етапу дослідження є оцінка динамічних якостей та навантаженості одиниці рухомого складу магнітолевітуючого поїзда – вагона – у різних нестационарних режимах його одновимірного руху.

Виклад основного матеріалу дослідження

Задля розгляду одновимірного поздовжнього руху механічної підсистеми вагона як її розрахункова схема прийнято тверде тіло масою m . Зі згаданим тілом зв'язується декартов трієдр $Sxyz$, початок якого не залишає лінію, паралельну осі путі, а осі є для тіла головними, центральними. Зміна положення тіла у часі t визначається значенням $\varepsilon(t)$ величини переміщення точки C вздовж згаданої лінії, паралельної осі шляху. На тіло не накладено аналітичних в'язів. Тому конфігурація досліджуваної схеми може бути описана за допомогою однієї узагальненої координати:

$$\eta = \varepsilon. \quad (1)$$

Рух розглядається у стані електродинамічної левітації – після відриву вагона від напрямних конструкцій. У процесі руху вважаються відсутніми відхилення точки C від стаціонарної траєкторії, паралельної осі шляху та симетрично розташованої щодо його конструкцій. Під час моделювання враховується вплив на тіло m сил, кожна з яких докладена в точці C і є проєкцією відповідної однойменної повної сили на напрямок, що є паралельним поточному положенню дотичної до згаданої осі:

- $F_{T\tau}$ – тангенціальна складова тягового зусилля вагона – з боку його лінійного синхронного двигуна;
- $F_{AD\tau}$ – тангенціальна складова сили аеродинамічного опору руху – з боку повітряного середовища, що оточує вагон;
- $F_{ED\tau}$ – тангенціальна складова сили електродинамічної взаємодії якірних обмоток лінійного синхронного двигуна з колійними контурами підвішування вагона;
- $F_{W\tau}$ – тангенціальна складова сили ваги вагона, що виникає внаслідок наявності позовжнього ухилу.

Поступальний рух тіла m вздовж лінії, паралельної осі колії, може бути описано другим законом Ньютона:

$$m \cdot \ddot{\eta}(t) = F_{T\tau}(t) + F_{AD\tau}(t) + F_{ED\tau}(t) + F_{W\tau}(t), \quad (2)$$

де $\ddot{\eta}(t)$ – тангенціальний компонент поточного прискорення точки C .
 Модель (2) може бути перетворена до вигляду:

$$\ddot{\eta}(t) = H(t); \quad (3)$$

$$H(t) = F_{f\tau}(t) \cdot m^{(-1)}, \quad (4)$$

де $F_{f\tau}(t) = F_{T\tau}(t) + F_{AD\tau}(t) + F_{ED\tau}(t) + F_{W\tau}(t)$ – повна тангенціальна сила, що діє на розрахункову систему магнітолевітуючого поїзда – точку C .

Рівняння (3) – це динамічна система [1], що відображає еволюцію у часі стану розрахункової системи поїзда. Тому розгляд такої еволюції можна ефективно здійснити шляхом дослідження зазначеної динамічної системи. У свою чергу, як відомо [2], проведення такого дослідження можливе методами кількох різних типів. Основні з них – це аналітичні, наближені та якісні. Рівняння (3) є нелінійним і неавтономним. Тому винятково аналітичні методи для його дослідження придатні далеко не завжди. Наближені методи більш універсальні порівняно з аналітичними. Однак у низці практично важливих випадків досягнення прийнятної якості аналізу процесів на необхідних значних інтервалах зміни змінної t із застосуванням наближених методів істотно ускладнено [3]. Крім того, безпосереднім результатом використання аналітичних або наближених методів аналізу, як правило, є дослідження окремих рухів, що визначаються дискретними поєднаннями їхніх початкових та граничних умов, а також параметрів системи. Проте особливо важливим є отримання відповіді на питання про наявність у неї необхідних динамічних властивостей, тобто про відповідність цим властивостям сукупності її рухів.

