

Олексій ЛАСТОВЕЦЬКИЙ, Олександр СМЕЦЬ, Сергій ЧУПРИКОВ, Олександр БОНДАРЕНКО

Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського
E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

АПАРАТНА ЧАСТИНА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ РУХУ МЕХАНІЗМУ ХИТАННЯ

Розроблено багатовузлову систему вимірювання коливальних рухів кристалізатора машини безперервного лиття заготовок на основі мікроконтролерів STM32 з MEMS-акселерометрами та MEMS-гіроскопами. Для обміну даними між вузлами застосовано інтерфейс RS-485, а синхронізоване опитування датчиків здійснюється з частотою 100 Гц. Створений прототип системи забезпечує реєстрацію прискорень і кутових швидкостей у форматі, придатному для інженерної обробки. Отримані рішення можуть бути використані для моніторингу хитання кристалізатора, дослідження коливальних процесів у різних виробничих механізмах, створення бази даних для побудови “цифрового двійника” та як навчально-дослідний стенд.

Ключові слова: механізм хитання, кристалізатор, безперервна розливка, MEMS, акселерометр, гіроскоп, мікроконтролер, моніторинг параметрів руху, інтерфейс RS-485.

На сучасних промислових виробництвах безперервно зростають вимоги до характеристик технологічного обладнання, зокрема його надійності та керованості. Запровадження постійного моніторингу та автоматизованого регулювання виробничих процесів у реальному часі, використання “цифрових двійників” технологічних об’єктів є обов’язковими складовими переходу до концепції «Промисловість 4.0» [1].

Для металургійних виробництв, де відхилення параметрів руху окремих механізмів безпосередньо впливають на якість продукції, ресурс технологічних вузлів та безпеку експлуатації агрегатів, організація постійного моніторингу технологічних процесів є критично важливою.

Одним із ключових процесів сучасного металургійного виробництва є безперервне лиття заготовок, у межах якого реалізується фазовий перехід металу з рідкого стану в твердий [2]–[4]. В забезпеченні правильного затвердіння поверхневого шару злитку та запобіганні утворенню поверхневих та внутрішніх дефектів надзвичайно важливою є роль кристалізатора — частини машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) [5]–[7]. Конструктивно він складається з чотирьох масивних плит, розташованих вертикально по периметру рами кристалізатора, які формують його стінки. Саме тут відбувається початкова кристалізація поверхні металевого злитку (рис. 1). Сучасні кристалізатори слябових МБЛЗ дозволяють змінювати ширину заготовки безпосередньо в процесі лиття завдяки переміщенню вузьких стінок гідравлічними приводами. Запобігти прилипанню утворюваної скоринки металу до стінок дозволяє спеціальний механізм, який забезпечує безперервне хитання кристалізатора, задаючи періодичні коливання спеціальної

форми вздовж технологічної осі МБЛЗ. Відхилення амплітуди, частоти та форми коливань кристалізатора від регламентованих значень, поява додаткових вібрацій, люфтів або перекосів призводить до зростання кількості бракованих заготовок, підвищеного зносу механізмів, а також ризику тривалих зупинок виробництва через серйозні аварії, пов’язані з проривом оболонки формованого злитку та розливом розплавленого металу. Тому своєчасне виявлення змін параметрів руху кристалізатора є надважливим завданням його технічної діагностики [2]–[7].

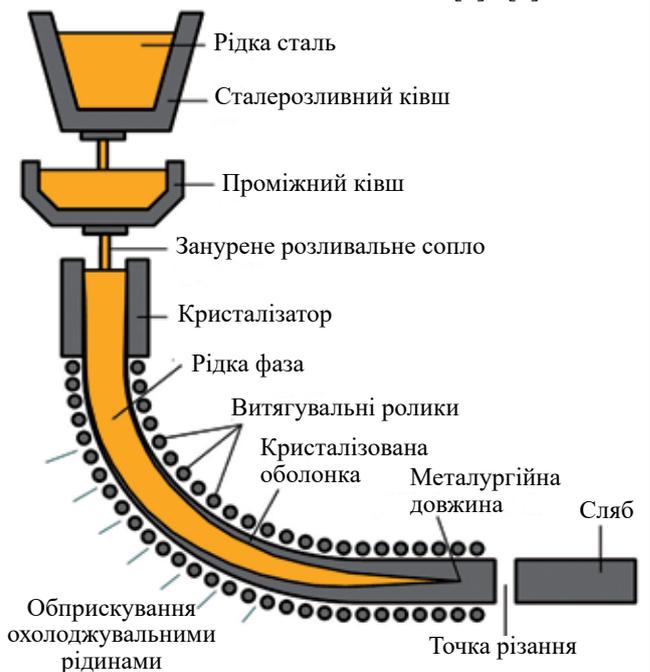


Рис. 1. Структура машини безперервного лиття заготовок

Традиційні засоби контролю руху кристалізатора в металургійних установках ґрунтуються переважно на застосуванні окремих давачів переміщення, тензометричних, індуктивних давачів або віброперетворювачів у вибраних точках механізму хитання. Такі системи мають значні габарити, потребують складної кабельної інфраструктури, здатні забезпечувати вимірювання в обмеженій кількості точок, причому зазвичай це лише епізодичні вимірювання під час сервісної зупинки технологічного циклу. Спеціалізовані вібродіагностичні комплекси для МБЛЗ виробляються закордонними компаніями, є достатньо коштовними, мають закриту схемотехніку та програмне забезпечення, до того ж потребують участі закордонних спеціалістів для їх адаптації під конкретне металургійне обладнання, інтеграції в наявні системи керування та періодичного сервісного обслуговування [8], [9]. Все це стримує широке впровадження повноцінного моніторингу стану металургійного обладнання.

Перспективним підходом до розв’язання задач моніторингу руху кристалізатора є використання мікроелектромеханічних систем (MEMS) [8]–[10] — малогабаритних акселерометрів і гіроскопів, інтегрованих у мікроконтролерні платформи. MEMS-давачі характеризуються малими розмірами, низьким енергоспоживанням, достатнім частотним діапазоном і можливістю безпосередньої інтеграції в цифрові системи, тому очікується, що поєднання їх з мікроконтролерами та промисловими інтерфейсами дозволить створити ефективні багатовузлові вимірювальні мережі з широким функціоналом, придатні для роботи в умовах металургійного виробництва.

Метою цієї роботи є розробка прототипу багатовузлового вимірювального комплексу для постійного моніторингу параметрів коливального руху кристалізатора машини безперервного лиття заготовок на основі сучасних MEMS-давачів, мікроконтролерних вузлів і промислових інтерфейсів. В перспективі він може стати основою для створення цифрового “двійника” кристалізатора — його цифрової моделі, заснованої на значному масиві даних, отриманих у ході вимірювань низки показників стану реального об’єкта. Використання такого “двійника” дозволить ефективно прогнозувати та оптимізувати роботу системи.

