

## Дослідження роботи імітаційної моделі АСУТП з виробництва алюмінієвої катанки

Технологічна лінія з виробництва алюмінієвої катанки зазвичай складається з пічної дільниці, ливарної машини, лінії транспортування литої заготовки до прокатного стану, прокатного стану і моталок (рис.1) [8]. За допомогою скіпа завантажувальної машини 1 алюмінієві брикети подаються у газову плавильну піч шахтного типу 2. Після розплавлення метал прямує в одну з двох роздавальних печей 3, де він очищується від шлаку, піддається дегазації 4 та направляється у жолоб ливарного колеса 5, охопленого сталеву стрічкою. Під впливом охолодної води розплавлений алюміній кристалізується у виливниці колеса, що обертається, та у вигляді безперервного зливка подається у прокатний стан за допомогою правильного 6 і переднього тягового 7 пристроїв. У разі незадовільної якості лиття заготовку розрізають гідравлічними ножицями 8 на дрібні мірні шматки до тих пір, поки вона не відповідатиме встановленим вимогам.

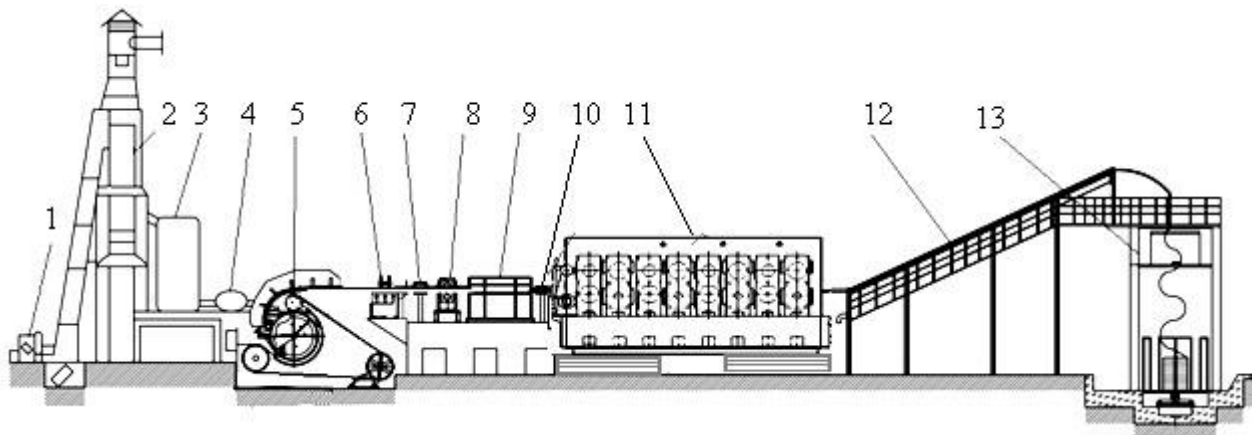


Рис. 1. Технологічна лінія неперервного лиття та прокатки

Під час виробництва дроту з алюмінієвих сплавів заготовку перед прокаткою додатково нагрівають індукційним нагрівачем 9 і за допомогою пристрою 10 подають у прокатний стан 11. Після прокатки катанка піддається процесам гартування, охолодження та сушіння 12 і подається на здвоєну моталку кошикового типу 13. Затискний тяговий пристрій разом з пристроєм утворення кілець укладає катанку в приймальний кошик, після наповнення якого відбувається заміна його на новий.

Відповідно до технології, для одержання високоякісної катанки необхідно підтримувати задану температуру розплаву у шахтній та роздавальних печах, забезпечити стабільні умови кристалізації рідкого металу у ливарному колесі, регулювати довжину алюмінієвої заготовки перед прокаткою, керувати охолодженням катанки під час прокатування у стані та процесом формування бунта у моталці. Оскільки властивості алюмінієвої катанки формуються протягом всього технологічного циклу, від плавильної печі до моталки [9], виконання усіх перелічених умов має відбуватися якісно. Тому до того, як розпочинати імітаційне моделювання АСУТП з виробництва алюмінієвої катанки, необхідно визначитися з математичними моделями об'єктів автоматизації, формулами та рівняннями, що описують зв'язок між окремими параметрами, а також алгоритмами керування технологічним процесом, за допомогою яких можна зрозуміти особливості виробництва катанки, створити системи автоматизації, дослідити вплив тих чи інших параметрів на якість регулювання і налагодити роботу ливарно-прокатного агрегату на бажаний кінцевий результат.

