

ХІСМАТУЛІН В. Ш., кандидат технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту

САГАЙДАЧНИЙ В. Г., аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту

ПЕЛЕХ В. Р., аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту



Обґрунтування інтервалу оновлення координатної інформації про стан рухомих одиниць у координатних системах регулювання

У системах координатного регулювання руху поїздів із рухомими блок-ділянками важливе місце займають операції, пов'язані з отриманням та обробкою координатної інформації – визначення координати голови і довжини поїзда, розрахунок допустимої швидкості руху поїзда до хвоста попереду розташованого поїзда.

Проведено спектральний аналіз складових руху поїзда, обумовлених керуючими діями машиніста за звичайного (планового) руху та інших випадкових факторів. За результатами аналізу встановлено, що спектр флуктуацій випадкового процесу, обумовленого діями машиніста, зосереджений у вузькій області частот, а флуктуації від інших факторів мають широкий спектр і меншу спектральну потужність. Тому з використанням широкого спектра, що має місце за великої частоти оновлення інформації, «вага» корисних складових буде зменшуватися порівняно з флуктуаційними. Отже, для того щоб з обробкою координатної інформації враховувати лише розподіл спектральних складових, обумовлених діями машиніста, частота оновлення інформації має бути такою, щоб забезпечити відновлення тільки основної частини спектра прискорення. Наведено співвідношення, яке, відповідно до умов теореми відліків, пов'язує значення частоти оновлення інформації з постійною часу кореляції прискорення, що обумовлено керуючими діями машиніста (середнє значення інтервалу часу руху з постійним прискоренням).

Наведені оцінки періоду та частоти оновлення координатної інформації можна використовувати лише в планових (нормальних) ситуаціях. Це пояснюють тим, що лінійні алгоритми Калмана є інерційними з «пам'яттю» характеру руху, тривалість якої визначена величиною постійної часу зміни прискорень. Наявність «пам'яті» надзвичайно корисна тим, що лінійні алгоритми дають, по-перше, змогу проводити екстраполяцію руху об'єкта і поїзної ситуації на відповідний часовий інтервал і передбачати можливі дії з її регулювання; по-друге, завдяки наявності інерційності можливе продовження роботи системи керування за короткочасного викривлення або зникнення вимірювань.

Однак лінійні алгоритми не забезпечують миттєву реакцію системи керування рухом поїздів із виникненням надзвичайних ситуацій (аварія, різке гальмування або прискорення). Тому необхідно, щоб у надзвичайних ситуаціях використовували методи екстреного оцінювання стану рухомих одиниць – спеціальні нелінійні алгоритми, засновані на теорії ухвалення рішень, а між рухомими одиницями підтримувати відстань, достатню для запобігання аварійним ситуаціям.

Ключові слова: координатні системи регулювання, кореляційна функція прискорень, спектральна щільність, частота оновлення інформації, теорема відліків, лінійний алгоритм оцінювання стану.

Вступ.

Перспективні методи керування рухом залізничного транспорту передбачають використання координатної інформації про рухомі одиниці [1, 2], щоб реалізувати координатні способи регулювання руху на основі визначення місця розташування поїздів, їхньої швидкості і прискорення. Тому в системах координатного регулювання з рухомими блок-ділянками важливе місце займають операції, пов'язані з отриманням та обробкою координатної інформації – визначення координати голови та довжини поїзда,

©ХІСМАТУЛІН В. Ш., САГАЙДАЧНИЙ В. Г., ПЕЛЕХ В. Р., 2026

розрахунок допустимої швидкості руху поїзда до хвоста попереду розташованого поїзда. Однією з проблем побудови системи обробки координатної інформації в центрі керування є визначення частоти або інтервалу часу оновлення інформації, необхідної для формування команд керування.

Мета.