Закон коливального руху кристалізатора МБЛЗ

Відомо, що основні умови формування структури металу та поверхні заготовки в процесі роботи МБЛЗ визначаються характером зворотно-поступального руху кристалізатора [2]–[7], який задається системою керування механізмом хитання [9].

Базовим законом, що використовується для математичного опису коливального руху кристалізатора, є синусоїдальний закон. Втім, дослідження впливу закону коливання кристалізатора на якість металевих заготовок, показали, що застосування закону руху з

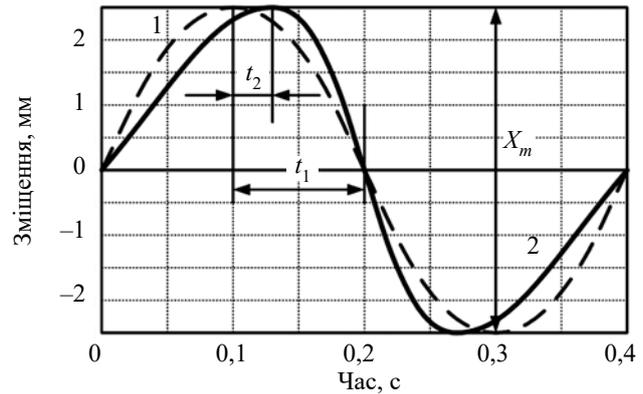


Рис. 2. Синусоїдальний (1) та несинусоїдальний (2) закони руху кристалізатора

певним коефіцієнтом несинусоїдальності (рис. 2) дозволяє покращити якість заготовок, зокрема зменшити глибину поверхневих слідів хитання приблизно на 30% [2]. Такий закон хитання описується виразом:

$$x(t) = \begin{cases} X_m \cdot \sin\left(\frac{\omega t}{2k}\right), & t \in [0; t_1]; \\ X_m \cdot \cos\left(\frac{\omega t - \pi k}{2 - 2k}\right), & t \in [t_1; t_2]; \\ -X_m \cdot \cos\left(\frac{\omega t - 2\pi + \pi k}{2k}\right), & t \in [t_2; T], \end{cases} \quad (1)$$

де X_m — амплітуда коливання;

k — коефіцієнт несинусоїдальності;

T — період коливань;

ω — кутова частота;

t_1, t_2 — межі часових інтервалів, $t_1 = kT/2$; $t_2 = T - t_1$.

Перевага несинусоїдального закону коливань кристалізатора над гармонійним полягає у розширених можливостях керування кінематичними параметрами процесу. На відміну від синусоїдальної траєкторії, за якої швидкісні характеристики руху кристалізатора є жорстко визначеними формою гармонічного сигналу, несинусоїдальний режим дозволяє регулювати швидкість руху незалежно на окремих ділянках циклу. Це забезпечує цілеспрямоване формування періоду негативного ковзання T_n (negative strip time), зокрема його збільшення, без необхідності підвищення амплітуди або зниження частоти коливань. У результаті оптимізуються умови контакту між оболонкою зливка та стінками кристалізатора, зменшення сил тертя, покращення умов змачування шлаковою плівкою та зниження ризику виникнення аварійних ситуацій типу “прилипання” (sticker breakout) [2].

Крім того, несинусоїдальний режим сприяє зменшенню глибини осциляційних міток і, відповідно, підвищенню якості поверхні заготовки. Важливою перевагою є також можливість адаптації параметрів хитання до змін швидкості розливання та технологічних умов без порушення стабільності процесу.

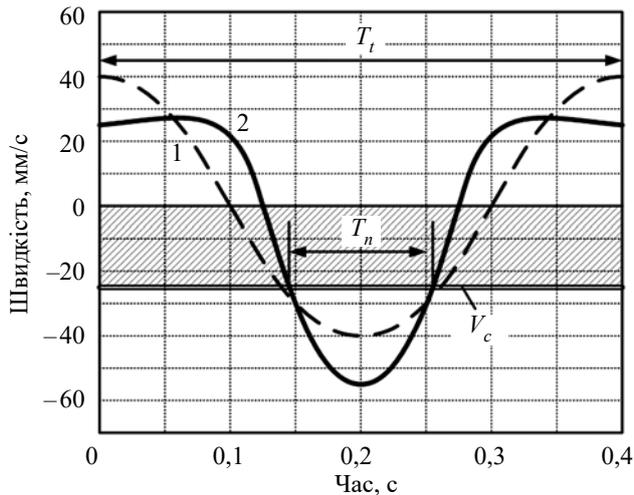


Рис. 3. Зміна швидкості вертикального руху кристалізатора у часі при синусоїдальному 1 та несинусоїдальному 2 (ступінь відхилення $\alpha = 24\%$) законах відносно швидкості витягування $V_c = 1,45$ м/хв

На рис. 3 наведено залежність швидкості вертикального руху кристалізатора від часу протягом одного циклу його коливання. Горизонтальна лінія, позначена як V_c , відповідає швидкості витягування (швидкості безперервного лиття) заготовки, тобто швидкості її переміщення вниз із кристалізатора. Порівняння миттєвої швидкості кристалізатора з цією величиною дозволяє оцінити характер їхнього відносного руху в різні фази циклу. Зокрема, форма закону коливань визначає, в які інтервали часу кристалізатор рухається швидше або повільніше за заготовку, що безпосередньо впливає на умови контакту між оболонкою злитка та стінками кристалізатора.

Теоретичний крок слідів хитання P (*oscillation marks*) визначається співвідношенням між швидкістю лиття V_c та частотою f коливань кристалізатора:

$$P = V_c / f. \quad (2)$$

Заштрихована область на графіку відповідає інтервалу негативного ковзання T_n , протягом якого кристалізатор рухається вниз зі швидкістю, що перевищує швидкість витягування заготовки. У цей період відбувається відносне розвантаження контакту між оболонкою та стінкою кристалізатора, формується мастильний зазор, заповнений шлаковою плівкою, що зменшує сили тертя та запобігає прилипанню. Повний період коливань T_t характеризує тривалість одного циклу руху та визначає частоту роботи механізму хитання.

Вимірювальні системи для контролю режиму хитання кристалізатора

У сучасних МБЛЗ для контролю режиму хитання кристалізатора застосовуються як вбудовані засоби вимірювання в складі систем керування, так і спеціалізовані автономні вимірювальні комплекси. Найпоширенішими є системи, в яких використову-

ються датчі переміщення або акселерометричні перетворювачі. Розглянемо декілька прикладів.

