

Вдосконалення алгоритму обробки даних системи діагностування стану кристалізатора машини безперервного лиття заготовок

Діденко В. О., к.т.н., ORCID [0000-0003-2091-2069](https://orcid.org/0000-0003-2091-2069)

e-mail didenko.viktor@gmail.com

Бондаренко Ю. В., к.т.н., ORCID [0000-0002-1803-0684](https://orcid.org/0000-0002-1803-0684)

e-mail bondarenko.julie@gmail.com

Вербицький Є. В., к.т.н. доц., ORCID [0000-0001-7275-5152](https://orcid.org/0000-0001-7275-5152)

e-mail verbytskyi.ievgen@gmail.com

Бондаренко О. Ф., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-4276-1145](https://orcid.org/0000-0002-4276-1145)

e-mail bondarenkoaf@gmail.com

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" kpi.ua

Київ, Україна

Анотація—З метою підвищення точності діагностування несправних станів механізму хитання кристалізатора машини безперервного лиття заготовок вдосконалено алгоритм обробки даних з MEMS-акселерометрів, що забезпечує зменшення похибок вимірювання параметрів руху кристалізатора за наявності шумів у вихідних сигналах сенсорів. Здійснено імітаційне моделювання роботи запропонованого алгоритму, отримано діаграми, що ілюструють процес вимірювання параметрів руху кристалізатора та підтверджують ефективність запропонованого рішення.

Бібл. 15, рис. 4.

Ключові слова — машина безперервного лиття заготовок; кристалізатор; MEMS сенсор; система моніторингу; алгоритм роботи; діагностування.

I. Вступ

На сьогоднішній день приблизно 90 % виробництва сталевих заготовок в світі здійснюється з використанням технології безперервного лиття. Машина безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) є складною механічною системою, основою якої є кристалізатор. Він забезпечує відведення тепла від поверхневих шарів рідкого металу, що призводить до їх охолодження та затвердіння. Для запобігання прилипання металу до стінок кристалізатора останній здійснює періодичні гармонійні або несинусоїдальні коливання за технологічною віссю МБЛЗ з частотою 0,5 – 6,6 Гц, амплітудою 0 – 7 мм, коефіцієнтом несинусоїдальності 0,5 – 0,8 [1-3]¹.

Якість сталевих заготовок значною мірою залежить від точності підтримування параметрів руху кристалізатора – траєкторії, частоти та амплітуди – в межах, передбачених технологічним процесом. Відхилення цих параметрів від номінальних значень

може викликати виникнення внутрішньої неоднорідності кристалічної структури заготовок, суттєве зниження якості їх поверхні, передчасний знос деталей МБЛЗ і навіть створення критичних аварійних ситуацій із зупинкою технологічного процесу та значними матеріальними втратами [3-5]. Тому дуже важливим є своєчасне виявлення відхилень параметрів руху кристалізатора, для чого необхідно здійснювати їх періодичний контроль або постійний моніторинг за допомогою спеціальних електронних засобів діагностування [6-9].

Проте потрібно зауважити, що навіть найбільші металургійні підприємства України не оснащені відповідним обладнанням, оскільки на ринку не існує систем діагностування вітчизняного виробництва, а закордонні системи [6-8] мають дуже високу вартість, при цьому їх налагодження та сервісне обслуговування в Україні вимагає залучення іноземних консультантів від фірм-виробників, що також пов'язано зі значними витратами. До того ж інтегру-

¹ Публікація містить результати досліджень, проведених при грантовій підтримці Державного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом Ф83/106-2018



вання іноземних інформаційно-вимірювальних систем в структуру автоматизованих систем управління технологічними процесами вітчизняних металургійних підприємств завжди потребує їх узгодження за рівнями сигналів, інтерфейсами та ін.

Автори даної роботи мають досвід з розробки прототипу апаратно-програмного комплексу діагностування стану механізму хитання кристалізатора [9-11], випробування якого в умовах реального виробництва підтвердило його високі технічні характеристики, а також показало можливості та шляхи для його вдосконалення.

Метою даної роботи є вдосконалення алгоритму роботи прототипу системи діагностування стану кристалізатора машини безперервного лиття заготовок в напрямку зменшення впливу шумів використовуваних сенсорів на точність її функціонування.