Метою роботи є визначення вимог щодо частоти оновлення координатної інформації в центрі керування, яка допомагає забезпечити ефективну роботу алгоритмів оцінювання параметрів руху в координатних системах регулювання руху поїздів.

Основний матеріал.

Координатна інформація може бути отримана з використанням супутникових систем навігації, локомотивних засобів контролю і точкових колійних датчиків або баліз (balise) у системі ETCS-3. У всіх цих випадках у центрі керування необхідно проводити статистичну обробку первинних даних, одержуваних від різних джерел інформації, для оцінювання координат стану, їх екстраполяції та формування команд керування рухомими одиницями [1-3].

Для проведення аналізу скористаємося статистичною моделлю руху об'єкта, заснованою на гіпотезі, що ділянки рівномірного руху, прискорення або гальмування поїздів змінюються апіорі в невідомий спосіб [4, 5]. Такий підхід обумовлений тим, що рух об'єкта заздалегідь точно не визначений і може змінюватися непередбачувано. Отже, модель руху поїзда базована на його статистичних характеристиках.

У роботі [5] детально проаналізовано статистичні характеристики руху поїзда. Показано, що прискорення $w(t)$, обумовлене керуючими діями машиніста для звичайного (планового) руху, можна вважати випадковим процесом з експоненційною кореляційною функцією

$$\Gamma_w(\tau) = \sigma_w^2 \exp(-|\tau|/\tau_w), \quad (1)$$

де σ_w - середньоквадратичне значення прискорення;

τ_w - постійна часу кореляції прискорення, що обумовлене керуючими діями машиніста (середнє значення інтервалу часу руху з постійним прискоренням).

Вказані параметри можна визначити за результатами обробки статистичної інформації для кожного типу поїзда і ділянки [4, 5].

На підставі статистичної моделі прискорень (1) будують лінійні дискретні алгоритми оцінювання та екстраполяції координатної інформації [6, 7]. Для їхнього синтезу користуються параметрами моделі прискорень у дискретному часі $t_n = nT$:

$$w(nT) = \rho \cdot w(nT - T) + q \cdot \xi(nT), \quad (2)$$

де T - інтервал часу дискретизації - період оновлення інформації;

$\rho = \exp(-T/\tau_w)$ - параметр, який характеризує ступінь кореляції прискорення на інтервалі часу T ;

$q = 1 - \rho^2$ - параметр, що характеризує невизначену складову прискорення на інтервалі часу дискретизації;

$\xi(nT)$ - послідовність некорельованих випадкових величин (шум збудження), розподілених за нормальним законом з одиничною дисперсією.

Отже, не тільки середньоквадратичне значення σ_w і постійна часу кореляції прискорення τ_w , а і величина інтервалу часу дискретизації T є одним із важливих параметрів алгоритмів обробки інформації. Вона є оберненою до частоти оновлення інформації F : $F = 1/T$. Зрозуміло, що збільшення частоти оновлення дає змогу забезпечити більш надійний контроль за поїзною ситуацією, але потребує суттєвого збільшення ресурсів від системи керування. Тому з'ясуємо, які вимоги потрібно враховувати, вибираючи її. Розглянемо це питання через спектральний аналіз складу прискорень з урахуванням додаткових факторів, що визначають рух поїзда.

Як відомо [6], спектральна щільність розподілу флуктуацій прискорення, обумовленого керуючими діями машиніста, яка є перетворенням Фур'є кореляційної функції (1), визначена виразом

$$S_w(\omega) = \frac{2\sigma_w^2\tau_k}{1 + \tau_k^2\omega^2}, \quad (3)$$

де ω - кругова (циклічна) частота, рад/с.