Промислову систему контролю параметрів хитання Mould Oscillation Measuring System KS473/КНМ побудовано на п'єзоелектричному акселерометрі, що забезпечує високу точність визначення переміщення кристалізатора (не менш ніж $\pm 0,1$ мм) інтегруванням сигналів прискорення. Конструктивне виконання датча дозволяє проводити вимірювання як на холостому ході МБЛЗ, так і безпосередньо під час лиття. Втім за допомогою системи KS473/КНМ можна контролювати рух лише в одній точці, що є істотним недоліком, оскільки це унеможливує оцінювання перекосів, крутильних коливань та просторової неоднорідності руху кристалізатора.

Більш розвиненим рішенням є промислова система SIMETAL OscMon (Siemens), призначена для високоточного моніторингу режиму хитання кристалізатора. В ній використовується чотири тривісні акселерометри, розміщені по кутах столу хитання, що дозволяє одночасно реєструвати рух у кількох точках. SIMETAL OscMon забезпечує високу повторюваність і стабільність вимірювань та інтегрується у загальну систему автоматизації МБЛЗ. Недоліком системи є закритість інформації щодо типу застосованих датчів, алгоритмів обробки сигналів і формату вихідних даних, що не дозволяє розширювати функціонал системи, адаптувати її під потреби конкретного виробництва на місці, використовувати отримані дані для розробки й удосконалення власних алгоритмів керування.

Аналогічну концепцію реалізовано у портативній системі KT400 FieldMOMS з чотирма тривісними акселерометрами для контролю параметрів хитання кристалізатора. Система орієнтована на сервісні та діагностичні вимірювання та дозволяє швидко отримати інформацію про амплітуду та частоту коливань. Разом з тим, FieldMOMS є автономним закритим рішенням, яке не передбачає прямої інтеграції у контури керування та не забезпечує доступу до первинних вимірюваних даних у зручному для подальшої обробки вигляді.

Окрему групу становлять стаціонарні системи, що інтегруються безпосередньо в гідравлічні або електромеханічні приводи механізму хитання. Такі рішення передбачають контроль руху за допомогою датчів положення штоків або елементів приводу, а не безпосередньо кристалізатора. Це обмежує інформативність вимірювань, оскільки реальний рух кристалізатора може відрізнятися від розрахункового через люфти, пружні деформації та зношування механізмів. Короткий опис особливостей, переваг та недоліків усіх згаданих систем наведено в табл. 1.

Таким чином, аналіз існуючих систем показує, що частина з них забезпечує вимірювання в обмеженій кількості точок, а решта є закритими промис-

Порівняння існуючих систем контролю руху кристалізатора МБЛЗ та запропонованої системи

Система	Вимірювані параметри; кількість точок контролю	Тип давачів	Основні переваги	Основні недоліки / обмеження
KS473/КНМ	Прискорення, переміщення (після інтегрування); 1 точка	П'єзоелектричний акселерометр	Висока точність у контрольній точці, можливість вимірювань під час лиття	Контроль лише в одній точці, неможливість оцінки перекосів і крутильних коливань, обмежена інформативність
SIMETAL OsciMon (Siemens)	Прискорення, частотні характеристики руху; 4 точки (по кутах кристалізатора)	Тривісні акселерометри	Комплексний контроль руху, промислова надійність, інтеграція з АСУ ТП	Закрита архітектура, відсутність доступу до первинних даних, обмежені можливості адаптації алгоритмів
KT400 FieldMOMS	Прискорення, параметри хитання; 4 точки	Тривісні акселерометри	Портативність, швидке розгортання, зручність сервісних вимірювань	Орієнтація на періодичні вимірювання, відсутність інтеграції в контури керування, закритий формат даних
Стаціонарні системи на базі давачів положення приводу	Переміщення елементів приводу; 1–2 точки	Індуктивні / лінійні давачі	Простота реалізації, надійність у жорстких умовах	Непрямої спосіб вимірювання параметрів руху кристалізатора, низька чутливість до паразитних коливань
Запропонована багатовузлова система	Лінійні прискорення та кутові швидкості кристалізатора; 4 і більше точок (масштабується)	MEMS-акселерометри та MEMS-гіроскопи	Просторово-розподілений контроль, пряме вимірювання крутильних складових, первинна обробка на вузлах, відкрита архітектура, завадостійкий інтерфейс RS-485	Необхідність калібрування MEMS-давачів, необхідність розроблення та супроводу власного програмного забезпечення

ловими рішеннями з обмеженим доступом до вимірюваних даних. Жодна з розглянутих систем не забезпечує одночасну реєстрацію необхідного набору інерційних параметрів руху (лінійні прискорення та кутові швидкості) у кількох просторово рознесених точках та не має відкритої архітектури, придатної для гнучкої інтеграції в системи керування, яка б надавала можливості для розширення функціоналу та розвитку алгоритмів керування. Очевидно, що це зумовлює необхідність розроблення системи безперервного моніторингу руху кристалізатора МБЛЗ з високою точністю вимірювання, широкими функціональними можливостями та відкритою архітектурою.

Вимоги до системи моніторингу руху кристалізатора МБЛЗ

Як вже було зазначено, відхилення фактичного закону руху кристалізатора МБЛЗ від заданого, поява паразитних коливань або зміна амплітуди й частоти коливань безпосередньо впливають на формування тонкої твердої оболонки заготовки й підвищують ризик утворення тріщин та проривів металу. Характерною особливістю процесу хитання є низька частота (близько 1–3 Гц) та малі амплітуди переміщення кристалізатора (кілька міліметрів), що ви-

суває підвищені вимоги до чутливості й роздільної здатності вимірювальних каналів.

Аналіз режимів хитання кристалізатора МБЛЗ, а також можливостей та обмежень існуючих вимірювальних систем дозволяє сформулювати основні вимоги до побудови нової системи моніторингу.

1) Система має забезпечувати безпосередній контроль просторового руху кристалізатора, а не лише приводу. Для цього інформаційними величинами мають бути тривимірні лінійні прискорення в кількох характерних точках і кутові швидкості, що дозволяють виявляти перекози, асиметрію навантаження та паразитні коливання. Ці дані мають дозволити обчислити переміщення, амплітуду й форму траєкторій, а також показники, прямо пов'язані з технологічними критеріями (час та індекс випередження, глибина слідів хитання).