Відповіді на останнє питання найефективніше можна, використовуючи методи якісного аналізу динамічних систем на основі простору її станів [4]. Під час використання цих методів процес аналізу передбачає оперування геометричними і топологічними уявленнями множини фазових траєкторій зображувальної точки стану динамічної системи. Це дає змогу, принаймні у дослідженнях, що допускають використання простору станів розмірністю не вище трьох, утворювати наочний образ сімейства згаданих фазових траєкторій, здійснюючи візуалізацію постановки, процесу та результатів аналізу. Така візуалізація, безперечно, може суттєво підвищити рівень дослідження та, як наслідок, якості його результатів.

Під час використання методів якісного аналізу динамічних систем відповідь на питання про можливі типи руху системи отримується в результаті аналізу її фазового портрета – сукупності фазових траєкторій зображувальної точки стану. У разі системи другого порядку (якою

у цьому дослідженні прийнято розрахункову схему механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда) її фазовим простором є двовимірна поверхня нульової кривизни з евклідовою метрикою, тобто площина. Така площина “broken down into trajectories, it gives an easily visible “portrait” of a dynamic system, it makes it possible to immediately, at one glance, cover the entire set of movements that can arise under all sorts of initial conditions” [5].

Шляхом введення позначення:

$$\dot{\eta}(t) = \rho(t) \quad (5)$$

рівняння другого порядку (3) може бути приведено до еквівалентної йому системи двох рівнянь першого порядку:

$$\begin{cases} \dot{\eta}(t) = \rho(t); \\ \dot{\rho}(t) = H(t). \end{cases} \quad (6)$$

Або у матричній формі:

$$\begin{aligned} \dot{\Xi} &= A \times \Xi + \Delta; \\ \Xi &= \begin{vmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{vmatrix}; \dot{\Xi} = \begin{vmatrix} \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_2 \end{vmatrix}; A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}; \Delta = \begin{vmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{vmatrix}; \\ \xi_1 &= \eta; \xi_2 = \rho; \dot{\xi}_1 = \dot{\eta}; \dot{\xi}_2 = \dot{\rho}; \\ a_{11} &= 0; a_{12} = 1; a_{21} = 0; a_{22} = 0; \\ \delta_1 &= 0; \delta_2 = H. \end{aligned} \quad (7)$$

З цих виразів випливає, що:

– детермінант матриці A :

$$\det A = a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21} = 0; \quad (8)$$

– слід цієї матриці:

$$\text{tr } A = a_{11} + a_{22} = 0. \quad (9)$$

У такому разі [6] динамічна система (3) має нескінченну кількість точок спокою типу «центр», рівновага в кожній з яких нестійка. Геометричне місце таких точок визначається за рівняннями (6). Це вісь абсцис координатної системи, яка використовується під час побудови фазового портрета, а також усі прямі, які їй паралельні.

Прийнята розрахункова схема механічної підсистеми поїзда вироджена: у ній відсутні пружні елементи. Тому її власні рухи позбавлені коливань. Відображенням цього у динамічній системі (6) є виродженість її матриці A внаслідок справедливості рівності (8). Кожен же вимушений рух згаданої розрахункової схеми, отже, і відповідна фазова траєкторія зображувальної

точки стану є результатом виведення динамічної системи з її точки спокою і визначаються, згідно з рівняннями (3) і (4), конкретним характером збурення $F_{f\tau}(t)$. При цьому внесок властивостей механічної підсистеми до характеру таких вимушених рухів обмежений лише впливом на їхнє прискорення – через параметр m .

Внаслідок зазначеного фазовий портрет динамічної системи (3) континуально заповнений всілякими фазовими траєкторіями зображувальної точки стану, які, на відміну від фазових траєкторій відповідної автономної динамічної системи, цілком можуть перетинатися. Теоретично під дією $F_{f\tau}(t)$ можливим є перехід між будь-якими точками описуваного фазового портрета, тобто між будь-якими станами динамічної системи – уздовж будь-якої фазової траєкторії. Фактична реалізованість такої можливості залежить лише від динамічної достатності магнітолевітуючого поїзда, а також обмежень, що накладаються умовами його експлуатації, і безумовною необхідністю забезпечення належної якості синтезованого руху.