Крім прискорення, обумовленого керуючими діями машиніста, завжди присутні додаткові флуктуаційні складові $w_f(t)$, які залежать від нерівностей шляху, коливань колісних пар та інших факторів, що впливають на рух поїзда. Ці складові накладені на основний рух, але не впливають суттєво на його основний характер або компенсовані діями машиніста. Тому можна вважати, що флуктуаційні складові руху мають математичне сподівання, що дорівнює нулю. На підставі статистичного аналізу флуктуаційну складову прискорення можна вважати випадковим процесом з експоненційною кореляційною функцією, аналогічною (1), із середньоквадратичним відхиленням σ_f і постійною

часу кореляції τ_f , яка суттєво менша за постійну часу

τ_w . Результуючий графік зміни прискорення в часі з урахуванням обох складових показано на рис. 1.

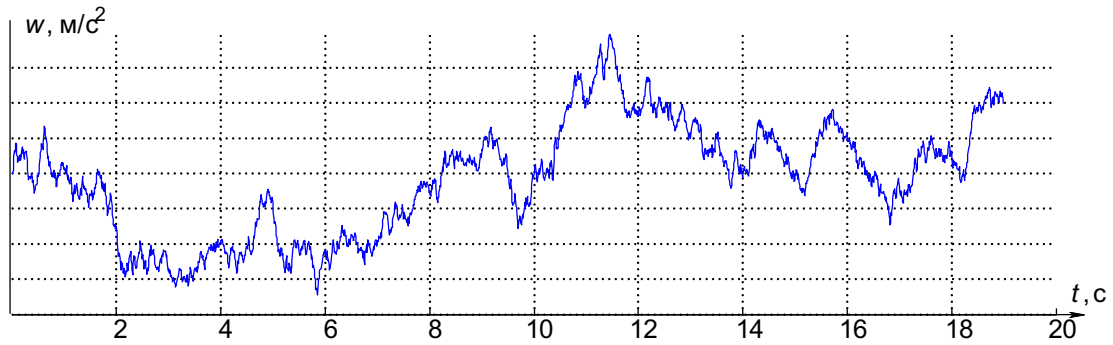


Рис. 1. Результуючий графік зміни прискорення в часі

Типові графіки кореляційної функції $\Gamma(\tau)$ і спектральної щільності $S(\omega)$ прискорення за постійної часу кореляції $\tau_k = 2$ с (коректування руху машиністом) і $0,2$ с (флуктуаційні складові) наведені на рис. 2. Як бачимо, спектр флуктуацій випадкового процесу, обумовленого діями машиніста, зосереджені у вузькій області частот поблизу $\omega = 0$, а флуктуації від інших факторів мають широкий спектр і меншу спектральну потужність в області низьких

частот. Тому з обробкою інформації із застосуванням широкого спектра, що має місце за великої частоти дискретизації, «енергія» флуктуаційних складових буде пропорційно збільшуватися, а корисна інформація практично не додана. Отже, для того щоб з обробкою координатної інформації враховувати лише розподіл спектральних складових, обумовлених діями машиніста, частота оновлення інформації має бути такою, щоб забезпечити відновлення тільки основної частини спектра прискорення.