2) Вимірювальні канали мають бути достатньо чутливими у низькочастотному діапазоні 1–3 Гц при амплітудах переміщення в межах кількох міліметрів. Це означає необхідність забезпечення діапазону вимірювання прискорень на рівні кількох g із роздільною здатністю, що дозволяє надійно реєструвати малі зміни сигналу, а також робочої смуги частот, яка охоплює не лише основну частоту коливань, а й кілька вищих

гармонік та можливі паразитні коливання. Частота дискретизації має забезпечувати коректне відтворення цих процесів із запасом для подальшого аналізу (фільтрація, інтегрування, спектральний аналіз).

3) Система має бути багатовузловою. Розміщення кількох сенсорних вузлів на елементах механізму хитання або по кутах кристалізатора дозволить оцінювати розподіл переміщень за довжиною, виявляти перекоси та нерівномірність роботи окремих опор. На відміну від одноточкових систем типу KS473/КНМ, це дозволить перейти від локальних вимірювань до просторової картини руху, що суттєво підвищує інформативність діагностики.

4) Оскільки кінцевою метою розробки вимірювальної системи є її застосування в реальних виробничих процесах, необхідно забезпечити компактність її сенсорних вузлів, мінімальний вплив їхньої маси на динаміку механізму, стійкість до вібрацій, електромагнітних завад і температурних коливань, а також можливість тривалого функціонування системи без складного обслуговування. Саме через ці вимоги є доцільним використання сучасних MEMS-інерційних давачів у поєднанні з мікроконтролерними вузлами.

5) Для централізованого збору даних від кількох вузлів потрібен заводостійкий цифровий канал зв'язку, здатний забезпечити передачу потоків вимірювальної інформації в реальному часі на задану відстань від кристалізатора (або лабораторного стенда) до центрального вузла. Лінія зв'язку має працювати у середовищі з підвищеним рівнем електричних завад, мати резерв пропускну здатності для можливості збільшення кількості сенсорних вузлів і не накласти жорстких обмежень на топологію розміщення обладнання.

6) З огляду на перспективу масштабування, архітектура системи має бути відкритою, що дозволить змінювати кількість вузлів, типи давачів та алгоритми обробки даних без повної перебудови апаратної частини. У лабораторних умовах це забезпечує гнучкість при проведенні експериментів, а в промислових — можливість поетапного впровадження з урахуванням особливостей конкретних МБЛЗ.

Наведені вимоги визначають рамки для подальшої розробки структури апаратної частини вимірювальної системи та її програмного забезпечення.

Прототип системи моніторингу

На рис. 4 показано структуру розробленої багатовузлової системи моніторингу параметрів коливального руху кристалізатора МБЛЗ. Система має центральний вузол, побудований на мікроконтролерній платі STM32 Nucleo64 (STM32F030) [11], та чотири вимірювальні вузли на базі плат STM32F3 DISCOVERY [12] із вбудованими цифровими MEMS-акселерометром [13] та гіроскопом [14]. Центральний вузол виконує функції синхронізації роботи вимірювальних вузлів, збору та агрегації даних, а також пе-

редавання результатів на персональний комп'ютер. Вимірювальні вузли встановлюються на площині плити кристалізатора і здійснюють безпосередній інерційний контроль руху в локальних точках столу хитання.

Кожен вимірювальний вузол містить мікроконтролер STM32F3, цифровий MEMS-акселерометр LSM303DLHC і MEMS-гіроскоп L3GD20, з'єднані зі своїм мікроконтролером інтерфейсами I²C та SPI відповідно. Акселерометр забезпечує зняття тривимірних сигналів лінійного прискорення, а гіроскоп реєструє значення кутової швидкості в точці встановлення вузла. Мікроконтролер виконує синхронізоване опитування давачів із частотою 100 Гц, формує пакет даних щодо відповідного вимірювального вузла (дані з акселерометра: ax , ay , az ; дані з гіроскопа: gx , gy , gz) і передає його лінією зв'язку до центрального вузла. Така організація процесу системи вимірювання дозволяє виконувати первинну цифрову обробку даних безпосередньо “на борту” кожного вимірювального вузла та зменшити навантаження на центральний вузол.

Частота дискретизації вимірювальної системи була обрана рівною 100 Гц (період вимірювання 10 мс) з урахуванням динамічних характеристик контрольованого механізму та обмежень апаратної платформи.

Механізми хитання технологічного обладнання, як правило, мають низькочастотний характер руху, де основні гармоніки коливань знаходяться в діапазоні приблизно 1–3 Гц. Згідно з теоремою дискретизації (критерій Найквіста), для коректного відтворення сигналу частота дискретизації має бути принаймні вдвічі більшою за максимальну частоту сигналу. Відповідно, обрана частота 100 Гц значно перевищує цю мінімальну вимогу та забезпечує:

- достатню часову роздільну здатність для фіксації швидких змін прискорення та кутової швидкості;
- коректне відтворення динаміки коливальних процесів;
- можливість подальшої цифрової фільтрації та аналізу сигналів.

Крім того, така частота є компромісом між точністю вимірювання та обсягом переданих даних, оскільки при використанні чотирьох вимірювальних вузлів збільшення частоти дискретизації суттєво підвищує навантаження на канал зв'язку RS-485 та обчислювальні ресурси мікроконтролерів.

Обмін даними між центральним та вимірювальними вузлами здійснюється за допомогою промислового диференційного інтерфейсу RS-485 [9]. В кожному вузлі використано окремих трансивер MAX485, що узгоджує несиметричні сигнали UART мікроконтролера з диференційною шиною А/В. Фізичне з'єднання реалізовано за допомогою кабелів типу “вита пара” з роз'ємами RJ-45, причому основна лінія формує послідовне під'єднання вузлів, а відга-