Коли рух магнітолевітуючого поїзда відбувається в єдиному експлуатаційному режимі, збурювальна функція $H(t)$, як правило, є гладкою, а фазові траєкторії зображувальної точки стану розрахункової схеми механічної підсистеми особливих точок не мають. При цьому будь-яка фазова траєкторія може бути відображена в межах єдиного фазового портрета. Якщо ж режим руху поїзда змінюється, то в межах міжрежимної зони функція $H(t)$ може виявитися недиференційованою [7]. При цьому на фазовій траєкторії виникає точка перемикання [8] – і аналіз руху механічної підсистеми зручно проводити з використанням багатолістого фазового портрета [9]. У точці перемикання зображувальна точка стану розрахункової схеми механічної підсистеми стрибком переходить на інший аркуш фазового портрета. Відбувається це зі збереженням значень t , η і $\dot{\eta}$. Цим задаються умови безперервності фазової траєкторії та її проєкції на фазовий портрет.

Задля отримання результатів, що ілюструють побудову розгорнутого фазового портрета поздовжнього руху розрахункової схеми механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда в різних експлуатаційних режимах, було створено програмний комплекс, програмно фіксований вхідною мовою системи комп'ютерної математики Mathematica. Елементи комплексу діляться на розрахункову та графічну частини. Перша з цих частин виконує необхідні розрахунки, а друга перетворює їхні результати на графічну форму.

Побудови здійснено для параметрів, пропорційних до області динамічної достатності механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда, складеного з японських магнітолевітуючих вагонів MLU-002 [10; 11]. Ілюстративні результати відповідають програмним термінальним рухам досліджуваної підсистеми у різних експлуатаційних режимах. Як такі режими було прийнято рушення, підвищення швидкості, службове зупиночне гальмування та екстрене гальмування. Нижче наведено деякі результати дослідження. Відповідності між змінними математичних співвідношень та ідентифікаторами програмного комплексу, які використані на ілюстраційних рисунках, описані 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	t	s
η	eta	m
$\dot{\eta}$	$deta$	m / s

Ілюстративні приклади результатів побудови програмних термінальних рухів наведено на рис. 1–12. Рис. 1–3 відповідають режиму рушення магнітолевітуючого поїзда з місця; рис. 4–6 – режиму підвищення швидкості руху; рис. 7–9 – режиму повного зупинного службового гальмування; рис. 10–12 – режиму гальмування екстреного. На рис. 1, 4, 7 та 10 наведено графіки зміни в часі фазової координати зображувальної точки стану розрахункової схеми механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда; на рис. 2, 5, 8, та 11 – графіки зміни у часі фазової швидкості цієї точки; на рис. 3, 6, 9, та 12 – різні аркуші фазового портрета поздовжнього руху підсистеми.

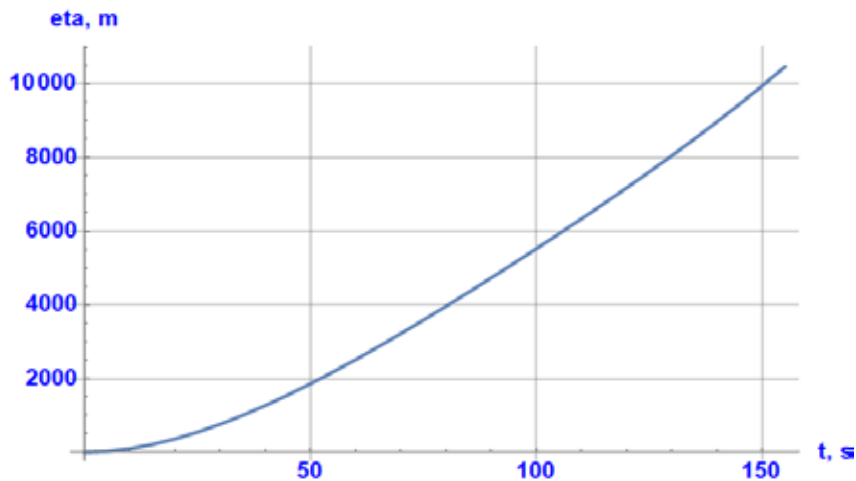


Рис. 1. Графік залежності від часу фазової координати зображувальної точки стану розрахункової схеми механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда – режим рушення