II. СТРУКТУРА ТА ПРИНЦИП РОБОТИ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ

Структурна схема апаратно-програмного комплексу, який було розроблено авторами, показана на рис. 1, де скороченнями позначені наступні блоки: BM1-BM4 – вимірювальні модулі, до складу яких входять С1-С4 – сенсори прискорень, МК1-МК4 – мікроконтролери, МПІ1-МПІ4 – модулі перетворення інтерфейсів UART в RS485; БПІ – блок перетворення інтерфейсів RS485 в USB; ПК/УІ – персональний комп'ютер з інтерфейсом користувача програмного забезпечення (UI – user interface).

Вимірювальні модулі, використані в розробці, побудовані на базі готових плат STM32F3DISCOVERY, де як сенсори застосовані MEMS (мікроелектромеханічні) давачі прискорення. Вибір обґрунтований високими показниками точності та мініатюрними розмірами останніх в порівнянні з давачами прискорень інших типів [9]. Необхідність застосування модулів перетворення інтерфейсів UART в RS485 пояснюється можливістю багатоканальної обробки даних, яку надає інтерфейс RS485. Перетворення інтерфейсів RS485 в USB за допомогою відповідного блоку забезпечує можливість передачі даних до віддалених вузлів керування.

Алгоритм функціонування апаратно-програмного комплексу, наведений в [11], включає наступні дії.

До початку вимірювань сенсори розміщують в чотирьох кутових контрольних точках на поверхні кристалізатора. Після запуску системи з метою врахування в подальших обчисленнях можливого нахилу сенсорів при установці виконується визначення початкових статичних прискорень по осях X, Y, Z, які є проєкціями прискорення вільного падіння g кожного сенсора.

Далі з метою оптимального використання шкали вимірювань виконується автоматичне калібрування вимірювальних модулів BM1-BM4, в результаті чого здійснюється налаштування нульових рівнів для осей X, Y, Z кожного сенсора і підбір коефіцієнтів підсилення сигналів.

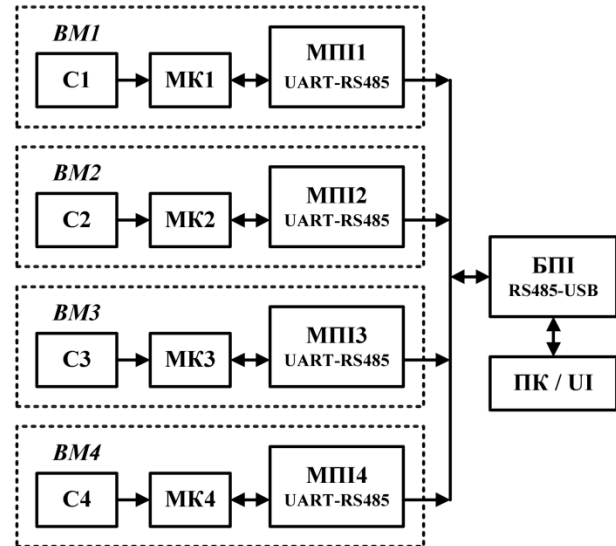


Рис.1 Структурна схема апаратно-програмного комплексу діагностування технічного стану кристалізатора.

Після калібрування за допомогою BM1-BM4 проводяться вимірювання прискорень зі встановленою частотою опитування, і отримані дані передаються в ПК. Процедура завершується, коли кількість проведених вимірювань досягає заданого значення.

Наступний етап – обробка результатів вимірювань та розрахунок траєкторії переміщення кристалізатора. Обчислення значень переміщення здійснюється шляхом подвійного інтегрування безпосередньо вимірюваних значень прискорення. Для забезпечення коректного інтегрування попередньо визначаються початкові умови. Щоб уникнути накопичення помилки інтегрування, робиться прив'язка до характерних моментів часу на кривих прискорення, швидкості та переміщення. З огляду на те, що хитання кристалізатора є періодичними, зручно виконати прив'язку до періоду (або половини періоду) хитань, тоді в моменти часу, кратні періоду, початкові умови при інтегруванні можна вважати нульовими. Період хитань обчислюється з використанням функції середнього значення різниці із завданням такої кількості відліків, в якій гарантовано розміщується два або більше періодів хитання [3]:

$$d(mT_2) = \sum_{m=0}^j \frac{1}{k_{pr}} (u_q[nT_2] - u_q[(n+m)T_2]), \quad (1)$$

