

Маринич І.А.

Криворізький національний університет

Рубан С.А.

Криворізький національний університет

Харламенко В.Ю.

Криворізький національний університет

РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ РІВНЕМ МЕТАЛУ У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ МАШИНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК НА БАЗІ РІШЕННЯ PHOENIX CONTACT

У сучасній металургійній промисловості значну увагу приділяють вдосконаленню технологічних процесів, спрямованих на підвищення якості продукції, зменшення витрат ресурсів і забезпечення стабільності виробничих операцій. Одним із ключових етапів у технології безперервного розливання заготовок є керування рівнем металу у проміжному ковші, що безпосередньо впливає на якість кінцевої продукції, рівномірність розливання та запобігання виникненню дефектів, а також визначає стабільність подачі металу в кристалізатор та запобігає виникненню дефектів у заготовках. Актуальність дослідження зумовлена зростаючими вимогами до якості металопродукції та необхідністю впровадження сучасних засобів автоматизації в умовах Industry 4.0. Розробка та впровадження систем візуалізації технологічного процесу є важливим кроком у напрямку цифровізації металургійного виробництва, що сприяє підвищенню його конкурентоспроможності. У статті наведено приклад реалізації системи візуалізації системи керування рівнем металу у проміжному ковші машини безперервного розливання заготовок, що забезпечить підвищення ефективності виробничого процесу, зменшення кількості браку, оптимізацію витрат ресурсів та покращення контролю якості продукції. Запропонований підхід базується на використанні сучасних технологій автоматизації та візуалізації, що відповідають концепціям Industry 4.0, і забезпечує інтеграцію системи керування з іншими елементами цифрового виробництва. У якості платформи для реалізації системи візуалізації технологічного процесу обрано ПЛК серії PLCnext від Phoenix Contact, так як в цілому платформа PLCnext є потужним інструментом для автоматизації металургійного виробництва, особливо в умовах переходу до концепції Industry 4.0. Її використання виправдане, якщо підприємство прагне підвищити ефективність, зменшити витрати та інтегрувати сучасні технології в існуючі процеси.

Ключові слова: автоматизація, кристалізатор, машина безперервного лиття заготовок, проміжний ковш, промисловий контролер, система візуалізації, Industry 4.0, PLCNext, Phoenix Contact.

Постановка проблеми. Застосування візуалізацій технологічних процесів є важливим інструментом для аналізу, оптимізації та контролю виробничих систем. Використання графічних інтерфейсів, анімацій, тривимірного моделювання та реального моніторингу дає змогу наочно представити складні процеси, виявити критичні точки і вчасно реагувати на можливі проблеми. Візуалізація дозволяє інженерам та операторам краще зрозуміти динаміку технологічних змін, відстежувати параметри в режимі реального часу та оцінювати вплив різних факторів на продуктивність системи. Зокрема, інтеграція таких інструментів у виробничі процеси сприяє підвищенню

ефективності, скороченню простоїв обладнання та забезпеченню стабільної якості продукції [1].

Варто відзначити, що на підприємствах криворізького регіону вже склалися певні традиції, і так званий вендор-лист виробників апаратно-програмних засобів є незмінним протягом багатьох років. Так, для металургійного комбінату «АрселорМіттал Кривий Ріг» у вендор-лист постачальників устаткування систем автоматизації входять такі бренди, як Siemens, Schneider Electric та Rockwell Automation (Allen Bradley). Водночас, останнім часом деякі виробники представили достатньо потужні і революційні продукти, які дуже вразили своїми можливостями та

відкритістю під час навчання. У контексті цього, було вирішено розглянути можливість реалізації основного функціоналу системи, зокрема системи візуалізації технологічного процесу керування рівнем металу у проміжному ковші машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), з використанням ПЛК від Phoenix Contact.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробка та впровадження автоматизованих системи керування рівнем металу у проміжному ковші МБЛЗ, що будуть забезпечувати підвищення точності регулювання, стабільність технологічного процесу та якість кінцевого продукту досить актуальна.

В роботі [2] представлено результати досліджень кількісних моделей нестационарного потоку та переносу включень у процесі безперервного лиття сталі, а також їх застосування для підвищення розуміння і ефективності видалення частинок включень.

У статті [3] представлено модель передбачувального регулятора з повторювальною дією для компенсації періодичних збурень в промислових процесах. Також представлено симуляційне дослідження, яке охоплює кілька аспектів, пов'язаних із продуктивністю компенсації збурень, налаштуванням параметрів і впливом обмежень.

Метою роботи [4] є підтримання постійного рівня сталі в кристалізаторі шляхом застосування повторювальної структури, що складається з двох регуляторів: узагальненого передбачувального регулятора і повторювального з обмеженнями, для зменшення впливу збурень, таких як здуття, засмічення/проčiщення і зміна швидкості лиття на рівень сталі. Тестування регулятора проводиться за допомогою моделювання нелінійної математичної моделі рівня сталі, яка була верифікована з використанням реальних даних сталеливарної промисловості.

Постановка завдання. Основна більшість робіт присвячена саме моделюванню або математичному опису технологічного процесу лиття заготовок. В даній роботі основна увага буде приділена саме розробці системи візуалізації технологічного процесу на базі ПЛК серії PLCnext від Phoenix Contac, так як застосування таких систем має ряд переваг.

Проведений аналіз досвіду використання платформи PLCnext Technology [5] у різних сферах виробництва показав, що дана платформа має багато переваг, які особливо проявляються в складних і динамічних галузях, таких як автоматизація металургійного виробництва.

