

КОНЦЕПЦІЯ МЕТОДИКИ ПОБУДУВАННЯ РУХІВ МЕХАНІЧНОЇ ПІДСИСТЕМИ МАГЛЕВ ПОЇЗДУ

Рух механічної підсистеми (МП) маглев поїзда (МЛП) може інтерпретуватися як еволюція її поточного стану у фазовому просторі, а побудова руху підсистеми – як ініціація цієї еволюції. Синтезований рух повинен мати сукупність властивостей, які визначають його якість

Адекватні розрахункові схеми МП МЛП, як правило, багатомірні та багатозв'язкові. Підвищення якості рухів вимагає їх оптимізації, критерії якої можуть бути не тільки не узгодженими, а й антагоністичними. Ці фактори значно ускладнюють та утруднюють зазначене підвищення. Тому метою дослідження обрано створення концепції методики побудови рухів підсистеми, яка б нівелювала згадані труднощі.

Вимога надання руху МП МЛП будь-якої якості може інтерпретуватися як необхідність зміни, під дією керувань, її інтегральної фазової многостатності. Тому знаходження зображуючої точки стану на певній фазовій поверхні означає наявність у підсистемі певного набору властивостей. Використання цього факту, як патерну для побудови руху підсистеми, може стати основою концепції синтезованої методики.

Багатомірність, багатозв'язковість, а також наявність інших аспектів складності підсистеми призводять до того, що пряме векторне покоординатне керування її фазовими координатами утруднене. Істотно редукувати цей процес можна, використовуючи метод агрегування координат.

Досягнення високої якості рухів підсистеми, внаслідок її нелономності, багатозв'язності та суттєвої нелінійності, вимагає використання багатоканальних регуляторів. Якщо поведінка кожної узгодженої групи координат еквівалентна поведінці єдиного каналу, вона може синтезуватися методами, відповідними вимогам до якості координованого руху.

Подальшого розвитку створюваної концепції можна досягти шляхом розширення фазового простору підсистеми на підпростори меншої розмірності.

Врахування можливостей методів селективного агрегування координат стану підсистеми, а також розширення її фазового простору виявляє ряд доцільних елементів створюваної концепції. Основними критеріями обрання певних з таких елементів є вимоги до рухів підсистеми та узагальнені ресурси, які можуть бути витрачені на їх синтез.

Принципово можливо керувати фазовими координатами підсистеми (незалежними, або агрегованими) послідовно – окремо кожною, чи по групах, або паралельно. При цьому цілі відповідних рухів можуть досягатися також як послідовно, так і паралельно. Кожен із зазначених підходів має як переваги, так і недоліки.

У взаємодії з прийнятим способом впливу на фазові координати підсистеми, може бути прийнятий послідовний, або паралельний спосіб досягнення цілей синтезованого руху. Кожному з цих способів, у свою чергу, притаманні переваги та недоліки.

Аналіз описаних елементів концепції методики побудови бажаних рухів МП МЛП призводить до висновку, що цим елементам притаманна властивість когерентності, а їхній сукупності – якість достатності до створення шуканої методики. При використанні одержуваної методики будуть нівельовані труднощі, що викликаються необхідністю синтетичного врахування особливостей адекватних розрахункових схем МП і критеріїв, що використовуються при оптимізації конструйованих рухів. Цим мети етапу дослідження досягнуто.

Ключові слова: магнітолевітуючий поїзд, механічна підсистема, якість руху, побудова руху, агрегування координат, розширення фазового простору, концепція методики.

V. O. POLYAKOV

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

CONCEPT OF METHODOLOGY FOR MAGLEV TRAIN'S MECHANICAL SUBSYSTEM'S MOVEMENTS CREATING

The maglev train's (MLT) mechanical subsystem's (MS) motion can be interpreted as the evolution of its current state in phase space, while the construction of the subsystem's motion can be interpreted as the initiation of this evolution. Synthesized movement must possess a set of properties that define its quality.