де j – кількість значень у виборці, поділена на 2; $u_q[nT_2]$ – решітчаста функція оцифрованих значень прискорень руху; T_2 – інтервал дискретизації, що визначається характеристиками сенсора та трактом передачі даних; k_{pr} – коефіцієнт пропорційності між виміряним прискоренням руху та його оцифрованим значенням.

Після обчислення періоду коливань виконується інтегрування, в результаті якого розраховуються масиви значень швидкостей та переміщень [11]. Інтегрування проводиться за методом прямокутників:

$$v_c[(n+1)T_2] = v_c[nT_2] + \frac{u_q[(n+1)T_2] \cdot T_2}{k_{pr}}, \quad (2)$$

$$x_c[(n+1)T_2] = x_c[nT_2] + v_c[(n+1)T_2] \cdot T_2 \quad (3)$$

де $v_c[nT_2]$ – обчислена швидкість на n -му дискретному відліку; $x_c[nT_2]$ – обчислена координата точки на n -му дискретному відліку.

Необхідно зауважити, що стіл кристалізатора є жорсткою прямокутною плитою, деформації якої можна не враховувати при визначенні його положення в просторі. Отже, достатньо використовувати інформацію з трьох вимірювальних модулів ВМ1-ВМ3 відповідно про положення трьох точок на поверхні кристалізатора. Інформація з четвертого модуля ВМ4 є надмірною і застосовується для перевірки коректності визначення траєкторії руху. Перевірка виконується шляхом порівняння фактично виміряної траєкторії руху четвертої точки на поверхні кристалізатора і теоретично розрахованої на підставі виміряних переміщень трьох інших точок.

Графічне зображення виміряних і розрахованих даних здійснюється у вигляді двовимірних діаграм, а також у вигляді динамічної тривимірної моделі кристалізатора із позначенням траєкторій переміщення чотирьох точок на його поверхні.

Таким чином, в описаному алгоритмі реалізовано наступні процедури для підвищення точності вимірювань: оптимізація вимірювальної шкали, врахування початкових умов, мінімізація похибок інтегрування, перевірка коректності результатів вимірювань. Проте слід зазначити, що в алгоритмі не враховано ще один важливий фактор, здатний істотно вплинути на точність вимірювання параметрів руху кристалізатора – наявність у вихідному сигналі акселерометрів власних шумів. Необхідність підвищення точності вимірювань вимагає застосування спеціальних заходів, направлених на зниження впливу шумів у сигналах акселерометрів.

III. ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ РОБОТИ СИСТЕМИ

З метою зниження впливу рівня власних шумів акселерометрів пропонується вдосконалити алгоритм роботи описаної системи діагностування шляхом включення в нього процедури фільтрації сигналів, яку слід виконувати перед початком обробки результатів вимірювання.

Для здійснення фільтрації доцільним представляється застосування фільтру Калмана, оскільки основною його перевагою порівняно з іншими методами фільтрації є рекурентне обчислення оцінок з використанням на кожному кроці даних тільки двох спостережень [12-14].

Рівняння руху кристалізатора у просторі змінних стану має вигляд:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (4)$$

де x – вектор змінних стану (прискорення, швидкість, переміщення); u – сигнал керування.

Процес вимірювання первинних даних акселерометрами описується рівнянням, що враховує наявність вимірювального шуму:

$$y = Cx + z, \quad (5)$$

де C – матриця виходу, z – шум вимірювання.

Оскільки подальша обробка даних із сенсорів виконується мікропроцесорними пристроями в ПК, для синтезу фільтру Калмана рівняння (4) та (5) потрібно записати у вигляді різницевих рівнянь [15]:

$$x[k+1] = (TA+1)x[k] + TBu[k] + w[k], \quad (6)$$

$$y[k] = Cx[k] + z[k], \quad (7)$$

де T – період квантування сигналу за часом у мікропроцесорному обчислювальному пристрої, $w[k]$ – шум процесу.