Нижче наведено основні переваги, а також специфічні аспекти, які можуть бути корисними в металургії [5]:

- відкритість і масштабованість: PLCnext підтримує інтеграцію стороннього програмного забезпечення та стандартних мов програмування (C++, Python, Java і т.д.), поряд із класичними стандартами IEC 61131-3, що дозволяє поєднувати традиційні PLC-технології з сучасними IT-рішеннями;

- інтеграція з хмарними сервісами та IoT: вбудована підтримка хмарних сервісів (наприклад, AWS, Microsoft Azure) та протоколів IoT (MQTT, OPC UA) дає змогу ефективно збирати, аналізувати та обробляти дані, що особливо важливо для побудови «розумного» виробництва відповідно до концепції Industry 4.0;

- висока продуктивність: використання багатоядерних процесорів та операційної системи на базі Linux забезпечує виконання кількох програм одночасно, що дозволяє керувати складними технологічними процесами без втрат продуктивності;

- гнучкість у розробці: надається можливість використовувати різні середовища розробки та інтегрувати сучасні алгоритми (наприклад, штучний інтелект чи машинне навчання) без необхідності обмежуватися лише класичними мовами для ПЛК;

- кібербезпека: платформа відповідає сучасним вимогам до інформаційної безпеки, що є критично важливим для захисту виробничих даних у металургії.

- модульність і підтримка різних протоколів зв'язку: PLCnext легко інтегрується в існуючі системи завдяки підтримці PROFINET, Modbus, OPC UA та інших стандартів, що дозволяє підключати обладнання різних виробників і створювати гнучкі архітектури системи автоматизації.

З урахуванням того, що металургійне виробництво – це складна галузь із високими вимогами до стабільності, продуктивності та безпеки, є цілий ряд аргументів, які вказують на високий потенціал рішень на базі PLCnext Technology.

Водночас, платформа має і ряд недоліків, зокрема в контексті задач створення людино-машинних інтерфейсів. Зокрема, у випадках, коли потрібні дуже складні графічні інтерфейси або специфічні функції (наприклад, 3D-візуалізація), PLCnext Engineer може виявитися менш гнучким у порівнянні з рішеннями від Siemens WinCC [6] або Wonderware [7].

Крім того, варто відзначити і те, що у випадку, якщо компанія не планує використовувати контролери PLCnext, то інтеграція HMI через це ПЗ може бути менш ефективною і не виправдати витрати. Все ж таки проведений аналіз показує, що PLCnext Engineer найбільш ефективний для роботи в межах екосистеми Phoenix Contact. У проєктах із використанням обладнання інших виробників можуть виникати складнощі з інтеграцією.

Але, з урахуванням вище вказаного можна зробити загальний висновок, що в цілому платформа PLCnext є потужним інструментом для автоматизації металургійного виробництва, особливо в умовах переходу до концепції Industry 4.0. Її використання виправдане, якщо підприємство прагне підвищити ефективність, зменшити витрати та інтегрувати сучасні технології в існуючі процеси.

Виклад основного матеріалу. Стопор проміжного ковша може управлятися вручну або в автоматичному замкнутому контурі управління. Автоматичне керування замкнутим контуром використовується для підтримки заданого рівня металу під час процесу лиття.

З метою реалізації кнопки переключення між автоматичним та ручним режимом керування технологічним процесом використано графічний

елемент Button, для якого виконано деякі налаштування.

Зокрема, кнопка при активованому автоматичному режимі роботи відображає іконку переключення у ручний режим, і навпаки – при активованому ручному режимі відображає іконку переключення в автоматичний режим. Для цього на першому етапі створено список зображень WorkModelImageList (рис. 1), що містить прив'язку зображень режимів роботи до значень тегів.

Дана дія виконується шляхом того, що на вкладці Components у вікні HMI у пункті Local з використанням контекстного меню обрано пункт Add Image List.

У вікні редагування списку зображень послідовно додані раніше завантажені зображення іконок у векторному форматі svg, що відповідають ручному та автоматичному режимі, та налаштовано їх відображення у залежності від значення тегу AUTO_MODE_INT типу INT, що відповідає за режим роботи системи (рис. 2).

На наступному кроці треба налаштувати анімацію зображення на кнопці переключення між режимами роботи при зміні значення тегу AUTO_MODE_INT. Для цього у властивостях обраної у редакторі кнопки треба перейти на вкладку Dynamics та додати нову анімацію типу Image->Image List, вказати назву пов'язаної змінної