As a rule, the MLT's MS's computational diagram is multidimensional and multiconnectivity. Improving the quality of movements requires optimizing them, and the criteria for such optimization may not only be inconsistent but also contradictory. These factors significantly complicate and hinder the aforementioned increase. Therefore, the objective of

this study is to develop a concept of methodology for constructing the subsystem's movements would mitigate the aforementioned difficulties.

The requirement to impart a specific quality to the MLT's MS's motion may be interpreted as the necessity to alter its integral phase manifold under the influence of control actions. Therefore, the location of the representative state point on a particular phase surface signifies that the subsystem possesses a specific set of properties. Utilizing this fact as a pattern for constructing the motion of a subsystem may serve as the foundation for the concept of the synthesized methodology.

The multidimensionality, multiconnexity, and other aspects of the subsystem's complexity make it difficult to implement direct coordinate-based vector control of its phase coordinates. This process can be significantly reduced by using the coordinate aggregation method

Due to the non-holonomic nature, multi-coupling, and significant nonlinearity of the subsystem, achieving high-quality of its motion requires the use of multi-channel controllers. If the behavior of each agreed group of coordinates is equivalent to that of a single channel, then it can be synthesized using methods that meet the quality requirements for coordinated motion. Further development of the proposed concept can be achieved by the stratification of the subsystem's phase space into subspaces of lower dimension.

Taking into account the capabilities of methods for the selective aggregation of subsystem's state coordinates, as well as the stratification of its phase space, reveals a number of expedient elements within the concept currently being developed. The primary criteria for selecting specific elements from among these are the subsystem's motion requirements and the resources that can be allocated to their synthesis.

In principle, it is possible to control the phase coordinates of a subsystem (whether independent or aggregated) sequentially – either individually or in groups – or in parallel. In turn, the goals of the corresponding movements can be achieved both sequentially and in parallel. Each of these approaches has both advantages and disadvantages.

In combination with the adopted method of influencing the subsystem's phase coordinates, either a sequential or a parallel approach may be adopted to achieve the objectives of the synthesized motion. Each of these methods, in turn, has its own advantages and disadvantages.

An analysis of the described elements of the methodology for constructing the MLT's MS's movements leads to the conclusion that these elements possess the property of coherence, and that their combination possesses the quality of sufficiency for creating of the sought-after methodology. The use of this methodology will eliminate the difficulties arising from the need to synthetic accounting for the specifics of adequate appropriate computational schemes of the MS under consideration and the criteria used in optimizing the designed motions. This achieves the objective of this phase of the research.

Keywords: magnetically levitated train, mechanical subsystem, motion quality, motion construction, coordinate aggregation, stratification of the phase space, concept of methodology.

Постановка проблеми

Рух механічної підсистеми (МП) маглев поїзда (МЛП) може, з вичерпною інформативністю, інтерпретуватися як еволюція її поточного стану у фазовому просторі, а побудова руху – як ініціація цієї еволюції. Результуючий синтезований рух повинен гарантовано мати сукупність властивостей, що визначають його якість. Тому обов'язковими елементами постановки проблеми цього синтезу має бути завдання:

- початкових значень фазових координат;
- їх поточних та граничних обмежень;
- репрезентативного носія інформації про рух;
- бажаного характеру еволюції зазначеного носія у часі;
- номенклатури можливих керуючих впливів;
- обмежень допустимих значень таких впливів;
- допустимих узагальнених витрат на синтез бажаних рухів підсистеми.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

На даний час, автору не відомі дослідження, крім [1], які б стосувалися побудови рухів МП МЛП у просторах їхніх станів.

Мета дослідження

Адекватні розрахункові схеми МП МЛП, як правило, багатовимірні та багатозв'язкові. Підвищення якості рухів потребує оптимізації, критерії якої часто не тільки не узгоджені, а й антагоністичні. Ці фактори значно ускладнюють та утруднюють зазначене підвищення. Тому метою дослідження обрано створення концепції методики побудови бажаних рухів підсистеми, що розглядається, яка б нівелювала згадані труднощі.