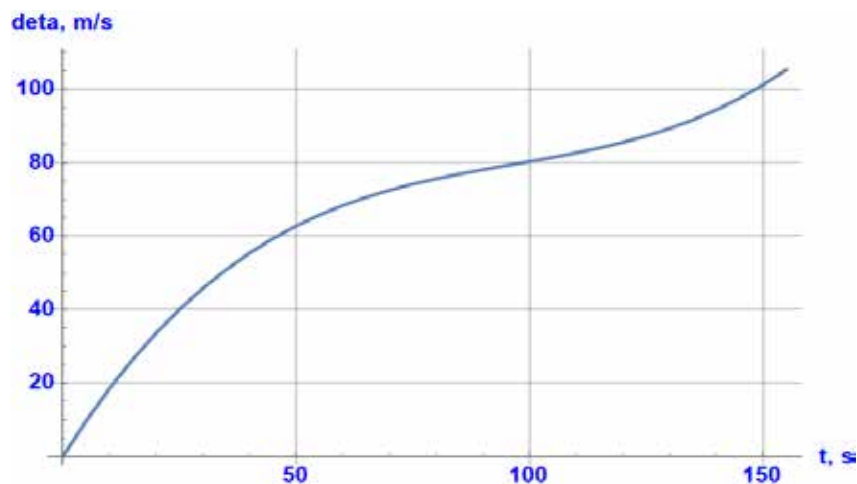


Рис. 2. Графік залежності від часу фазової швидкості зображувальної точки стану розрахункової схеми механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда – режим рушення

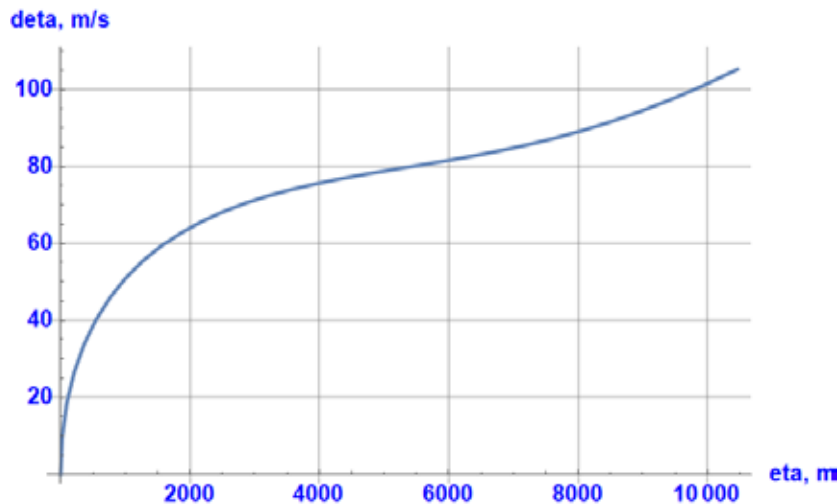


Рис. 3. Аркуш фазового портрета поздовжнього руху розрахункової схеми механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда – режим рушення