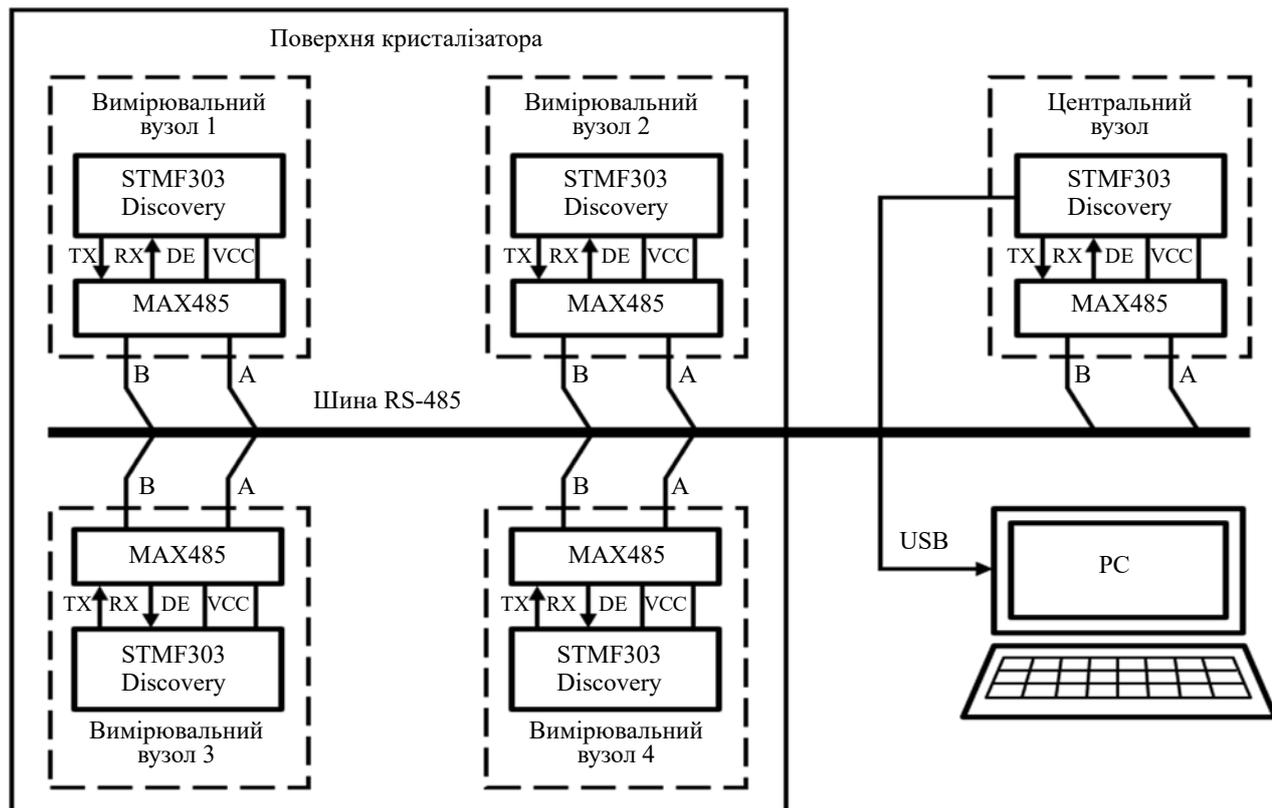


Рис. 4. Структурна схема вимірювальної частини

луження до плат зроблені максимально короткими для зменшення відбиттів та завад. Така конфігурація забезпечує завадостійкий обмін даними та можливість масштабування кількості вузлів без істотних змін структури системи.

Центральний вузол отримує дані від усіх вимірювальних вузлів, виконує контроль цілісності кадрів, узгодження за номером такту та формує агрегований рядок вимірювальної інформації для кожного періоду дискретизації. На персональний комп'ютер дані передаються через віртуальний послідовний порт (USB-UART), де виміряні значення записуються у форматі CSV. Такий формат є зручним для подальшої обробки та візуалізації у середовищах Excel, Python тощо і дозволяє без додаткових перетворень використовувати дані для аналізу режиму хитання та побудови інженерних діагностичних критеріїв.

Протокол обміну даними та пропускна здатність

Підвищення інформативності системи вимірювання пов'язане не лише з вибором елементної бази, а й з організацією обміну даними між вузлами. У розробленому комплексі реалізовано спеціалізований протокол на базі інтерфейсу RS-485, який забезпечує синхронізоване опитування чотирьох вимірювальних вузлів з частотою 100 Гц, ідентифікацію кадрів за номером такту та контроль цілісності переданої інформації. Структуру кадру синхронізації та вимірювального кадру DATA, а також склад полів заго-

ловка, корисних даних та контрольної суми наведено на **рис. 5**. Кожен кадр містить службовий префікс, ідентифікатор вузла, номер такту опитування, масив із шести 16-розрядних компонент (ax, ay, az, gx, gy, gz) та байт простої контрольної суми за схемою XOR.

Обмін побудовано за принципом «ведучий – ведений» із жорсткою часовою прив'язкою до періоду дискретизації 10 мс. Центральний вузол у кожному такті формує кадр SYNC із черговим номером послідовності та розсилає його шиною RS-485. Приймавши SYNC, усі вимірювальні вузли одночасно зчитують дані з MEMS-акселерометра та гіроскопа, формують локальний буфер вимірювання і готуються до передавання. Далі реалізовано варіант із часовими слотами: кожен вузол має власне «вікно» передавання в межах 10-мілісекундного періоду, зсунуте

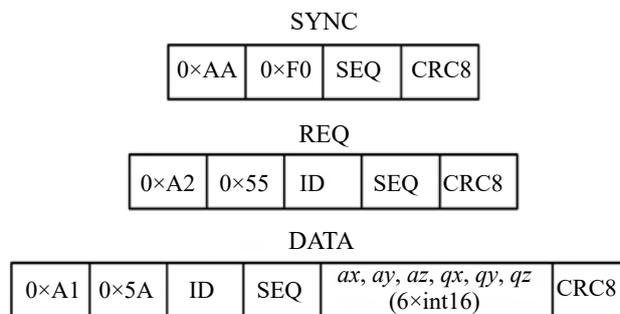


Рис. 5. Структура кадрів протоколу обміну в системі вимірювання

на фіксовану затримку відносно моменту завершення кадру SYNC. Завдяки керуванню лінією DE трансивера MAX485 ведучий та ведені вузли по черзі займають шину, не створюючи колізій.

У табл. 2 наведено значення довжини кадрів SYNC та DATA у байтах, необхідні для розсилання одного кадру SYNC та приймання чотирьох кадрів DATA протягом одного такту опитування. Для обґрунтування вибору швидкості обміну та кількості вузлів було розраховано пропускну здатність каналу зв'язку.

Для загального випадку кількість байтів, що передається за один цикл опитування за числа вузлів N , можна представити як

$$L_{cycle}(N) = L_{SYNC} + N(L_{REQ} + L_{DATA}), \quad (3)$$

де L_{SYNC} , L_{REQ} , L_{DATA} — довжина відповідних кадрів у байтах (див. табл. 2).