Виклад основного матеріалу дослідження

Вимога надання руху МП МЛП будь-якої якості може інтерпретуватися як необхідність зміни, під дією керувань, її інтегральної фазової многостатності. Тому знаходження зображуючої точки стану на певній фазовій поверхні означає наявність у підсистемі певного набору властивостей. У [1] було продемонстровано використання цього факту, як патерну можливості побудови одновимірного руху підсистемі. Ідея того ж алгоритму, після узагальнення та доповнення, може стати основою концепції методики побудови інших необхідних рухів МП.

Багатомірність, багатозв'язковість, а також наявність інших аспектів складності підсистемі призводять до того, що пряме покоординатне векторне керування її фазовими координатами утруднене і виявляється неефективним [2]. Істотно редукувати цей процес можна, використовуючи метод агрегування зазначених координат [3], який дозволяє:

- спростити модель керованого руху підсистемі, зменшити обчислювальні витрати на його синтез та аналіз – за рахунок скорочення розмірності підпростору, у якому це керування здійснюється;

- виділити групи координат, які мають схожі динамічні властивості, а також ті, які природно тісно пов'язані, дозволяючи, таким чином, сфокусувати увагу на ключових динамічних процесах та ігнорувати другорядні;

- виявити і більш ретельно контролювати основні режими роботи підсистемі, полегшуючи розуміння та інтерпретацію поведінки в них;

- забезпечити підвищення стійкості, керованості та спостережуваності синтезованих рухів завдяки створенню контролерів та спостерігачів для груп змінних, що веде до спрощення конструкцій, підвищення надійності, зменшення впливу інформаційних шумів та збурень, згладжування локальних коливань та, в результаті, – до стабілізації керування;

- здійснити перехід до модульної побудови керування рухом бо, у цьому випадку, кожна група координат може розглядатися як окремий модуль із власним контролером, що полегшує масштабування та адаптивність керування, дозволяючи застосовувати розподілені та ієрархічні методи його побудови;

- підвищити адаптивність рухів до зовнішніх умов за рахунок підвищення робастності та зниження чутливості до локальних помилок та збурень;

- спростити реалізацію алгоритмів та методів машинного навчання в керуванні.

Викладене свідчить про те, що принципово можливий синтез руху МП МЛП з використанням автономних регуляторів сепаратних каналів, побудованих традиційними методами теорії одноканальних систем, за винятком найпростіших, примітивних випадків, забезпечує невисоку якість результуючих рухів, виявляючись, у той же час, надто складним та ресурсомістким, або взагалі нездійсненним [4]. Досягнення високої якості рухів підсистемі, внаслідок її неголономності, багатозв'язності та суттєвої нелінійності [5], вимагає, очевидно, використання багатоканальних регуляторів [6], які, крім каналів автономного керування, містять додаткові зовнішні перехресні зв'язки таких каналів [7]. Такі зв'язки, доповнюючи внутрішні перехресні, створюють умови внутрішньогрупового узгодження фазових координат. При цьому бажано, щоб поведінка кожної групи координат, що узгоджується, була еквівалентною поведінці єдиного каналу. Тоді вона може синтезуватися методами, що відповідають вимогам до якості координованого руху.

Для конкретизації наведених міркувань, розділимо $2 \cdot L$ (де L – число ступенів свободи агрегату, прийнятого у якості розрахункової схеми МП) керованих компонентів вектора стану цієї підсистемі $\gamma^p = \{\eta^\lambda, \dot{\eta}^\lambda \forall \lambda \in [1, L]\} \forall p \in [1, 2 \cdot L]$ на дві макрогрупи, в першу з яких включимо J компонентів, доцільність автономного керування якими доведена. У другу ж з макрогруп включимо $K = 2 \cdot L - J$ компонентів, які потребують внутрішньогрупового узгодження.