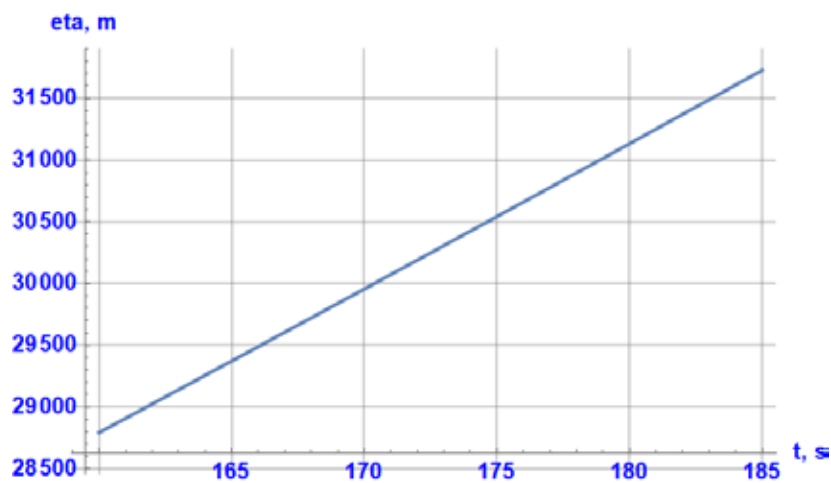


Рис. 4. Графік залежності від часу фазової координати зображувальної точки стану розрахункової схеми механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда – режим підвищення швидкості

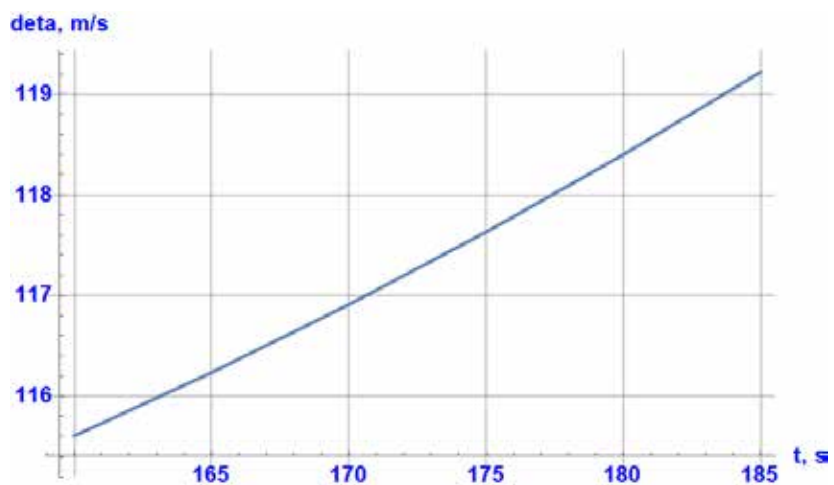


Рис. 5. Графік залежності від часу фазової швидкості зображувальної точки стану розрахункової схеми механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда – режим підвищення швидкості

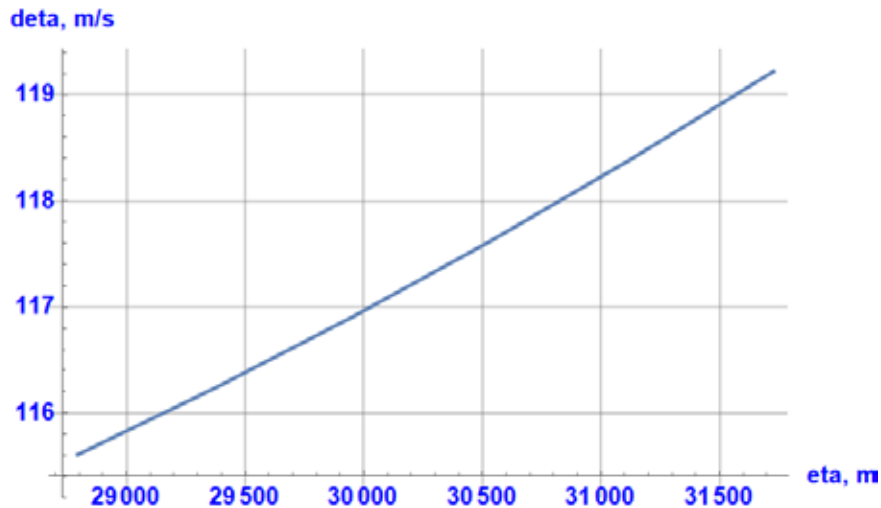


Рис. 6. Аркуш фазового портрета поздовжнього руху розрахункової схеми механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда – режим підвищення швидкості