Для запису виразу (6) у просторі змінних стану, подібно (4), використаємо наступні позначення:

$$A' = TA + 1, \quad (8)$$

$$B' = TB. \quad (9)$$

На основі рівнянь (6), (7) та з урахуванням (8), (9) рівняння визначення змінних стану за допомогою фільтру Калмана записується у вигляді [14]:

$$\tilde{x}[k+1] = A'\tilde{x}[k] + B'u[k] + K[k](y[k] - Cx[k]), \quad (10)$$

де $\tilde{x}[k]$ – результат оцінки фільтром Калмана вектору $x[k]$ змінних стану процесу; $K[k]$ – матриця коефіцієнтів підсилення Калмана.

Остання розраховується наступним чином [14]:

$$K[k] = A'P[k]C^T (CP[k]C^T + S_z)^{-1}, \quad (11)$$

де $P[k]$ – коваріаційна матриця похибок оцінювання; S_z – коваріаційна матриця шуму вимірювання.

Коваріаційна матриця похибок оцінювання на $k+1$ кроці обчислення визначається виразом [14]:

$$P[k+1] = A'P[k]A'^T + S_w - A'P[k]C^T S_z^{-1} CP[k]A'^T, \quad (12)$$

де S_w – коваріаційна матриця шуму процесу.

На першому кроці обчислень коваріаційна матриця похибок оцінювання приймає значення шуму процесу, далі обчислення проходять у відповідності з (12) [14]. Сукупність рівнянь (10) – (12) визначає процедуру зниження рівня власних шумів акселерометрів на основі фільтру Калмана.

Отже, алгоритм функціонування апаратно-програмного комплексу діагностування технічного стану кристалізатора із вдосконаленою за рахунок використання фільтру Калмана процедурою обчислення швидкості руху та переміщення виглядатиме як показано на рис. 2.



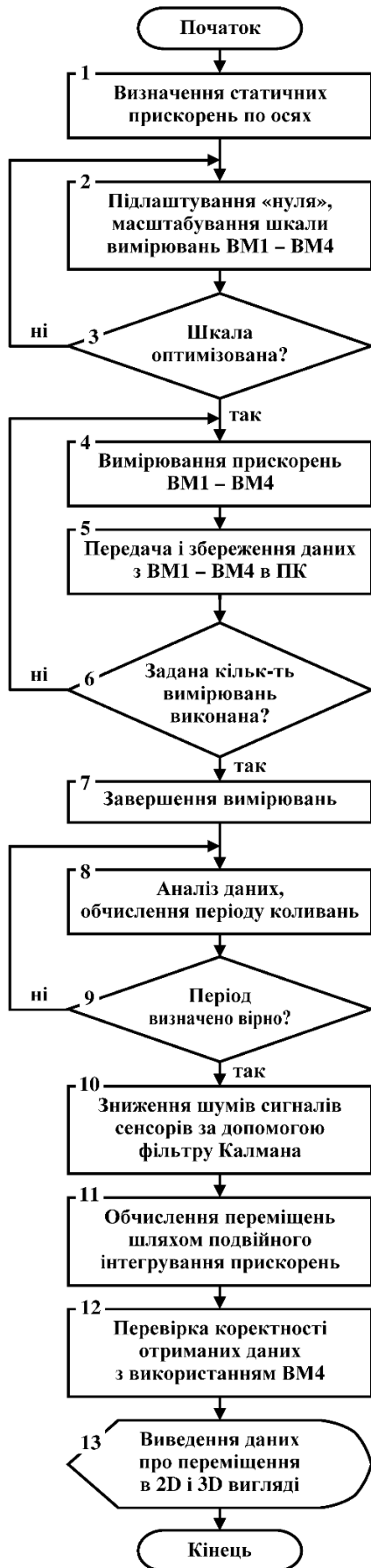


Рис. 2 Алгоритм роботи системи діагностування.

Для перевірки ефективності застосування фільтру Калмана було проведено імітаційне моделювання процесу руху кристалізатора у середовищі MATLAB®. При цьому було задано гармонійний закон руху з амплітудою 3 мм і частотою 2 Гц. Результати моделювання представлено на рис. 3 та рис. 4.