У першій макрогрупі можуть зустрічатися іманентно взаємозалежні координати. Прагнення ізоляції відповідних їм каналів, що викликається бажанням спростити селективне

керування, може загострюватися умовами небажаності, і, навіть, неприпустимості їх взаємовпливу. Тоді поділ може бути досягнутий, наприклад, виходячи з наступного. Як показано [7], умовою незалежності λ -го каналу підсистеми щодо μ -го є дотримання співвідношень

$$a_{\lambda\mu} \equiv 0; \quad \lambda \neq \mu, \quad a_{\lambda\mu} = c_{\lambda\mu} \cdot p^{(2)} + (C_{\lambda,\mu\nu} \cdot \eta^\nu + \beta_{\lambda\mu}) \cdot p + l_{\lambda\mu}; \quad p = \frac{d}{dt} \forall \lambda, \quad \mu, \nu \in [\overline{1, L}], \quad (1)$$

де $c_{\lambda\mu}, C_{\lambda,\mu\nu} \forall \lambda, \mu, \nu \in [\overline{1, L}]$ – метричний тензор агрегату, що є розрахунковою схемою МП МЛП та триндексний символ Крістоффеля цього агрегату в координатах $\eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1, L}]$;

$\beta_{\lambda\mu}, l_{\lambda\mu} \forall \lambda, \mu \in [\overline{1, L}]; t$ – дисипативні, квазіпружні коефіцієнти моделі його динаміки та час.

Значення $c_{\lambda\mu}, C_{\lambda,\mu\nu}, \beta_{\lambda\mu}, l_{\lambda\mu} \forall \lambda, \mu, \nu \in [\overline{1, L}]$ залежить від властивостей і структури МП. Якщо рівняння моделі її динаміки впорядковано, то коефіцієнти $a_{\lambda\lambda} \forall \lambda \in [\overline{1, L}]$ характеризують динамічні якості каналів підсистеми, що відповідають її координатам. Коефіцієнти ж $a_{\lambda\mu} \forall \lambda \neq \mu; \lambda, \mu \in [\overline{1, L}]$ характеризують взаємодію таких каналів. Вирази (1) дозволяють знаходити структурні та параметричні рішення, реалізація яких може гарантувати сепарацію каналів, взаємодія яких небажана.

Друга макрогруп фазового вектора складається з груп, що вимагають координації. Для i -ої з цих груп $\gamma_i^\mu \forall \mu \in [\overline{\Phi_i, \Gamma_i}]$ ця вимога може бути описана співвідношеннями

$$\phi_{ij}(\gamma_i^\mu \forall \mu \in [\overline{\Phi_i, \Gamma_i}]) = 0 \forall j \in [\overline{1, H_i}]; \quad \Gamma_i - \Phi_i = G_i, \quad (2)$$

де $\phi_{ij} \forall j \in [\overline{1, H_i}]$ – оператори (кінцеві, диференціальні, інтегро-диференціальні, або інші), що впливають на координати $\gamma_i^\mu \forall \mu \in [\overline{\Phi_i, \Gamma_i}];$

Φ_i, Γ_i – початковий та кінцевий порядкові номери таких координат серед $\gamma^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1, 2 \cdot L}];$

G_i, H_i – числа координат, що входять до i -ї групи, та обмежень, які на них накладаються;

Умова еквівалентності поведінки групи координат та єдиного каналу:

$$H_i = G_i - 1. \quad (3)$$

Якщо ж $H_i < G_i - 1$, то агрегованому рух можуть бути додані додаткові властивості шляхом накладання додаткових $D_i = G_i - (H_i + 1)$ обмежень на узгоджувані координати. Якщо ж, навпаки, $H_i > G_i - 1$, то «надлишкові» $P_i = H_i - (G_i - 1)$ обмежень мають бути відкинуті. Але, у будь-якому разі, всі обмеження (3) мають бути несуперечливими. В іншому ж випадку, узгоджений рух реалізовано бути не може.

Вирази (2), (3) визначають i -у групу узгоджуваних координат однією змінною

$$\sigma_i = \sigma_i(\gamma_i^\mu \forall \mu \in [\overline{\Phi_i, \Gamma_i}]), \quad (4)$$

яку назвемо агрегованою. Тоді побудова руху підсистеми по групі узгоджуваних фазових координат зводиться до підтримки співвідношень (2) між ними (при дотриманні рівності (3)), а також керуванню агрегованою змінною σ_i . При цьому повна задача синтезу руху МП як багатозв'язкової підсистеми спрощується до незалежного керування

$$M = J + \Psi \quad (5)$$

фазовими координатами, J з яких складають першу макрогрупу незалежних компонентів її стану (доцільність автономного керування якими доведено), а Ψ координат є агрегованими і визначаються співвідношеннями типу (4). Ψ – це число груп координат у другій їх макрогрупі, що потребують внутрішньогрупової координації. Тому

$$K = G_i \cdot e^i \forall i \in [\overline{1, \Psi}], \quad (6)$$

де $e^i \forall i \in [\overline{1, \Psi}]$ – Ψ -мірний одиничний вектор-стовпець.