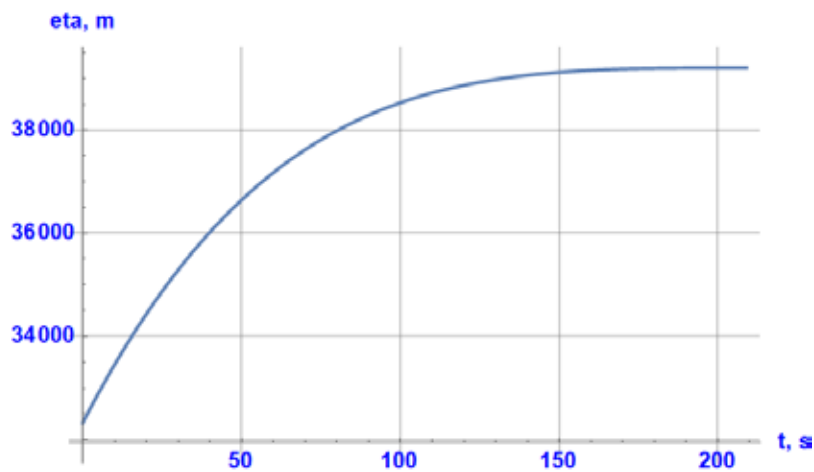


Рис. 7. Графік залежності від часу фазової координати зображувальної точки стану розрахункової схеми механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда – режим повного службового зупиночного гальмування

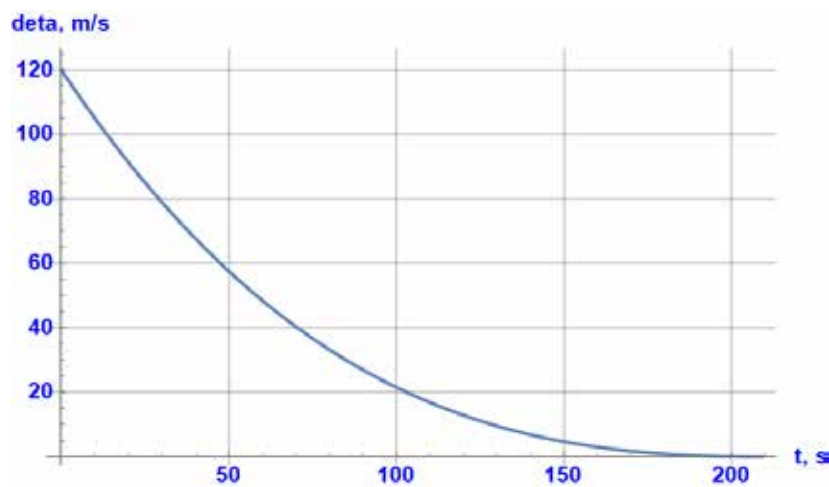


Рис. 8. Графік залежності від часу фазової швидкості зображувальної точки стану розрахункової схеми механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда – режим повного службового зупиночного гальмування