З рисунків видно, що вихідний сигнал акселерометра містить істотну шумову складову (рис. 3), тоді як в отриманому сигналі переміщення вона є значно меншою (рис. 4).

В кількісному відношенні параметр сигнал/шум (SNR) для вихідного сигналу акселерометра складає 13,9 Дб, а для фільтрованого та інтегрованого сигналу 38,7 Дб. Тоді як без застосування фільтру SNR інтегрованого сигналу складає лише 25,94 Дб. Тобто підвищення підсилення з фільтром Калмана дорівнює близько 25 Дб.

Потрібно зауважити, що повністю усунути шумову компоненту неможливо, оскільки за найменшого відхилення траєкторії руху від синусоїдальної низькочастотні гармоніки потрапляють в робочу область спектру переміщень кристалізатора. Проте можливо є мінімізація шуму шляхом проведення декількох ітерацій налаштувань початкових значень коваріаційних матриць шуму вимірювання та процесу.

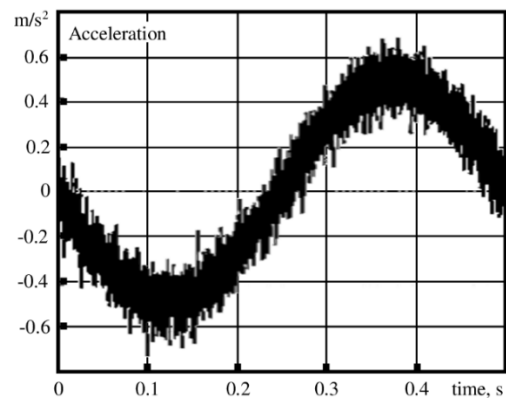


Рис. 3 Сигнал прискорення, виміряний сенсором.

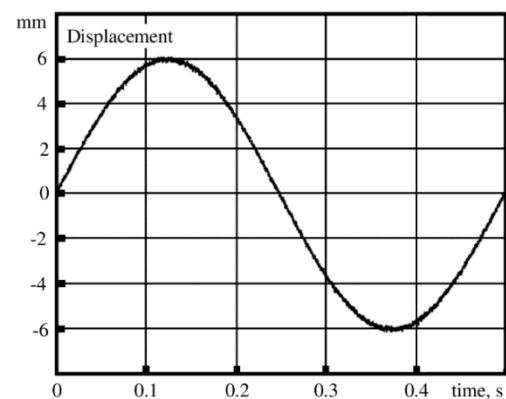


Рис. 4 Сигнал переміщення після фільтрації та інтегрування.

ВИСНОВКИ

Таким чином, результати імітаційного моделювання підтвердили ефективність застосування фільтру Калмана в алгоритмі функціонування системи діагностування стану кристалізатора машини безперервного лиття заготовок. Завдяки вдосконаленню алгоритму шляхом введення в нього процедури фільтрації вдалося суттєво зменшити шумові складові в оцінених значеннях швидкостей руху та переміщень, що, відповідно, надає можливості для підвищення точності вимірювань.