У поточній реалізації системи число вузлів $N = 4$. Тоді обсяг даних за один цикл опитування

$$L_{cycle} = 4 + 4 \cdot (5 + 17) = 92 \text{ байт}. \quad (4)$$

Частота опитування вузлів вибрана $f_s = 100$ Гц (період $T = 10$ мс), що узгоджується з частотою дискре-

тизації акселерометра та гіроскопа [13], [14]. Тоді середня швидкість передавання даних

$$R_B = L_{cycle} f_s = 9200 \text{ байт/с}. \quad (5)$$

Передавання по UART реалізується у форматі «8N1» (1 старт-біт, 8 інформаційних бітів, 1 стоп-біт), тобто на кожен байт припадає 10 бітів лінійної швидкості. Відповідно, необхідна бітова швидкість на шині RS-485 дорівнює

$$R_{bit} = R_B \cdot 10 = 92000 \text{ біт/с}. \quad (6)$$

Отже, на фізичному рівні мінімально достатня швидкість обміну має бути не меншою за R_{bit} . Для врахування технологічних пауз між кадрами, програмних затримок та можливих повторних передавань доцільно закласти запас щонайменше 20%. Тоді розрахункова мінімальна швидкість становитиме

$$R_{min} = 1,2 R_{bit} \approx 110400 \text{ біт/с}. \quad (7)$$

Найближчою стандартною швидкістю UART є 115200 біт/с, яка формально забезпечує необхідну пропускну здатність, але залишає невеликий запас по часу. З урахуванням можливих переривань, додаткової обробки та перспективи розширення

Таблиця 2

Структура кадрів протоколу обміну в системі вимірювання

Тип кадру	Поле	Позначення	Розмір, байт	Призначення
SYNC	Префікс 1	0xAA	1	Перший байт префікса, ідентифікує кадр як службовий
	Префікс 2	0xF0	1	Другий байт префікса, розрізнення типу кадру (SYNC)
	Номер вимірювання	SEQ	1	Лічильник циклу вимірювання, спільний для всіх вузлів
	Контрольна сума	CRC8	1	Контроль цілісності кадру (XOR усіх попередніх байтів)
	Разом для SYNC		4	
REQ	Префікс 1	0xA2	1	Перший байт префікса, службовий кадр запиту
	Префікс 2	0x55	1	Другий байт префікса, розрізнення типу кадру (REQ)
	Ідентифікатор вузла	ID	1	Адреса вимірювального вузла, до якого звертається "майстер"
	Номер вимірювання	SEQ	1	Значення лічильника циклу, одержане в кадрі SYNC
	Контрольна сума	CRC8	1	Контроль цілісності кадру
	Разом для REQ		5	
DATA	Префікс 1	0xA1	1	Перший байт префікса, службовий кадр даних
	Префікс 2	0x5A	1	Другий байт префікса, розрізнення типу кадру (DATA)
	Ідентифікатор вузла	ID	1	Адреса вузла, від якого надійшли дані
	Номер вимірювання	SEQ	1	Номер вимірювального циклу, з яким пов'язано ці дані
	Дані акселерометра та гіроскопа	ax, ay, az, gx, gy, gz	12	Шість компонентів вимірювань, кожен як int16 (2 байти)
	Контрольна сума	CRC8	1	Контроль цілісності кадру
	Разом для DATA		17	

системи обрано швидкість обміну шиною RS-485 $R_{line} = 230400$ біт/с. Тривалість одного циклу передавання на шині при такій швидкості можна оцінити як

$$T_{cycle(line)} = \frac{L_{cycle} \cdot 10}{R_{line}} = \frac{92 \cdot 10}{230400} \approx 4 \text{ мс.} \quad (8)$$

Оскільки період опитування становить 10 мс, реальна “зайнятість” лінії не перевищує 40%:

$$\frac{T_{cycle(line)}}{T} = \frac{4}{10} = 0,4. \quad (9)$$

Це забезпечує значний часовий резерв для виконання обчислень на вузлах, можливих повторних передавань кадрів у разі помилок та потенційного збільшення кількості вузлів або розміру корисних даних у майбутніх модифікаціях системи.

Згідно з результатами розрахунків, сумарний час зайнятості шини становить менше половини періоду дискретизації 10 мс, що забезпечує достатній часовий запас для обробки переривань, внутрішнього зчитування даних із сенсорів та можливого подальшого ускладнення протоколу (наприклад, переходу до схеми опитування типу SYNC → REQ/RESP).

У програмній реалізації центрального вузла передбачено побайтовий парсер кадрів, який за сигнатурою заголовка виділяє окремі вимірювальні повідомлення, перевіряє коректність контрольної суми та збіг номера такту. Дані від вузлів з ідентифікаторами 1...4 записуються в агрегуювальну структуру, після чого формуються рядки у форматі CSV для передавання на персональний комп'ютер. У разі відсутності кадру від окремого вузла до встановленого дедлайну в поточному такті відповідні поля заповнюються нульовими значеннями, що дозволяє зберегти цілісність часових послідовностей і спростити подальшу обробку. Такий підхід, з одного боку, забезпечує гарантовану верхню межу затримки формування рядка, а з іншого — дозволяє однозначно фіксувати пропуски вимірювань для подальшого аналізу.

Результати роботи системи та їх аналіз

Зовнішній вигляд прототипу розробленої вимірювальної системи показано на **рис. 6**.

У проведених експериментальних дослідженнях підтверджено працездатність запропонованої багатовузлової системи в режимі синхронного опитування чотирьох вимірювальних вузлів із частотою дискретизації 100 Гц. Система забезпечує стабільну передачу вимірювальних даних інтерфейсом RS-485 на центральний вузол і далі на персональний комп'ютер у форматі CSV, що дозволяє аналізувати часові залежності прискорень і кутових швидкостей у чотирьох точках. На **рис. 7** наведено фрагмент журналу вимірювань у вигляді таблиці CSV, де для кожного такту опитування зафіксовано номер вимірювання та компоненти прискорення і кутової швидкості для всіх активних вузлів. Видно, що дані надходять у синх-



Рис. 6. Зовнішній вигляд розробленої вимірювальної системи

ронному форматі, придатному для подальшої обробки та побудови графіків.

Важливим результатом дослідження є підтвердження можливості масштабування системи: структура протоколу й запас по пропускну здатності RS-485 дозволяють без суттєвих змін апаратної частини та алгоритмів збільшувати кількість вузлів або частоту опитування в межах, обумовлених вимогами конкретного застосування. Застосування цифрових MEMS-акселерометрів і гіроскопів у поєднанні з мікроконтролерними вузлами забезпечує чутливість і частотний діапазон, необхідні для задач контролю режиму хитання кристалізатора, а також створює резерв для впровадження більш складних алгоритмів обробки безпосередньо “на борту” вузлів (фільтрація, обчислення індикаторів якості режиму, попередня класифікація аномалій).

Отримані результати свідчать про перспективність розробленої системи як основи для побудови промислового комплексу моніторингу коливального руху кристалізатора МБЛЗ. Завдяки модульній структурі та використанню поширених компонентів (STM32, RS-485, стандартні кабельні рішення) система може бути адаптована до різних конструкцій механізмів хитання та інтегрована в існуючу інфраструктуру контролю та керування. Потенційними напрямками застосування є як постійний моніторинг режиму роботи кристалізатора, так і періодичні діагностичні вимірювання при налагодженні або після ремонтів.