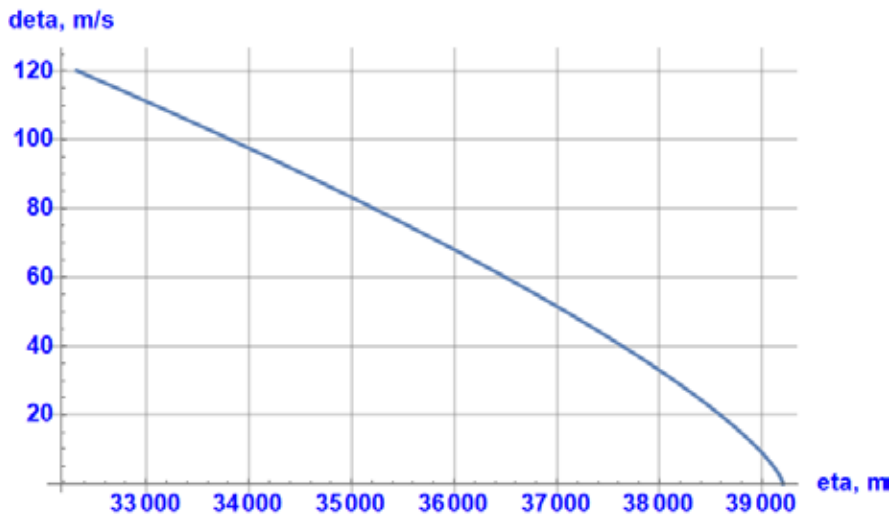


Рис. 9. Аркуш фазового портрета позовжнього руху розрахункової схеми механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда – режим повного службового зупиночного гальмування



Рис. 10. Графік залежності від часу фазової координати зображувальної точки стану розрахункової схеми механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда – режим екстреного гальмування



Рис. 11. Графік залежності від часу фазової швидкості зображувальної точки стану розрахункової схеми механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда – режим екстреного гальмування

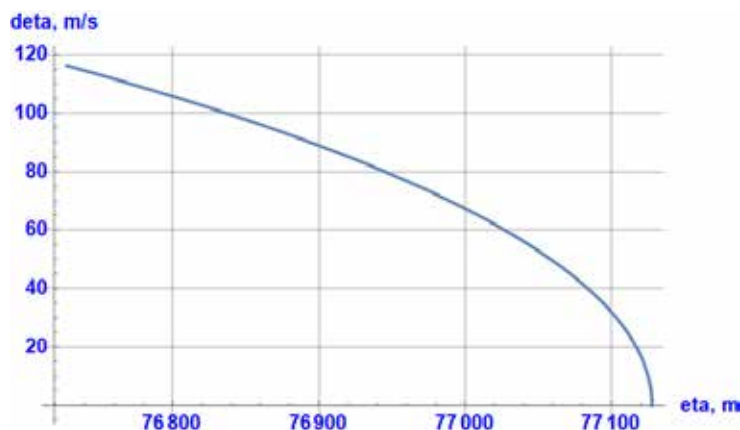


Рис. 12. Аркуш фазового портрета поздовжнього руху розрахункової схеми механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда – режим екстреного гальмування

Наведені ілюстративні приклади побудови багатолистового фазового портрета поздовжнього руху розрахункової схеми механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда в його різних експлуатаційних режимах руху, а також відповідних цим режимам залежностей від часу фазових координати і швидкості аналізованої динамічної системи свідчать про те, що такий метод дослідження дає змогу радикально підвищити візуальну осяжність постановки, проведення та результатів аналізу і синтезу динамічних процесів. Завдяки цьому зазначений метод якісного аналізу може бути рекомендований до широкого використання під час проведення подібних робіт для полегшення постановки їхніх цілей, ходу проведення та підвищення якості результатів.

Висновки

Таким чином, у процесі виконання дослідження:

- показано, що еволюцію моделі поздовжнього руху прийнятої розрахункової схеми механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда доцільно вивчати, зокрема, методами якісного аналізу динамічних систем;
- виявлено переваги таких методів під час проведення подібних досліджень;
- з використанням методів якісного аналізу встановлено геометричне місце точок спокою досліджуваної динамічної системи, їхній тип та рівновагу в них;
- проаналізовано власні та вимушені рухи об'єкта дослідження;
- наведено ілюстративні приклади результатів побудови багатолистого фазового портрета, а також відповідних йому залежностей від часу фазових координат і швидкості в різних експлуатаційних режимах.

В результаті проведення етапу роботи побудовано та первинно проаналізовано шуканий фазовий портрет. Аргументовано показано переваги використання такого методу дослідження.