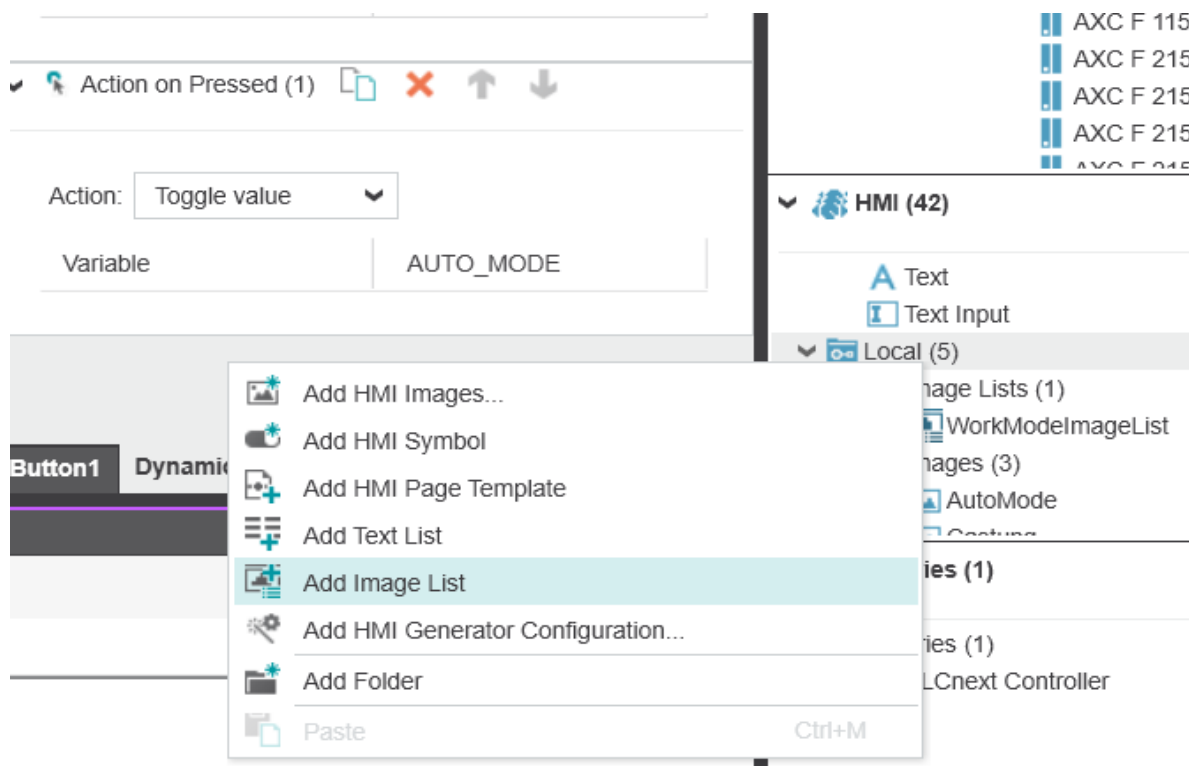


Рис. 1. Вікно додавання списку зображень

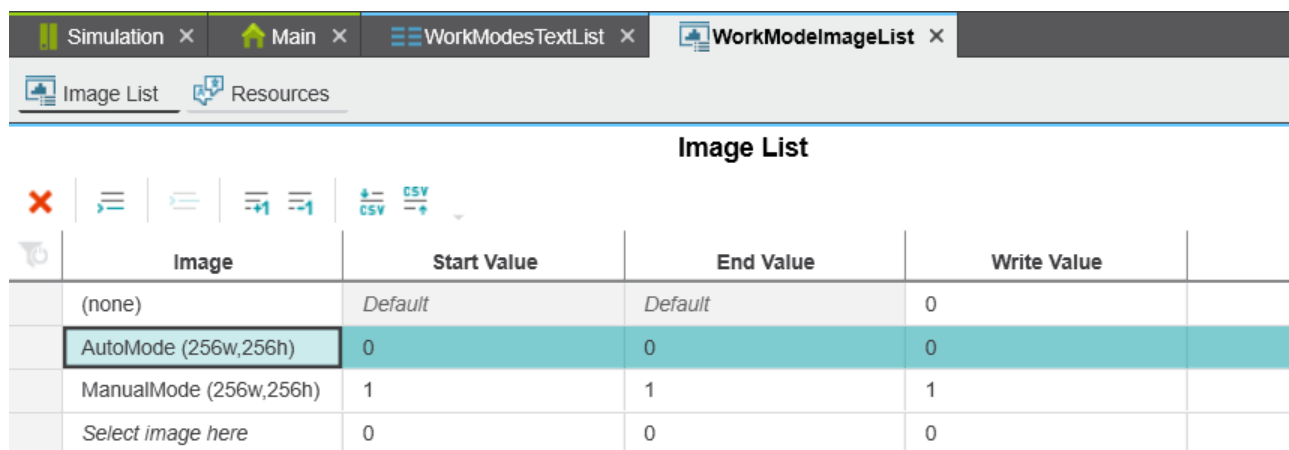


Рис. 2. Вікно редагування списку зображень та встановлення відповідності зображень зі значеннями пов'язаної змінної