З прийнятого критерію поділу фазових координат підсистеми на описані макрогрупи випливає, що в частині, що відповідає першій такій макрогрупі, побудова руху може бути виконана методами одноканального керування. У частині ж, що відповідає другій макрогрупі, конструювання високоякісного координованого руху здійснено шляхом регулювання агрегованих змінних $\sigma_i, \forall i \in [1, \Psi]$, а також помилок узгодження, які виникають при цьому, кожна з яких може бути охарактеризована матрицею ухилення

$$\delta_{ij} = \{\phi_{ij}(\gamma_i^{\mu} \forall \mu \in [\overline{\Phi_i, \Gamma_i}])\} \forall i \in [1, \Psi], j \in [1, H_i]. \quad (7)$$

При $t = 0$, умови погодження (2) завжди порушені і $\delta_{ij}(0) \neq 0$. Те саме викликають і збурення руху. Тому вимога стійкості (по Ляпунову, асимптотичної, експоненційної тощо) є однією з основних, зокрема і у відношенні до ухилень від агрегованих рухів, визначаючи, значною мірою, працездатність підсистеми.

Співвідношення (4) і (7) задають перетворення вектора $\gamma_i^{\mu} \forall \mu \in [\overline{\Phi_i, \Gamma_i}]$, що характеризує стан МП в частині i -ї групи узгоджуваних фазових координат, в агреговану змінну σ_i , а також вектор ухилення $\delta_{ij} \forall j \in [1, H_i]$. Тому завжди, за винятком вироджених випадків, вимоги до якості відповідного координованого руху можуть бути повно та однозначно трансформовані у вимоги до агрегованого руху та ухилення від нього. Таким чином, кожна з підзадач побудови руху МП в частині, відповідній групі каналів, що узгоджуються, редукується до забезпечення необхідного характеру агрегованого руху, а також мінімального ухилення від нього.

Подальший розвиток створюваної концепції може бути досягнуто шляхом розшарування фазового простору підсистеми на підпростори меншої розмірності [8]. Це – важливий метод теорії керування та аналізу динамічних систем, який дозволяє:

- спростувати модель динаміки, знижувати обчислювальні складності аналізу та синтезу, застосовувати спеціалізовані методи керування для кожного виділеного підпростору – за рахунок тотальної декомпозиції задачі керування;
- виконувати поділ таких підпросторів залежно від темпу протікання та ступеня керованості процесів, що протікають у них, стабілізувати нестійкі підпростори – завдяки виділенню ключових динамічних режимів;
- підвищувати стійкість та ефективність керування шляхом локалізації контролерів, а також ігнорування маловажливих процесів;
- покращувати інтерпретованість підсистеми, полегшувати її аналіз – внаслідок чіткого виділення внутрішньосистемних взаємодій та підвищення їх адаптивності та робастності;
- оснащувати найбільш ефективними спостерігачами та фільтрами ті канали керування, в яких спостережуваність та керованість найбільш важливі;
- спростувати задачу оцінки стану підсистеми в умовах інформаційної неповноти.

Врахування описаних можливостей методів селективного агрегування координат стану підсистеми, а також розшарування її фазового простору виявляє низку доцільних елементів створюваної концепції. Основними критеріями обрання певних з них є конкретні вимоги до рухів підсистеми, а також узагальнені ресурси, які можуть бути витрачені на їхньої синтез. Принципово можливо, керувати фазовими координатами підсистеми (як незалежними, так і агрегованими) послідовно – окремо кожною, чи за групам, або паралельно. При цьому цілі відповідних рухів можуть досягатися також як послідовно, так і паралельно. Кожен із зазначених підходів має як переваги, так і недоліки [9].