В подальших роботах планується розвинути даний підхід шляхом його поєднання з машинним навчанням, що дозволить зробити систему максимально ефективною.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] L. Liu, Y. Dun, Y. Fang, and G. Li, "Modeling and verification of the nonlinear system of oscillation platform of continuous casting mold driven by servo motor," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 8, no. 7, pp. 1–9, Jun. 2016. DOI: [10.1177/1687814016656294](https://doi.org/10.1177/1687814016656294)
- [2] A. N. Smirnov, O. V. Antykuz, A. Y. Tsuprun, and V. M. Pil'gaev, "Some approaches to choosing rational mold oscillation parameters," *Russ. Metall.*, vol. 2008, no. 8, pp. 700–705, Dec. 2008. DOI: [10.1134/S0036029508080119](https://doi.org/10.1134/S0036029508080119)
- [3] A. N. Smirnov, S. V. Kuberskii, A. L. Podkorytov, V. E. Ukhin, A. V. Kravchenko, A. Yu. Orobtssev, *Nepreryvnaya razlivka sortovoy zagotovki* [Continuous casting of billet]. Alchevsk: DonGTU, 2012.
- [4] J. Cibulka, R. Krzok, R. Hermann, D. Bocek, J. Cupek, and K. Michalek, "Impact of Oscillation Parameters on Surface Quality of Cast Billets," *Arch. Metall. Mater.*, vol. 61, no. 1, pp. 283–288, Mar. 2016. URL: http://www.imim.pl/files/archiwum/Vol1_2016/53.pdf
- [5] M. Vynnycky, S. Saleem, K. M. Devine, B. J. Florio, S. L. Mitchell, and S. B. G. O'Brien, "On the formation of fold-type oscillation marks in the continuous casting of steel," *R. Soc. Open Sci.*, vol. 4, no. 6, p. 170062, Jun. 2017. DOI: [10.1098/rsos.170062](https://doi.org/10.1098/rsos.170062)
- [6] "Mould Oscillation Measuring System KS473/KHM," 2004. [Online]. Available: <https://www.mmfd.de/pdf9-1.pdf>. [Accessed: 01-Dec-2018].
- [7] "OsciMon Exact mold oscillation for perfect casting products," 2015. [Online]. Available: https://www.primetals.com/fileadmin/user_upload/content/01_portfolio/15_Lifecycle-services/15_2_Diagnostic-systems/OsciMon.pdf. [Accessed: 01-Dec-2018].
- [8] "KT400 FieldMOMS Portable Mold Oscillation Monitoring System," 2019. [Online]. Available: <https://www.kisstechologies.com/wp-content/uploads/2019/03/KT400-ProductSheet-Final.pdf>. [Accessed: 01-Apr-2019].
- [9] V. A. Didenko, A. F. Bondarenko, A. N. Poleno, "Obzor sredstv kontrolya trayektorii dvizheniya kristallizatora MNLZ [An overview of the means of controlling the trajectory of the motion of the crystallizer MNLZ]," in *Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference "Modern Information and Electronic Technologies (CITI)"*, 2014, pp. 58–59.
- [10] O. F. Bondarenko and V. O. Didenko, "The system of estimation of the state variables for PWM converter control in the structure of mold oscillation mechanism," *Electron. Commun.*, vol. 21, no. 5, pp. 14–19, Nov. 2016. DOI: [10.20535/2312-1807.2016.21.5.81934](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2016.21.5.81934)
- [11] O. M. Polieno, O. F. Bondarenko, V. O. Didenko, "Matematychna model' obrobky danykh v systemi monitorynhu parametriv khytannya krystalizatora mashyny bezpererвноho lyttya zahotvok [Mathematical model of data processing in the system of monitoring the parameters of the rolling machine crystallization machine of continuous casting of billets]," *Bulletin of the National Technical University "KhPI" collection of scientific works, thematic issue "New solutions in modern technologies"*, no. 18(991), pp. 70–76, 2013. URI: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/7963>
- [12] B. Panomruttanarug and R. W. Longman, "The Advantages and Disadvantages of Kalman Filtering in Iterative Learning Control," *Adv. Astronaut. Sci.*, vol. 130, pp. 347–365, 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/289723787_The_advantages_and_disadvantages_of_kalman_filtering_in_iterative_learning_control
- [13] R. Kalman, P. Falb, M. Arbib, *Ocherki po matematicheskoy teorii sistem* [Essays on the mathematical theory of systems], 2nd ed. Moscow: Editioal URSS, 2004.
- [14] D. Simon, "Kalman filtering," *Embed. Syst. Program.*, vol. 14, no. 6, pp. 72–79, 2001.
- [15] N. T. Kuzovkov *Modal'noye upravleniye i nablyudayushchiye ustroystva* [Modal control and monitoring devices]. Moscow: Mashynostroenie, 1976.

Надійшла до редакції 18 грудня 2018 р.