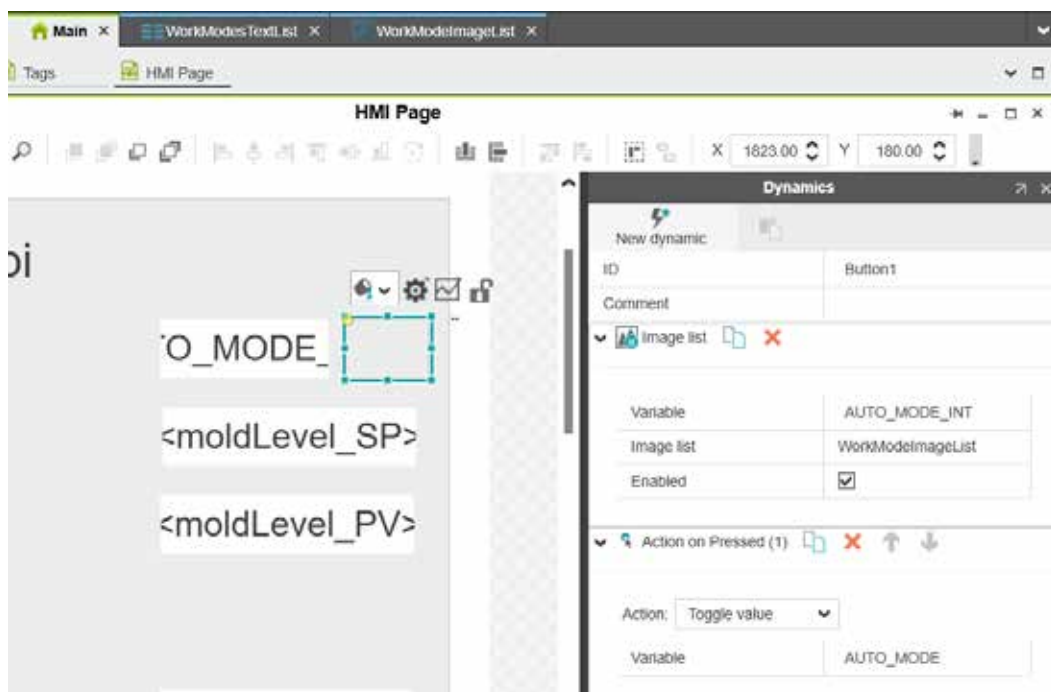


Рис. 3. Налаштування анімації зміни зображення кнопки в залежності від поточного режиму роботи

Variable (для даного випадку AUTO_MODE_INT), та обрати раніше створений список зображень (Image List) WorkModeImageList (рис. 3).

Також для кнопки потрібно прибрати значення властивості Text, а також налаштувати розміщення зображення по центру та заповнення доступного простору з масштабуванням при збереженні пропорцій зображення. Для цього у вікні властивостей кнопки встановлені наступні налаштування (рис. 4).

На рисунку 5 наведено результат тестування зміни зображення при активованому автоматичному режимі (відображається іконка руки -переключення на ручний режим).

Переключення режиму роботи має відбуватися по натисненню на кнопку. З цією метою у вікні властивостей кнопки на вкладці Dynamics (рис. 6) додано анімацію типу Action->Action on Pressed (тобто дія при натисканні на кнопку), і налаштовано виконання дії переключення значення (Toggle value) та указано, для якої саме змінної логічного типу (у нашому випадку це AUTO_MODE).

Для відображення обраного режиму роботи за допомогою тексту також потрібно додати анімацію типу Text->Text List до відповідного графічного примітиву типу Text (рис. 7). Як видно, властивість Список текстів (Text list) прив'язана до об'єкту WorkModesTextList.