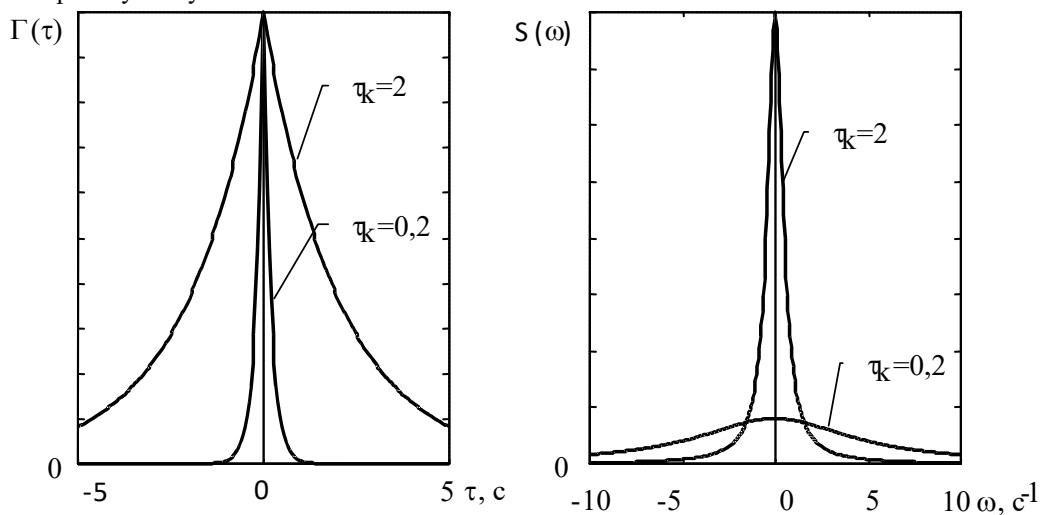


Рис. 2. Графіки кореляційної функції

$\Gamma(\tau)$ і спектральної щільності $S(\omega)$ флуктуацій для різних постійних часу кореляції τ_k

Будемо вважати, що розподіл основних спектральних складових прискорення, обумовленого діями машиніста, зосереджений в області частот $(-\omega_{\max}, \omega_{\max})$ вище заданого порогового рівня δ відносно максимального значення $S_w(0) = 2\sigma_w^2\tau_w$:

$$\frac{1}{1 + (\omega_{\max} \cdot \tau_w)^2} = \delta. \quad (4)$$

Тоді основна ширина спектра $F_{\max} = 2\pi\omega_{\max}$, Гц, буде задовольняти умову

$$F_{\max} = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_w} \sqrt{\frac{1-\delta}{\delta}}. \quad (5)$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Відповідно до умов теореми відліків (Найквіста-Шеннона-Котельникова), для забезпечення можливості відновлення неперервного сигналу за дискретними вимірами період часової дискретизації T має задовольняти вимогу

$$T < 1/2F_{\max}, \quad (6)$$

З урахуванням виразу (5) отримуємо, що інтервал часу T оновлення координатної інформації визначений нерівністю

$$T < \pi \cdot \tau_w / \sqrt{\frac{1-\delta}{\delta}}. \quad (7)$$

За планового руху величина τ_w середнього значення інтервалу часу руху з постійним прискоренням складає від одиниць до десятків секунд [5]. Відповідно, для забезпечення достатньої якості оцінювання параметрів руху у звичайних ситуаціях період оновлення координатної інформації доцільно вибирати в межах 1-10 с.

Зазначимо, що величина порога δ впливає на припустимий рівень втрат інформації за швидких змін прискорень, обумовлених діями машиніста. Наприклад, зі зменшенням порога від 0,1 до 0,01 мінімальна частота оновлення інформації збільшується втричі – від $1/\tau_w$ до $3/\tau_w$, що дає змогу більш точно спостерігати рух поїзда на малих часових інтервалах. Зрозуміло, що платою за це є зростання рівня флуктуаційної складової, обумовленої дією додаткових факторів і збільшення навантаження на обчислювальні засоби.

Безумовно, наведені оцінки періоду і частоти оновлення координатної інформації можна використовувати лише в планових (нормальних) ситуаціях. Це пояснюють тим, що лінійні алгоритми Калмана, розглянуті у статті [7], є інерційними з «пам'яттю» характеру руху, тривалість якої визначена величиною постійної часу τ_w [6]. Наявність «пам'яті» надзвичайно корисна тим, що лінійні алгоритми дають, по-перше, змогу проводити екстраполяцію руху об'єкта і поїзної ситуації на відповідний часовий інтервал і передбачати можливі дії з її регулювання; по-друге, завдяки наявності інерційності можливе продовження роботи системи керування за короткочасного викривлення або зникнення вимірювань.