Разом з тим, прототип системи має низку обмежень, що окреслюють напрями подальшого його розвитку. Оскільки на даному етапі розробки дослідження проводилися виключно на експериментальному стенді, прототип не має багаторівневого захисту та гальванічної розв'язки, необхідних для експлуатації в промислових умовах. Обробка даних виконується переважно на боці персонального комп'ютера, а програмні засоби аналізу реалізовані у вигляді окремих скриптів і стандартних пакетів. Подальше вдоскона-

9	n,ax1,ay1,az1,gx1,gy1,gz1,ax2,ay2,az2,gx2,gy2,gz2,ax3,ay3,az3,gx3,gy3,gz3,ax4,ay4,az4,gx4,gy4,gz4
10	0,96,288,16336,127,17,-14,80,240,15776,-26,85,-85,-208,-64,15152,-314,60,-16,-448,336,16848,-209,-72,19
11	1,64,272,16400,127,17,-14,64,272,15824,-29,63,-74,-192,0,15232,-315,60,-29,-416,288,16800,-217,-76,22
12	2,32,272,16448,114,9,2,16,304,15776,-19,49,-110,-176,64,15312,-328,76,-42,-448,240,16800,-184,-70,18
13	3,48,272,16352,107,26,-20,0,272,15808,-32,70,-93,-160,32,15248,-309,77,-38,-448,272,16768,-187,-62,30
14	4,64,272,16352,113,12,12,-32,256,15744,-61,70,-75,-144,0,15248,-310,89,-22,-448,336,16800,-200,-75,34
15	5,112,288,16448,115,1,22,-16,304,15808,-61,70,-77,-224,32,15344,-304,59,-9,-480,336,16688,-200,-75,34
16	6,128,240,16336,117,8,10,-16,304,15712,-47,85,-77,-224,16,15280,-304,59,-9,-464,272,16704,-221,-82,16
17	7,96,256,16368,139,17,-1,48,224,15744,-52,60,-100,-320,16,15296,-312,53,-1,-432,288,16736,-191,-48,0
18	8,48,208,16288,148,-3,9,80,272,15792,-48,72,-79,-304,-16,15200,-323,79,-56,-416,320,16768,-201,-55,-2
19	9,64,176,16368,120,14,-19,48,288,15824,-83,80,-81,-240,0,15184,-299,56,-57,-416,240,16800,-205,-55,19
20	10,96,240,16384,117,3,12,16,288,15824,-39,103,-100,-208,-32,15168,-285,66,-24,-384,256,16768,-198,-52,20
21	11,48,240,16352,111,36,-18,32,304,15760,-22,98,-89,-208,0,15136,-314,93,-46,-416,288,16832,-200,-63,31
22	12,80,224,16384,111,36,-18,48,304,15744,-36,90,-100,-176,32,15104,-304,93,-27,-432,272,16768,-185,-59,14

Рис. 7. Файл формату CSV з сирими даними вимірювань

лення може бути спрямоване на інтеграцію адаптивного протоколу опитування з підтвердженням доставлення кадрів, впровадження апаратних засобів захисту шини, реалізацію вбудованих алгоритмів фільтрації та діагностики на мікроконтролерних вузлах, а також розробку спеціалізованого програмного забезпечення для візуалізації та довготривалого архівування даних у режимі реального часу.

Висновки

Розроблена багатовузлова система вимірювання параметрів коливального руху кристалізатора МБЛЗ на основі мікроконтролерів STM32 і цифрових MEMS-акселерометрів та гіроскопів, яка працює з частотою дискретизації 100 Гц та здійснює обмін даними інтерфейсом RS-485, продемонструвала свою працездатність в лабораторних умовах. Система забезпечує одночасний моніторинг параметрів руху в чотирьох точках площини кристалізатора, а наявність мікроконтролерів у вимірювальних вузлах дозволяє реалізовувати первинну обробку, фільтрацію та обчислення діагностичних показників, що підвищує інформативність даних і створює підґрунтя для подальшої діагностики стану кристалізатора та впровадження алгоритмів прогнозування ресурсу елементів механізму хитання. Отримані результати демонструють практичну придатність запропонованого підходу для моніторингу режиму хитання кристалізатора та потенціал для подальшої промислової реалізації розробленої системи, зокрема, як частини цифрового двійника кристалізатора МБЛЗ

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Neef C., Hirzel S., Arens M. *Industry 4.0 in the European Iron and Steel Industry: Towards an Overview of Implementations and Perspectives. Working document.* Karlsruhe, Fraunhofer ISI, 2018. 26 p.
2. Szekeres E. S. Overview of mold oscillation in continuous casting», *Iron and Steel Engineer*, July 1996, pp. 29-37.
3. Lewis D. M., Savage, J. The Principles of Continuous Casting of Metals, *Metallurgical Reviews*, 1956, vol. 1, part 1, pp. 65–116. <https://doi.org/10.1179/mlr.1956.1.1.65>.

4. Irving W.R. *Continuous Casting of Steel* (1st ed.). CRC Press, 1994. <https://doi.org/10.1201/9781003575849>.
5. Elfsberg J. *Oscillation Mark Formation in Continuous Casting Processes: Licentiate thesis.* Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003, 53 c.
6. Li Q., Wen G., Chen F. et al. Irregular initial solidification by mold thermal monitoring in the continuous casting of steels: A review, *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2024, vol. 31, no. 5, pp. 1003–1015. <https://doi.org/10.1007/s12613-023-2798-z>
7. Nian Y., Zhang L., Zhang C. et al. Application status and development trend of continuous casting reduction technology: A review, *Processes*, 2022, vol. 10, no. 12, p. 2669. <https://doi.org/10.3390/pr10122669>.
8. Диденко В.А., Бондаренко А.Ф., Полено А.Н. Обзор средств контроля траектории движения кристаллизатора МНЛЗ. *Труди МНПК "Современные информационные и электронные технологии"*, т. 1. Україна, Одеса, 2014, с. 58–59. <https://www.old.tkea.com.ua/siet/archive/2014-t1/058.pdf>
9. Діденко В.О. *Керування напівпровідниковими перетворювачами в системі електрогідравлічного приводу за сигналами прискорень : дис. канд. техн. наук*, Київ, 2017, 204 с.
10. Gill W. A., Howard I., Mazhar I., McKee K. A Review of MEMS Vibrating Gyroscopes and Their Reliability Issues in Harsh Environments. *Sensors*, 2022, vol. 22, iss. 19, 7405. <https://doi.org/10.3390/s22197405>
11. *STM32 Nucleo-64 boards (MB1136). User manual*, STMicroelectronics, September 2025, 91 p. [Online]. Available: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1724-stm32-nucleo64-boards-mb1136-stmicroelectronics.pdf [Accessed: Nov. 25, 2025].
12. *Discovery kit with STM32F303VC MCU. User manual*, STMicroelectronics, September 2023, 41 p. [Online]. Available: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1570-discovery-kit-with-stm32f303vc-mcu-stmicroelectronics.pdf [Accessed: Nov. 25, 2025].
13. *LSM303DLHC. iNEMO inertial module: 3D accelerometer and 3D magnetometer : datasheet*, STMicroelectronics, Geneva, November 2013, 52 p. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm303dlhc.pdf> [Accessed: Nov. 25, 2025].
14. *L3GD20. MEMS motion sensor: three-axis digital output gyroscope : datasheet*, STMicroelectronics, February 2011, 36 p. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l3gd20.pdf> [Accessed: Nov. 25, 2025].