Усовершенствование алгоритма обработки данных системы диагностирования состояния кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок

Диденко В. А., к.т.н., ORCID [0000-0003-2091-2069](https://orcid.org/0000-0003-2091-2069)

e-mail didenko.viktor@gmail.com

Бондаренко Ю. В., к.т.н., ORCID [0000-0002-1803-0684](https://orcid.org/0000-0002-1803-0684)

e-mail bondarenko.julie@gmail.com

Вербицкий Е. В., к.т.н. доц., ORCID [0000-0001-7275-5152](https://orcid.org/0000-0001-7275-5152)

e-mail verbytskyi.ievgen@gmail.com

Бондаренко А.Ф., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-4276-1145](https://orcid.org/0000-0002-4276-1145)

e-mail bondarenkoaf@gmail.com

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" kpi.ua

Киев, Украина

Аннотация—С целью повышения точности диагностирования неисправных состояний механизма качания кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок усовершенствован алгоритм обработки данных с MEMS-акселерометров, что обеспечивает уменьшение ошибок измерения параметров движения кристаллизатора при наличии шумов в выходных сигналах сенсоров. Выполнено имитационное моделирование работы предложенного алгоритма, получены диаграммы, которые иллюстрируют процесс измерения параметров движения кристаллизатора и подтверждают эффективность предложенного решения.

Библ. 15, рис. 4.

Ключевые слова — машина непрерывного литья заготовок; кристаллизатор; MEMS сенсор; система мониторинга; алгоритм работы; диагностирование.



UDC 681.518.22: 681.518.3: 681.518.5

Improvement of the Data Processing Algorithm for Diagnostic System of the State of Continuous Casting Machine Mold

V. O. Didenko, PhD, ORCID [0000-0003-2091-2069](https://orcid.org/0000-0003-2091-2069)

e-mail didenko.viktor@gmail.com

Yu. V. Bondarenko, PhD, ORCID [0000-0002-1803-0684](https://orcid.org/0000-0002-1803-0684)

e-mail bondarenko.julie@gmail.com

Ye. V. Verbytskyi, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0001-7275-5152](https://orcid.org/0000-0001-7275-5152)

e-mail verbytskyi.ievgen@gmail.com

O. F. Bondarenko, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0002-4276-1145](https://orcid.org/0000-0002-4276-1145)

e-mail bondarenkoaf@gmail.com

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" kpi.ua
Kyiv, Ukraine

Abstract—The paper is devoted to solving the task of creating the prototype of effective diagnostic system of the state of continuous casting machine mold used in iron and steel works. The relevance of the task is explained by the high cost of known similar systems of foreign production and of their maintenance as well. In addition, there are some technical complications of those systems integration into the equipment of local metallurgy enterprises. The authors have experience of designing the diagnostic systems of such kind, which were tested in several Ukrainian iron and steel works and showed satisfactory results. This work is aimed to improving the technical characteristics of the prototype of diagnostic system of the state of continuous casting machine mold designed by the authors, in order to increase the accuracy of diagnosing malfunctions of the oscillating mechanism of the mold. The state of the mold oscillating mechanism is evaluated by measuring the deviation of its movement trajectory from the reference signal. In the paper, the structure and operation principle of the diagnostic system prototype are shown and substantiated. The mathematical basics for processing data from the sensors used in the system, MEMS accelerometers, are represented. The procedures for improving the accuracy of measurements the mold movement parameters are described. The noise in the output signals of the sensors is defined as an undesirable factor to eliminate because of its effect on the accuracy of measurements. The Kalman filtering is suggested for decreasing the noise in the output signals of MEMS accelerometers. The filtering implementation is described mathematically. The improved algorithm including Kalman filtering for processing data from MEMS accelerometers, that reduces the measurement errors of the parameters of the mold movement under conditions of noise in the output signals of the sensors is represented. The simulation of the suggested algorithm is performed; the diagram of the sensor output noisy signal of acceleration and the diagram of filtered and integrated signal of displacement illustrating the processes of measuring the parameters of the mold movement and processing the measured data are obtained. The results of the simulation confirmed the effectiveness of the proposed solution. The application of Kalman filtering makes it possible to improve the signal-to-noise ratio from 13.9 dB to 38.7 dB, what is about 25 dB increase, that respectively gives the opportunities to increase the accuracy of mold movement trajectory measurements. In the future works, it is planned to develop this approach by combining it with machine learning, which is able to make the system as effective as possible.

Ref. 15, fig. 4.

Keywords — continuous casting machine; mold; MEMS sensor; monitoring system; operation algorithm; diagnosing.