При послідовному керуванні вплив на кожен з координат, або їхню когерентну групу, відбувається по черзі, фокусуючись за раз на одній частині стану підсистеми. Перевагами такого способу є:

- простота реалізації оскільки, у кожний момент часу, вирішується задача з меншим числом змінних;

– спрощення аналізу та синтезу для процесів, які протікають, щодо окремих координат, або їх підмножин;

– зниження ймовірності того, що керуючі впливи за різних координатах будуть антагоністичні один по відношенню до іншого.

Способу притаманні і недоліки, основними з яких є:

– система може повільніше реагувати на зміну всіх компонентів вектора стану;

– ригідність реагування на зміни фазових координат, за винятком регульованої в даний момент часу;

– обмежена оперативність використання потенційних можливостей системи керування в досягненні цілей синтезованих рухів.

При паралельному керуванні, впливи на координати, або їх групи, здійснюються одночасно з урахуванням їх взаємного впливу. Перевагами такого способу є:

– висока швидкість і скоординованість домінуючих компонент стану, що дозволяє досягати бажаних цілей рухів у найкоротші терміни;

– раціональність використання потенційних можливостей системи керування;

– підвищення стійкості і точності керування за рахунок повнішого урахування взаємозв'язків між компонентами стану підсистеми.

Способу притаманні і недоліки, основними з яких є:

– необхідність в ускладнених алгоритмах керування, здатних враховувати багатовимірні залежності;

– підвищений рівень ризику виникнення конфліктів керування, що може спричинити нестабільність станів підсистеми;

– необхідність у ускладненні моделей динаміки, які вимагають підвищених обчислювальних витрат для їх комп'ютерної реалізації.

Аналітичне порівняння наведених переваг і недоліків послідовного та паралельного керування компонентами стану підсистеми призводить до висновку, що коли адекватна розрахункова схема МП МЛП не складна, ресурси на побудову її руху обмежені, а вимоги до динамічних характеристик – невисокі, то переважним є послідовне керування зазначеними компонентами стану. Якщо ж розрахункова схема складна, є значні взаємодії між фазовими координатами і важливими є високі рівні динамічних характеристик, точність і стабільність їх реалізації, то краще використовувати паралельне керування фазовими координатами. Можливий, очевидно, і гібридний варіант: наприклад, ключовими координатами стану керувати одночасно, а менш значущими для результуючої динаміки – послідовно.

У взаємодії з прийнятим способом впливу на фазові координати підсистеми, може бути прийнятий послідовний, або паралельний спосіб досягнення цілей її синтезованого руху. Кожному з цих способів, у свою чергу, властиві переваги та недоліки [10].

У разі, коли прийнято послідовний спосіб досягнення цілей руху, їх реалізація здійснюється по черзі – одна за одною. Перевагами такого методу є:

– простота конструювання та реалізації рухів, оскільки, в кожен момент часу, вирішується задача з однією метою;

– чіткість структури та пріоритетів цільового вектора;

– зниження ризику виникнення антагонізмів між компонентами вектора керування.

У той же час, способу притаманні і недоліки:

– збільшується сумарний час досягнення всіх цілей руху;

– підвищується ймовірність виникнення небажаних проміжних станів підсистеми оскільки, у процесі досягнення однієї мети, підсистема може відхилитися від інших, що може бути неприйнятним;

– знижується адаптивність підсистеми до змін обстановки руху – через підвищення можливості «застрягання» на досягненні однієї з цілей.

Якщо прийнятий спосіб паралельного досягнення цілей руху, всі вони враховуються одночасно і підсистема намагається досягти їх відразу всі, або балансувати між ними. У цьому випадку, переваги полягають у:

- швидкості та ефективності завдяки виникненню можливості спільної реалізації цілей руху, що скорочує повний час такої реалізації;
- підвищенні адаптивності керування до обстановки за рахунок динамічного перерозподілу ресурсів між цілями в залежності від поточної ситуації;
- раціональному використанні потенційних ресурсів підсистеми.