Однак лінійні алгоритми, засновані на моделі (1), не забезпечують миттєву реакцію системи керування рухом поїздів із виникненням надзвичайних ситуацій (аварія, різке гальмування або прискорення). Тому необхідно в надзвичайних ситуаціях використовувати методи екстреного оцінювання стану рухомих

одиниць – спеціальні нелінійні алгоритми, засновані на теорії ухвалення рішень, а між рухомими одиницями підтримувати відстань, достатню для запобігання аварійним ситуаціям [8-10].

Список використаних джерел

1. European Train Control System. URL: <https://www.thalesgroup.com/en/european-train-control-system-etcs23>
2. When will we see ETCS Level 3 train control systems? URL: <https://www.arcweb.com/industry-best-practices/when-will-we-see-etcs-level-3-train-control-systems>
3. Хісматулін В. Ш., Сагайдачний В. Г., Пелех В. Р. Порівняльна характеристика та проблеми побудови координатних систем регулювання рухом поїздів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 4. С. 49-54.
4. Singer R. Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering targets. *IEEE Trans. Aerospace & Electronic Systems*. July 1970. Vol. AES-6. P. 473-483.
5. Бойнік А. Б., Хісматулін В. Ш., Воліченко І. Г. Модель руху транспортного засобу для синтезу лінійного алгоритму оцінки координатної інформації. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. Донецьк, 2013. Вип. 36. С. 63-67.
6. Sage A. P., Melse J. L. *Estimation Theory with Application to Communication and Control*. N.-Y : McGraw-Hill, 1972.
7. Хісматулін В. Ш., Воліченко І. Г. Оптимальний лінійний алгоритм оцінювання координат стану рухомої одиниці. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. Донецьк, 2014. Вип. 37. С. 10-14.
8. Federated Data-Driven Kalman Filtering for State Estimation/ November 2024. DOI:[10.48550/arXiv.2411.05847](https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.05847)
9. Unscented Filtering and Nonlinear Estimation/ Simon J. Julier, Jeffrey K. Uhlmann. *Proceedings of the IEEE*. March 2004. Vol. 92, No. 3. P. 401-422.
10. Punithakumar K. Nonlinear filtering algorithms for multitarget tracking. McMaster University, 2007. P. 153. References

1. *European Train Control System*. (n.d.). Thales Group. <https://www.thalesgroup.com/en/european-train-control-system-etcs23>
2. ARC Advisory Group. (n.d.). *When will we see ETCS Level 3 train control systems?* <https://www.arcweb.com/industry-best-practices/when-will-we-see-etcs-level-3-train-control-systems>
3. Khismatulin, V. Sh., Sahaidachnyi, V. H., & Pelekh, V. R. (2024). Porivnialna kharakterystyka ta problemy pobudovy koordynatnykh system rehulivannia rukhom poizdiv [Comparative characteristics and problems of building coordinate systems for train traffic control]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu*

- transporti*[Information and Control Systems on Railway Transport], (4), 49–54.
4. Singer, R. (1970). Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-6(4), 473–483. <https://doi.org/10.1109/TAES.1970.310128>
 5. Boinik, A. B., Khismatulin, V. Sh., & Volichenko, I. H. (2013). Model rukhu transportnoho zasobu dlia syntezy liniinoho alhorytmu otsinky koordynatnoi informatsii [A vehicle motion model for the synthesis of a linear algorithm for estimating coordinate information]. *Zbirnyk naukovykh prats DonIZT* [Collection of Scientific Papers of DonIRT], (36), 63–67.
 6. Sage, A. P., & Melsa, J. L. (1971). *Estimation theory with applications to communications and control*. McGraw-Hill.
 7. Khismatulin, V. Sh., & Volichenko, I. H. (2014). Optymalni liniyni alhorytm otsiniuvannia koordynat stanu rukhomoi odyntsi [Optimal linear algorithm for estimating the coordinates of the state of a moving unit]. *Zbirnyk naukovykh prats DonIZT* [Collection of Scientific Papers of DonIRT], (37), 10–14.
 8. Gao, S., & Li, W. (2024). *Federated data-driven Kalman filtering for state estimation*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.05847>
 9. Julier, S. J., & Uhlmann, J. K. (2004). Unscented filtering and nonlinear estimation. *Proceedings of the IEEE*, 92(3), 401–422. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2003.823141>
 10. Punithakumar, K. (2007). *Nonlinear filtering algorithms for multitarget tracking* [Doctoral dissertation, McMaster University]. McMaster University Digital Commons.