Дата надходження рукопису
до редакції 4.12 2025 р.

HARDWARE COMPONENT OF THE SYSTEM FOR MONITORING THE MOTION PARAMETERS OF THE MOLD OSCILLATION MECHANISM

The paper presents the development and experimental investigation of a multi-node measurement system for monitoring the oscillatory motion parameters of the mold in continuous casting machines. Ensuring stable oscillation program is crucial for slab solid shell formation, reduction of surface defects and prevention of surface breakout accidents. However, the known monitoring solutions based on discrete displacement or vibration sensors are often bulky, expensive, limited in the number of measurement points and difficult to integrate into existing equipment. The aim of the work is to increase the effectiveness of monitoring the mold oscillation mode by using compact MEMS inertial sensors integrated into a distributed microcontroller system with a robust industrial communication interface.

The proposed system includes four sensor nodes based on STM32F3 microcontrollers with built-in digital MEMS accelerometer and gyroscope and a central master module on STM32F0, interconnected via an RS-485 bus. Each sensor node performs synchronous acquisition of three-axis linear acceleration and angular rate at a sampling frequency of 100 Hz and transmits the measured data frames to the master, which aggregates them and forwards to a PC in CSV format for further analysis. The paper describes the hardware architecture of the nodes, the structure of the RS-485 communication protocol with synchronization frames and checksums, and the basic algorithms of firmware implementation.

Experimental tests on a laboratory stand confirmed stable operation of the developed system at 100 Hz with simultaneous data acquisition from four measurement points, sufficient bandwidth of the communication channel and correct reconstruction of inertial signals for typical oscillation modes.

The developed technical solutions can be used as the basis of an industrial complex for monitoring the oscillation of the mold of a continuous casting machine, in particular of a digital twin of the mold; for studying the oscillatory movements of mechanisms on other productions; as well as a training and research stand for delivering courses in measures and control systems.

Keywords: oscillation mechanism, mold, continuous casting, MEMS, accelerometer, gyroscope, microcontroller, movement parameters monitoring, RS-485 interface.

REFERENCES

- [1] C. Neef, S. Hirzel, and M. Arens, "Industry 4.0 in the European Iron and Steel Industry: Towards an Overview of Implementations and Perspectives," *Working document*, Karlsruhe, Fraunhofer ISI, 2018, 26 p.
- [2] E. S. Szekeres, "Overview of mold oscillation in continuous casting," *Iron and Steel Engineer*, Jul. 1996, pp. 29–37.
- [3] D. M. Lewis and J. Savage, "The Principles of Continuous Casting of Metals," *Metallurgical Reviews*, vol. 1, part 1, 1956, pp. 65–116. doi: 10.1179/mtrl.1956.1.1.65.
- [4] W. R. Irving, *Continuous Casting of Steel*, 1st ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1994. doi: 10.1201/9781003575849.
- [5] J. Elfsberg, "Oscillation Mark Formation in Continuous Casting Processes," *Licentiate thesis*, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2003, 53 p.
- [6] Q. Li, G. Wen, F. Chen, J. Zhang, Z. Liu, and H. Yin, "Irregular initial solidification by mold thermal monitoring in the continuous casting of steels: A review," *Int. J. Minerals Metallurgy and Materials*, vol. 31, no. 5, 2024, pp. 1003–1015. doi: 10.1007/s12613-023-2798-z.
- [7] Y. Nian, L. Zhang, C. Zhang, et al., "Application status and development trend of continuous casting reduction technology: A review," *Processes*, vol. 10, no. 12, 2022, p. 2669. doi: 10.3390/pr10122669.
- [8] V. O. Didenko, O. F. Bondarenko, and O. M. Polyeno, "The overview of tools for control of mold motion trajectory of continuous casting machine," in *Proc. Int. Sci.-Practical Conf. Modern*

Information and Electronic Technologies, vol. 1, Odesa, Ukraine, 2014, pp. 58–59. [Online]. Available: <https://www.old.tkea.com.ua/siet/archive/2014-t1/058.pdf>

[9] V. O. Didenko, "Control of semiconductor converters in the electrohydraulic drive system by acceleration signals," *Ph.D. dissertation*, Kyiv, Ukraine, 2017, 204 p.

[10] W. A. Gill, I. Howard, I. Mazhar, and K. McKee, "A Review of MEMS Vibrating Gyroscopes and Their Reliability Issues in Harsh Environments," *Sensors*, vol. 22, iss. 19, 2022, p. 7405. doi: 10.3390/s22197405.

[11] STMicroelectronics, "STM32 Nucleo-64 boards (MB1136)," *User manual*, Sep. 2025, 91 p. [Online]. Available: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1724-stm32-nucleo64-boards-mb1136-stmicroelectronics.pdf [Accessed: Nov. 25, 2025].

[12] STMicroelectronics, "Discovery kit with STM32F303VC MCU," *User manual*, Sep. 2023, 41 p. [Online]. Available: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1570-discovery-kit-with-stm32f303vc-mcu-stmicroelectronics.pdf [Accessed: Nov. 25, 2025].

[13] STMicroelectronics, "LSM303DLHC: iNEMO inertial module: 3D accelerometer and 3D magnetometer," *Datasheet*, Geneva, Nov. 2013, 52 p. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm303dlhc.pdf> [Accessed: Nov. 25, 2025].

[14] STMicroelectronics, "L3GD20: MEMS motion sensor, three-axis digital output gyroscope," *Datasheet*, Feb. 2014. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l3gd20.pdf> [Accessed: Nov. 25, 2025].



Copyright: © 2025, The author(s). Licensee: Politekhperiodika, Odesa, Ukraine. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).