Однак, і цьому способу притаманні недоліки:

- неминуче підвищення складності необхідних алгоритмів керування, здатних синтетично враховувати взаємодію та можливу конфліктність між цілями;
- висока ймовірність конфліктності цілей, що вимагає прийняття компромісів та пріоритетів між ними;
- підвищення ймовірності виникнення нестабільності керування та нестійкості рухів у разі незадовільної збалансованості їх цілей.

До певної міри ці недоліки можуть бути нівельовані шляхом використання адаптивних алгоритмів побудови рухів [11].

Аналітичне порівняння наведених переваг та недоліків послідовного та паралельного способів досягнення цілей синтезованих рухів призводить до висновку, що послідовне досягнення раціонально використовувати, якщо:

- першорядною є простота реалізації рухів;
- вдається встановити чітку ієрархію пріоритетності таких цілей, а тому немає необхідності в їх паралельному досягненні;
- можливе підвищення часу досягнення всіх цілей, а також виникнення небажаних проміжних станів підсистеми не є критичними.

У той же час, якщо:

- основними критеріями вибору є висока динамічність керування, його адаптивність до обстановки та гнучкість у використанні потенційних ресурсів підсистеми;
 - цілі синтезованого руху вдається збалансувати;
 - ускладнення алгоритмів керування, можливість виникнення антагонізму цілей рухів, а також нестійкості рухів не критичні,
- слід використовувати спосіб паралельного досягнення цілей синтезованих рухів.

Висновки

Аналіз описаних елементів концепції методики побудови бажаних рухів МП МЛП дозволяє зробити висновок, що цим елементам притаманна властивість когерентності, а їх сукупності – якість достатності для створення шуканої методики. Застосування запропонованої методики дозволить усунути труднощі, пов'язані з необхідністю комплексного врахування особливостей відповідних розрахункових схем досліджуваної МП та критеріїв, що використовуються при оптимізації конструйованих рухів. Завдяки цьому мета етапу дослідження досягнута.

Список використаної літератури

1. Поляков В. О., Пославський С. Ю. Бажані атрактори зображуючої точки стану як патерни побудування поздовжнього руху механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2025. Т. 8, № 2. С. 236–244. DOI: <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-2-24>
2. Sun Y., Li J., Wang Z., He X., Fu Q., Zou Y. Distributed formation-aggregation control algorithm for a cluster of quadrotors. *Journal of the Franklin Institute*. 2023. V. 360, Iss. 3. P. 1560–1581. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2022.12.002>

3. Barzel B., Liu YY., Barabási AL. Constructing minimal models for complex system dynamics. *Nature Communications*. 2015. Iss. 6, 7186. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms8186>
4. Zhu Q., Wang S.-M., Ni Y.-Q. A Review of Levitation Control Methods for Low- and Medium-Speed. *Maglev Systems*. 2024. Iss. 14. P. 8–17. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14030837>
5. Rogers B., Fricke G., Devendra P. Garg D. P. Aggregation and Rendezvous in an Unbounded Domain without a Shared Coordinate System. *Proc. Of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*. 2011. P. 1437–1442. URL: <https://scispace.com/pdf/aggregation-and-rendezvous-in-an-unbounded-domain-without-a-4h2edmvzaq.pdf>
6. Sevinov J. U., Abdishukurov M. S., Bobomurodov N. X. Synthesis Problem of adaptive Control Systems for multi-channel and multi-mode object ti-mode Objects. *Chemical Technology. Control and Management*. 2023. № 5 (113) P. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.59048/2181-1105.1508>
7. Поляков В. О., Хачапурідзе М. М. Побудова руху магнітолевітуючого поїзда як багатозв'язкової системи. *Наука та прогрес транспорту*. 2011. № 36. С. 29–33. URL: <https://stp.ust.edu.ua/article/download/8705/7518/13108>
8. Proctor J. L., Brunton S. L., Kutz J. N. Dynamic mode decomposition with control. *Optimization and Control*. 2021. V. 1. Mon. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.6358>
9. Yongduan S., Kai Z., Hefu Y. Control of Nonlinear Systems Stability and Performance. CRC Press, 2025. 323 p. ISBN 9781032755274. URL: <https://www.routledge.com/Control-of-Nonlinear-Systems-Stability-and-Performance/Song-Zhao-Ye/p/book/9781032755274>
10. Zhang Z., Liu X. Recent Advances in Nonlinear Control Theory and System Dynamics. *Mathematics*. 2026. Special issue. URL: https://www.mdpi.com/journal/mathematics/special_issues/7337918908#
11. Hu J., Wang P., Xu C., Zhou H. Yao J. High accuracy adaptive motion control for a robotic manipulator with model uncertainties based on multilayer neural network. *Control*. 2022. V. 24. Iss. 3. P. 1503–1514. DOI: <https://doi.org/10.1002/asjc.2546>