Список використаної літератури

1. Трохимчук П.П. Нелінійні динамічні системи. Луцьк: Вежа-Друк, 2015. 275 с.
2. Strogatz S.H. *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering – 2 (Studies in Nonlinearity)*. New York: Westview Press, 2014. 528 p.
3. Duarte L.G.S., da Mota L.A.C.P., de Oliveira H.P., Ramos R.O., Skea J.E.F. Numerical Analysis of Dynamic Systems and the Fractal Dimension of Boundaries. *Computer Physics Communications*. 1999. No. 119 (2–3). P. 256–271.
4. Michel A.N., Miller R.K. *Qualitative Analysis of Large-Scale Dynamical Systems (Mathematics in Science and Engineering)*. Vol. 134. London: Academic Press, 1977. 288 p.

5. Andronov A.A., Vitt A.A., Khaikin S.E. Theory of oscillators. Oxford: Pergamon press, 1966. 821 p.
6. Michel A., Wang K., Hu B. Qualitative Theory of Dynamical Systems. Boca Raton: CRC Press, 2001. 732 p.
7. Jarnick M., Pflug P. Continuous Nowhere Differentiable Functions: The Monsters of Analysis. Heidelberg: Springer, 2015. 299 p.
8. Yao K. Dimension of Phase Point Trajectory. *International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application*. 2015. No. 4. P. 249–253.
9. Shoar S., Payan S. A qualitative system dynamics approach to modeling the causes and effects of design deficiencies in construction projects. *Journal of Facilities Management*. 2021. Vol. 20. No. 4. P. 558–569.
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. Nagashima K., Sasakawa T. Research and Development of Maglev and Application of Related Technologies to Conventional Railways. *Quarterly Report of RTRI*. 2021. Vol. 62. No. 3. P. 163–166.

References

1. Trokhymchuk, P.P. (2015). *Neliniini dynamichni systemy [Nonlinear dynamical systems]*. Lutsk : Vezha-Druk [in Ukrainian].
2. Strogatz, S.H. (2014). *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering – 2 (Studies in Nonlinearity)*. New York: Westview Press [in English].
3. Duarte, L.G.S., da Mota, L.A.C.P., de Oliveira, H.P., Ramos, R.O., & Skea, J.E.F. (1999). Numerical Analysis of Dynamic Systems and the Fractal Dimension of Boundaries. *Computer Physics Communications*. 119 (2–3). 256–271. DOI: 10.1016/S0010-4655(99)00204-0 [in English].
4. Michel, A.N., & Miller, R.K. (1977). *Qualitative Analysis of Large-Scale Dynamical Systems. Mathematics in Science and Engineering*. 134. London: Academic Press [in English].
5. Andronov, A.A., Vitt, A.A., & Khaikin, S.E. (1966). *Theory of oscillators*. Oxford: Pergamon press [in English].
6. Michel, A., Wang, K., & Hu, B. (2001). *Qualitative Theory of Dynamical Systems*. Boca Raton: CRC Press [in English].
7. Jarnick, M., & Pflug, P. (2015). *Continuous Nowhere Differentiable Functions: The Monsters of Analysis. Heidelberg: Springer* [in English].
8. Yao, K. (2015). Dimension of Phase Point Trajectory. *International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application*, 4, 249–253. DOI: 10.4236/ijmnta.2015.44019 [in English].
9. Shoar, S., & Payan, S. (2021). A qualitative system dynamics approach to modeling the causes and effects of design deficiencies in construction projects. *Journal of Facilities Management*, 20 (4), 558–569. DOI: 10.1108/JFM-02-2021-0025. [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. Nagashima, K., & Sasakawa, T. (2021). Research and Development of Maglev and Application of Related Technologies to Conventional Railways. *Quarterly Report of RTRI*, 62 (3), 163–166. [in English].

Поляков Владислав Олександрович – к.т.н., старший науковий співробітник Інституту транспортних систем та технологій Національної академії наук України. E-mail: pva78125@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4957-8028.

Poliakov Vladyslav Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences, Senior Research Officer of the Institute of Transport Systems and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine. E-mail: pva78125@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4957-8028.