Khismatulin V., Sagaidachnyi V., Pelekh V. Justification of the update interval of coordinate information about the state of moving units in coordinate control systems

In train movement coordinate control systems with moving block sections, operations related to obtaining and processing coordinate information play an important role—determining the position of the train's head and its length, as well as calculating the permissible speed of the train relative to the end of the preceding train.

A spectral analysis was conducted on the components of train movement, which are influenced by the driver's control actions during normal (planned) movement, as well as by other random factors. The analysis results show that the fluctuation spectrum of the random process caused by the driver's actions is concentrated within a narrow frequency range, whereas fluctuations from other factors have a broader spectrum and lower spectral power. Therefore, when using a wide spectrum, which occurs

with a high frequency of information updates, the «weight» of useful components decreases in comparison to fluctuation components. Consequently, in order to process coordinate information while considering only the spectral components caused by the driver's actions, the frequency of information updates should be set to ensure the reconstruction of only the main part of the acceleration spectrum. A formula is provided that, in accordance with the conditions of the sampling theorem, relates the update frequency to the time constant of acceleration correlation, which is determined by the driver's control actions (the average time interval of movement with constant acceleration).

The estimated update period and frequency of coordinate information can only be used in planned (normal) situations. This is because Kalman linear algorithms are inertial and have a «memory» of the movement characteristics, the duration of which is determined by the time constant of acceleration changes. The presence of such «memory» is highly beneficial as it allows, first, for the extrapolation of the object's movement and the train situation over a corresponding time interval, predicting possible control actions. Second, thanks to inertia, the control system can continue functioning even in cases of short-term distortions or loss of measurements.

However, linear algorithms do not ensure an immediate response of the train control system in emergency situations (accidents, sudden braking, or acceleration). Therefore, in emergencies, rapid state assessment methods should be used—special nonlinear algorithms based on decision-making theory. Additionally, a sufficient distance should be maintained between moving units to prevent emergency situations.

Keywords: coordinate control systems, acceleration correlation function, spectral density, information update frequency, sampling theorem, linear state estimation algorithm.

Хісмадулін Володимир Шайдуллович, кандидат технічних наук, професор, професор кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.

<https://orcid.org/0000-0001-7578-1217>.

E-mail: khisvs@kart.edu.ua.

Сагайдачний Владислав Геннадійович, аспірант кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.

<https://orcid.org/0000-0003-2511-9852>.

E-mail: v.sahaidachnyi@kart.edu.ua.

Пелех Володимир Романович, аспірант кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.

<https://orcid.org/0009-0000-3201-4632>.

E-mail: vpeleh@gmail.com.

Khismatulin Volodymyr, Ph.D., professor, professor of the Department of automatic and computer remove control of train traffic, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

<https://orcid.org/0000-0001-7578-1217>.

E-mail: khisvs@kart.edu.ua.

Sahaidachnyi Vladyslav, postgraduate Department of automatic and computer remove control of train traffic, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

<https://orcid.org/0000-0003-2511-9852>.

E-mail: v.sahaidachnyi@kart.edu.ua.

Pelekh Volodymyr, postgraduate Department of automatic and computer remove control of train traffic, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

<https://orcid.org/0009-0000-3201-4632>.

E-mail: vpeleh@gmail.com.

Стаття надійшла 02.02.26

Стаття прийнята до друку після рецензування
14.04.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 29.05.26

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative
Commons Attribution License International CC-BY.