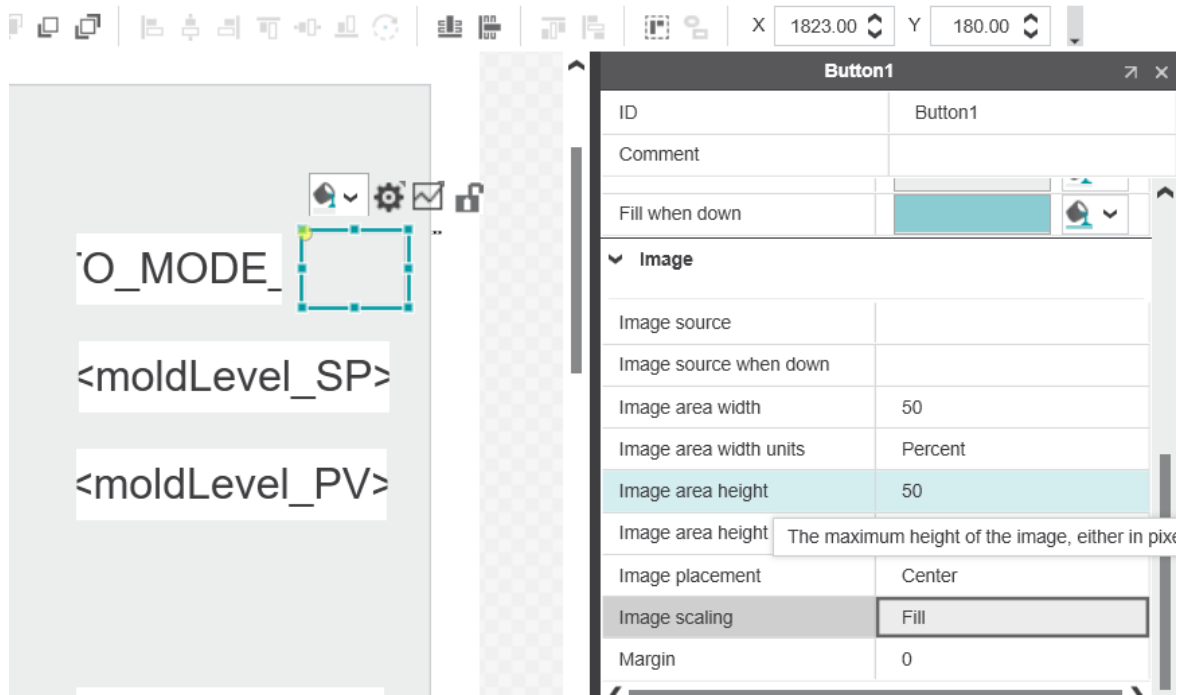


Рис. 4. Основні налаштування кнопки для відображення анімації зміни зображення

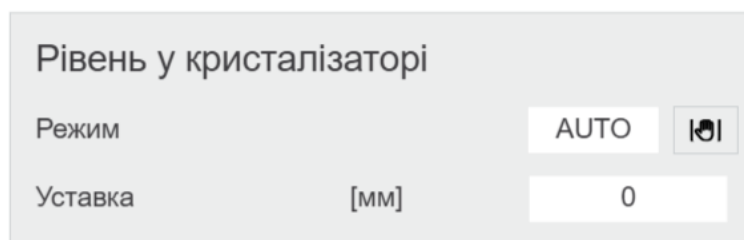


Рис. 5. Результати тестування анімації кнопки при автоматичному режимі роботи

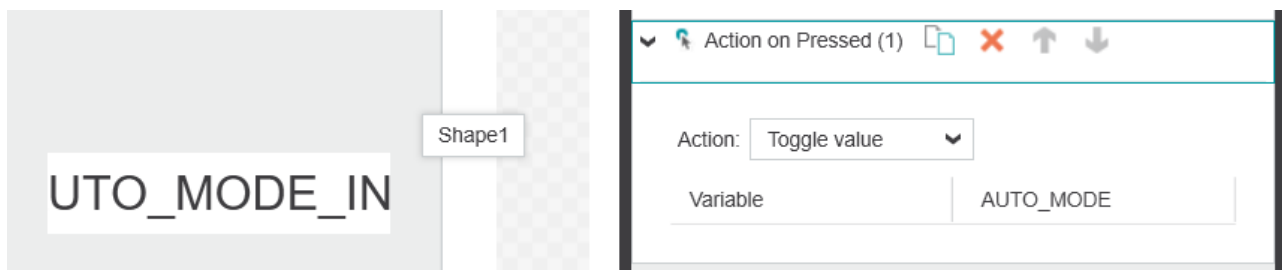


Рис. 6. Пов'язування кнопки з дією переключення значення логічної змінної AUTO_MODE

Для створення списку текстів на вкладці Components у вікні HMI у пункті Local контекстного меню потрібно обрано пункт Add Text List і у вікні, що відкриється, додати текстові значення та значення змінної, які їм відповідають (рис. 8).

Особливістю компонентів, що використовуються для реалізації анімації за списками у PLCnext є те, що вони, зазвичай, прив'язуються до аналогових змінних (наприклад, цілочисельного типу INT). З урахуванням того, що для керу-

вання режимом роботи використовується логічна змінна (тип BOOL) AUTO_MODE, у основній програмі в блоці main, що виконується у головному циклі, потрібно виконувати перетворення з логічного типу до цілого. Для цього використовується одна з стандартних функцій конвертації з бібліотеки IEC-61131-3 Data Type Conversions з назвою TO_INT.

На головній сторінці передбачено відображення інтервалу часу від початку розливки