References

1. Poliakov, V. O. & Poslavskiy, S. Yu. (2025). Bazhani atraktory zobrazhuiuchoi tochky stanu yak paterny pobuduvannia pozdovzhnoho rukhu mekhanichnoi pidsystemy mahnitolevituiuchoho poizda. [Desired attractors of the state point as patterns for forming the longitudinal motion of the maglev train mechanical subsystem]. *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuvannia*. 8 (2), 236–244. DOI: <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-2-24> [in Ukrainian].
2. Sun, Y., Li, J., Wang, Z., He, X., Fu, Q. & Zou, Y. (2023). Distributed formation-aggregation control algorithm for a cluster of quadrotors. *Journal of the Franklin Institute*. 360 (3), 1560–1581. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2022.12.002>. [in English].
3. Barzel, B., Liu, YY. & Barabási, AL. (2015). Constructing minimal models for complex system dynamics. *Nature Communications*. 6, 7186. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms8186> [in English].
4. Zhu Q., Wang S.-M. & Ni Y.-Q. (2024) A Review of Levitation Control Methods for Low- and Medium-Speed. *Maglev Systems*. 14, 8–17. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14030837> [in English].
5. Rogers, B., Fricke, G., Devendra, P. & Garg, D. P. (2011). Aggregation and Rendezvous in an Unbounded Domain without a Shared Coordinate System. *Proc. Of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, 1437–1442. URL: <https://scispace.com/pdf/aggregation-and-rendezvous-in-an-unbounded-domain-without-a-4h2edmvzaq.pdf> [in English].
6. Sevinov, J. U., Abdishukurov, M. S. & Bobomurodov, N. X. (2023). Synthesis Problem of adaptive Control Systems for multi-channel and multi-mode object ti-mode Objects. *Chemical Technology*.

- Control and Management*. 5 (113), 57–63. DOI: <https://doi.org/10.59048/2181-1105.1508> [in English].
7. Poliakov, V. O. & Khachapuridze, M. M. (2011). Pobudova rukhu mahnitolevituiuchoho poizda yak bahatozviazkovoi systemy. [Motion construction of a maglev train as a multivariable system]. *Nauka ta prohres transportu*. 36, 29–33. URL: <https://stp.ust.edu.ua/article/download/8705/7518/13108> [in Ukrainian].
 8. Proctor, J. L., Brunton, S. L. & Kutz, J. N. (2021). Dynamic mode decomposition with control. *Optimization and Control*. V. 1. Mon. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.6358> [in English].
 9. Yongduan, S., Kai, Z. & Hefu, Y. (2025). Control of Nonlinear Systems Stability and Performance. CRC Press. ISBN 9781032755274. URL: <https://www.routledge.com/Control-of-Nonlinear-Systems-Stability-and-Performance/Song-Zhao-Ye/p/book/9781032755274> [in English].
 10. Zhang, Z. & Liu, X. (2026). Recent Advances in Nonlinear Control Theory and System Dynamics. *Mathematics*. Special issue. URL: https://www.mdpi.com/journal/mathematics/special_issues/7337918908# [in English].
 11. Hu, J., Wang, P., Xu, C., Zhou, H. & Yao, J. (2022). High accuracy adaptive motion control for a robotic manipulator with model uncertainties based on multilayer neural network. *Control*. 24 (3), 1503–1514. DOI: <https://doi.org/10.1002/asjc.2546> [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.

Polyakov Vladyslav Olexandrovych – 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.

Дата першого надходження статті до видання: 31.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)