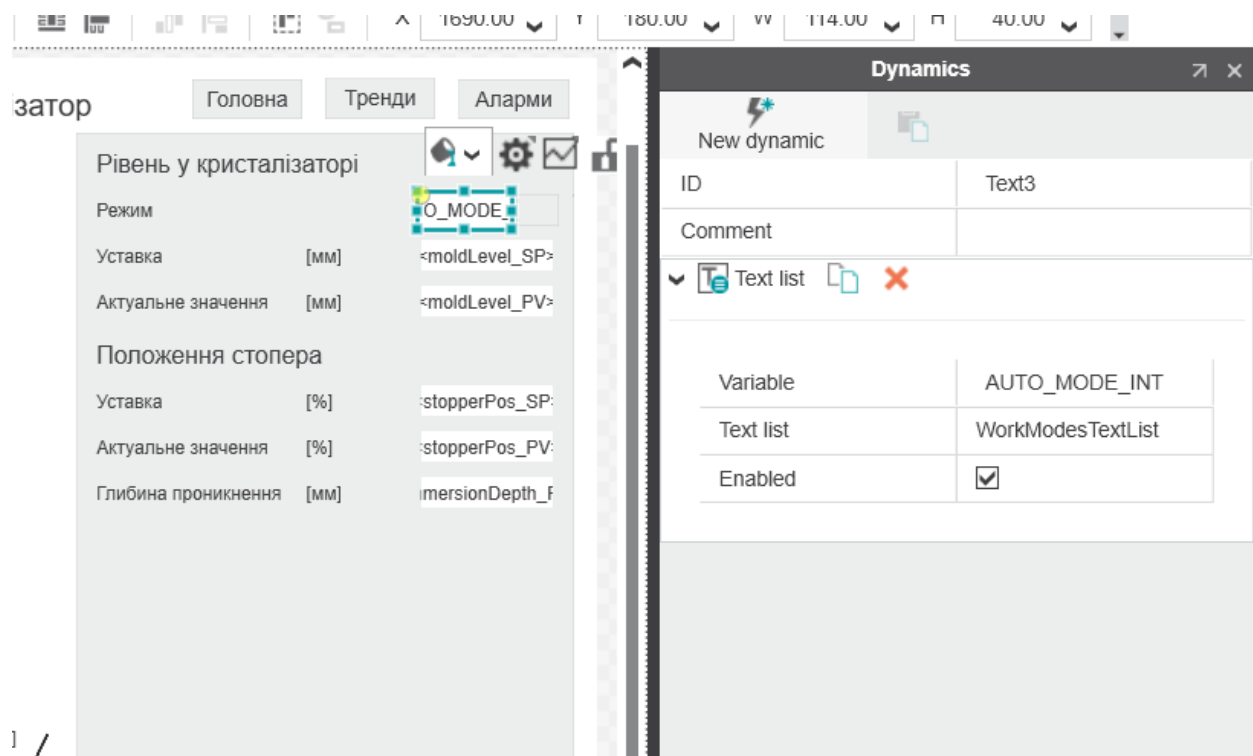


Рис. 7. Налаштування анімації зміни тексту відображення режиму роботи

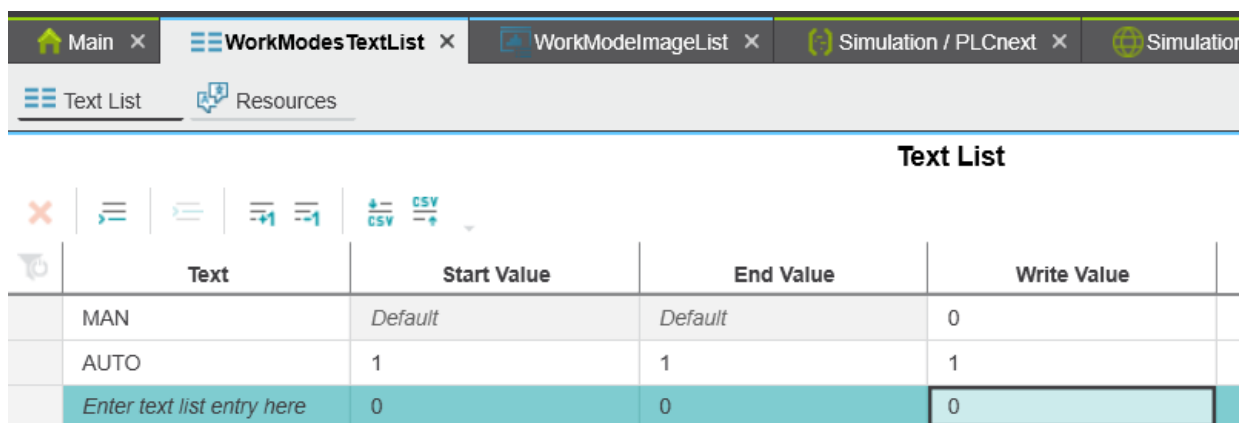


Рис. 8. Вікно редагування списку текстів та встановлення відповідності елементів зі значеннями пов'язаної змінної

металу до поточного моменту часу. Для цього використовується змінна `CastTimeLTOD` типу даних `LTIME_OF_DAY`, яка обчислюється на кожному циклі роботи блоку `main` як різниця між часом початку розливки та поточним часом. Для подальшого відображення на сторінці отримане значення перетворюється у змінну `CastTime_Str` типу `STRING` з використанням функції `TO_STRING` з вказанням потрібного формату відображення значення (у нашому випадку ми відображаємо години, хвилини та секунди за допомогою шаблону `{0:HH:mm:ss}`) (рис. 9).

На рисунку 10 наведено сторінку `Main` системи візуалізації у редакторі HMI-сторінок додатку `PLCnext Engineer`. Дана сторінка використовується у якості стартової для проєкту (встановлена як `Startup Page`) і відображається після аутентифікації користувача.

Також на ньому відображається, зокрема, і прив'язка полів до змінних, визначених у блоках коду проєкту, тож можна встановити, які саме параметри будуть відображатися під час роботи системи SCADA у режимі виконання (у runtime).

Перелік основних змінних блоку `main` програми ПЛК наведено на рисунку 11. Як видно,

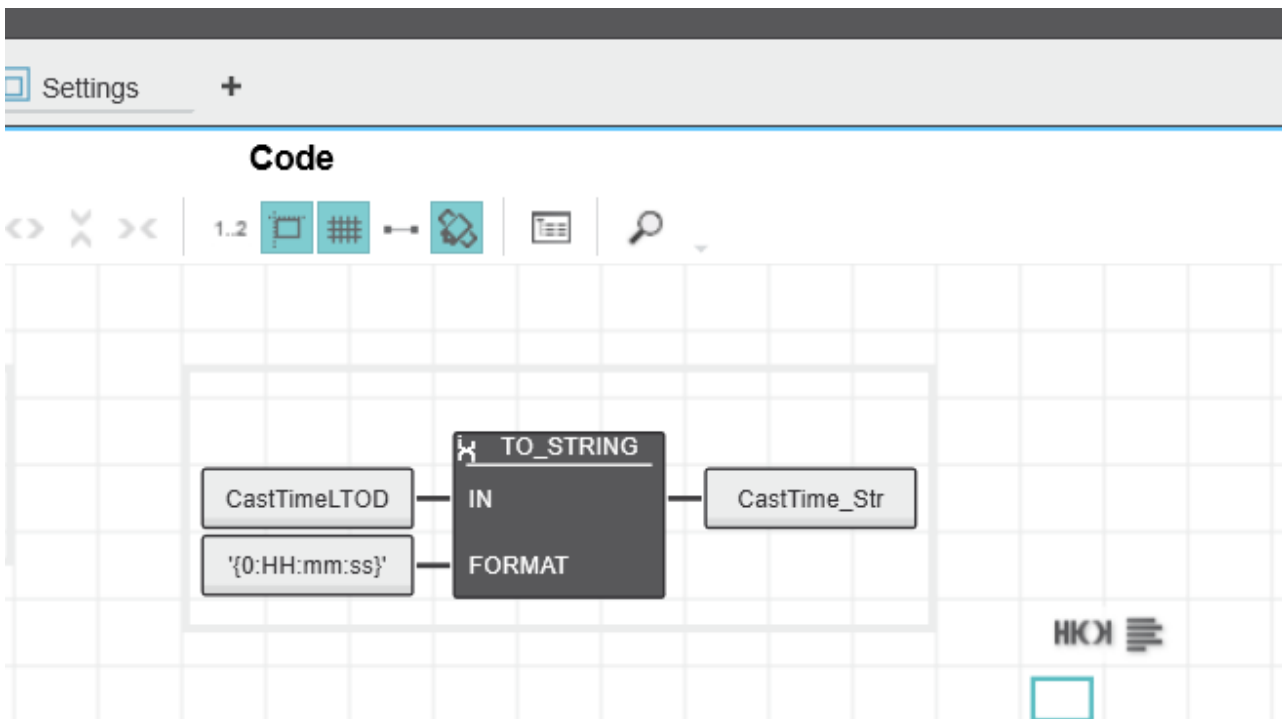


Рис. 9. Блок коду функції main для перетворення змінної, що зберігає час розливки, у рядковий тип для використання у системі візуалізації



Рис. 10. Сторінка візуалізації стану проміжного ковша та кристалізатора з прив'язкою анімованих змінних

для кожної змінної вказано тип. Також більшість змінних має значення атрибуту Usage External, що дозволяє використовувати даних атрибут не тільки у даному блоці, а і у інших блоках організації програми (POU, program organization unit). У полі

Comment задано короткий опис призначення змінної та її ролі у проєкті програмного забезпечення, що спрощує подальшу підтримку коду.

На рисунку 12 наведено зовнішній вигляд запущеного проєкту візуалізації у браузері. Як

Name	Type	Usage	Translate	Comment	Init
moldLevel_PV	REAL	External	☐	поточне значення рівня у кристалізаторі	
moldLevel_SP	REAL	External	☐	задане значення рівня у кристалізаторі	
stopperPos_PV	REAL	External	☐	поточне значення положення стопора	
stopperPos_SP	REAL	External	☐	задане значення положення стопора	
AUTO_MODE	BOOL	External	☐	режим роботи (TRUE=автоматичний)	
AUTO_MODE_INT	INT	External	☐	режим роботи для візуалізації листів текстів та зобр...	
ImmersionDepth_PV	REAL	External	☐	задане значення глибини проникнення	
CastTime_Str	STRING	External	☐	форматоване значення часу розливки	
CastTime	TIME	External	☐	час розливки	
CastTimeLTOD	LTIME_OF_DAY	External	☐	час розливки у форматі Time_OF_DAY	
castSpeed_PV	REAL	External	☐	швидкість розливки	
tundishWeight_PV	REAL	External	☐	вага металу у проміжному ковші	

Рис. 11. Вкладка Variables з описом основних змінних блоку main програми ПЛК

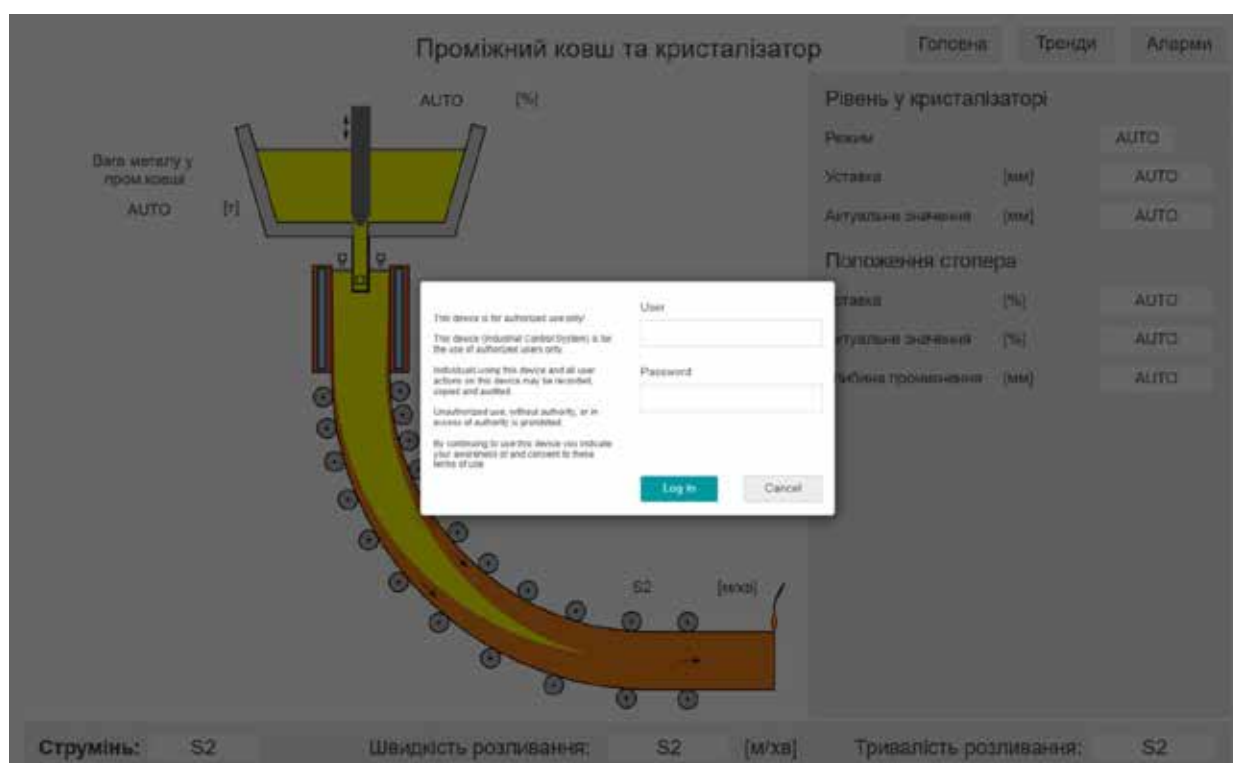


Рис. 12. Вікно авторизації користувача

видно з рисунку, при вході до системи користувачу потрібно ввести свій логін і пароль, за рахунок чого відбувається авторизація користувача та розмежування доступу до функціоналу системи диспетчерського контролю та керування.

Головну сторінку системи візуалізації після входу користувача представлено на рисунку 13.

Як видно, розроблена система дозволяє переглянути основні параметри технологічного процесу, їх уставки та поточні значення, перемикається між автоматичним та ручним режимом керування стопором проміжного ковша тощо. Інтерфейс системи розроблявся з урахуванням вимог стандарту ISA-101 та концепції ситуаційної обізнаності оператора.



Рис. 13. Головна сторінка розробленої системи візуалізації технологічного процесу керування рівнем у проміжному ковші та кристалізаторі МБЛЗ

Висновки. На основі аналізу основних тенденцій розвитку систем автоматизації металургійного виробництва визначено перспективність застосування платформи PLCnext та програмного забезпечення PLCnext Engineer для реалізації функцій диспетчерського контролю та керування рівнем металу у проміжному ковші МБЛЗ. Головними критеріями вибору даної платформи слугували висока швидкодія, відкритість, підтримка мережних протоколів та сучасних технологій інтеграції, відповідність тенденціям концепції Industry 4.0.

З використанням інструментального програмного забезпечення PLCnext Engineer розроблено

проект системи візуалізації процесу керування рівнем металу у проміжному ковші та кристалізаторі МБЛЗ. Проведена практична апробація розробленої системи з використанням симулятора ПЛК показала зручність та ефективність прийнятих проектних рішень. Водночас, не всі заплановані функції вдалося реалізувати через обмеженість доступних безкоштовно версій ПЛК для симуляції. Це, зокрема, не дало у повній мірі розгорнути та протестувати підсистему тривоги (алармів), оскільки сервер алармів доступний лише в останніх версіях процесорних модулів, під яких немає безкоштовних симуляторів.

Список літератури:

1. Архипов В. В. Інформаційні технології в промислових системах. Харків : УкрНТЕІ, 2021. 290 с.
2. Thomas B. G., Yuan Q., Zhang L., Vanka S. P. Flow dynamics and inclusion transport in continuous casting of steel. *NSF design, service, and manufacturing grantees and research conf.* 2003. P.2328 – 2362.
3. Cruz D. M., Normey-Rico J. E., Costa-Castelló R. Repetitive model based predictive controller to reject periodic disturbances. *19th IFAC World Congress Proceedings.* 2014. Vol. 47. № 3. P. 11494–11499. <https://doi.org/10.3182/2014 0824-6-ZA-1003.01948>
4. Pereira R., Almeida G., Salles J., Cuadros M., Valadão C., Bastos-Filho T. A Model-Based Predictive Controller of the Level of Steel in the Mold with Disturbances Using a Repetitive Structure. *Metals.* 2021. Vol.11. № 9. P.1458. <https://doi.org/10.3390/met11091458>
5. PLCnext Engineer online help. PLCnext Engineer online help: веб-сайт. URL: <https://engineer.plcnext.help> (дата звернення: 16.01.2025).

6. SIMATIC STEP 7 Basic/Professional V17 and SIMATIC WinCC V17. Siemens Product Information: веб-сайт. URL: <https://www.industry-mobile-support.siemens-info.com/en/article/detail/109798671> (дата звернення: 16.01.2025).

7. AVEVA™ System Platform Get Started 2023 R2. AVEVA Documentation. URL: <https://docs.aveva.com/bundle/sp-getstarted-2023-r2/resource/sp-getstarted-2023-r2.pdf> (дата звернення: 16.01.2025).

Marynych I.A., Ruban S.A. Kharlamenko V.Yu. IMPLEMENTATION OF A VISUALIZATION SYSTEM FOR THE PROCESS OF CONTROLLING THE METAL LEVEL IN THE TUNDISH OF A CONTINUOUS CASTING MACHINE BASED ON A PHOENIX CONTACT SOLUTION

In the modern metallurgical industry, considerable attention is paid to improving technological processes aimed at enhancing product quality, reducing resource consumption, and ensuring the stability of production operations. One of the key stages in the continuous casting technology is the control of the metal level in the tundish, which directly affects the quality of the final product, casting uniformity, and defect prevention. Additionally, it determines the stability of metal supply to the mold and prevents defects in the billets. The relevance of this study is driven by the increasing demands for metal product quality and the need to implement modern automation tools within the framework of Industry 4.0. The development and implementation of process visualization systems represent an essential step toward the digitalization of metallurgical production, contributing to its competitiveness. The article presents an example of the implementation of a visualization system for controlling the metal level in the tundish of a continuous casting machine, which ensures increased production efficiency, reduced defects, optimized resource consumption, and improved product quality control. The proposed approach is based on the use of modern automation and visualization technologies that align with Industry 4.0 concepts, enabling the integration of the control system with other elements of digital production. The PLCnext series from Phoenix Contact was chosen as the platform for implementing the visualization system of the technological process. Overall, the PLCnext platform is a powerful tool for automating metallurgical production, especially in the transition to Industry 4.0. Its use is justified for enterprises aiming to increase efficiency, reduce costs, and integrate modern technologies into existing processes.

Key words: automation, mold, continuous casting machine, tundish, industrial controller, visualization system, Industry 4.0, PLCNext, Phoenix Contact.