Виробництво катанки розпочинається з підготовки розплаву до лиття у шахтній та роздавальних печах. Важливою характеристикою рідкого алюмінію на цьому етапі є його температура, яка має підтримуватися на заданому значенні. Зазвичай на подібних об'єктах це відбувається з достатньою якістю за рахунок коригування витрати спалюваного газу [10], тому і при імітаційному моделюванні АСУТП використовувався саме цей спосіб.

Аби забезпечити стабільні умови кристалізації металу необхідно спочатку визначити загальну витрату охолодної води при заданих температурі заготовки на виході з кристалізатора та швидкості ливарного колеса [11]:

$$G_{кр} = \frac{Q_{вод}}{c_e \cdot \Delta T_e}, \quad (1)$$

де  $G_{кр}$  – витрата води, яка подається в кристалізатор, кг/с;  $Q_{вод}$  – розрахована кількість теплоти, що втрачається з охолодною водою при заданих температурі заготовки на виході з кристалізатора та швидкості ливарного колеса [12], Вт;  $c_e$  – теплоємність води, Дж/(кг·К);  $\Delta T_e$  – різниця між температурою води, що подається  $T_{ex}$  у кристалізатор та відводиться  $T_{вх}$  від нього, К.

Потім розподілити її між окремими зонами кристалізатора [13]:

$$G_i = \left( 1 + \frac{1}{z} - \frac{K_i}{K_{cp}} \right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

де  $G_i$  – витрата води на охолодження в  $i$ -ту зону кристалізатора, кг/с;  $z$  – кількість зон охолодження;  $K_i$  – коефіцієнт теплопередачі багатозарової стінки кристалізатора за напрямом охолодження в  $i$ -тій зоні, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $K_{cp}$  – середній коефіцієнт теплопередачі багатозарової стінки кристалізатора за всіма зонами охолодження, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

А після цього реалізувати комбіновану систему автоматичного регулювання теплового режиму [14], яка здійснює коригування загальної витрати води за розрахованою поточною величиною теплоти, що виноситься із заготовкою з кристалізатора  $Q_{заг}$  [15]:

$$Q_{заг} = \rho \frac{V}{60} \cdot F \cdot h_{роз} - G_{роз} \cdot (h_{роз} - h_{заг}), \quad (3)$$

де  $G_{роз} \cdot (h_n - h_k)$  – теплота, що віддається гарячим теплоносієм, Вт;  $G_{роз}$  **Error! Reference source not found.** – витрата розплаву, що визначається продуктивністю агрегату та швидкістю лиття, кг/с;  $h_n = L + c_n \cdot T_{роз}$  – ентальпія сплаву на початку виливниці, Дж/кг;  $h_k = L + c_k \cdot T_{заг}$  – ентальпія сплаву у кінці виливниці, Дж/кг;  $T_{роз}$  – початкова та  $T_{заг}$  – кінцева температура алюмінієвого сплаву у виливниці, °С;  $c_n$ ,  $c_k$  – теплоємність алюмінієвого сплаву, відповідно, для початкової та кінцевої температур, Дж/(кг·°С);

та розрахованою поточною величиною теплоти, що втрачається з охолодною водою  $Q_{вод}$ :

$$Q_{вод} = c_e \cdot G_e \cdot \Delta T_e. \quad (4)$$

Стабілізація довжини алюмінієвої заготовки здійснюється за допомогою системи автоматичного регулювання, яка на підставі математичної моделі:

$$L = L_{заг} + \left( V_{л} \cdot c_1 (T_C - T_A) + V_{л} - \frac{c_2 n}{\lambda} \right) \cdot k \Delta t, \quad (5)$$

де  $L$  – загальна довжина алюмінієвої заготовки, м;  $L_{заг} = V_{л} \cdot \Delta t$  – базова довжина отриманого зливка за цикл лиття, м;  $V_{л}$  – лінійна швидкість заготовки на виході з ливарного колеса, м/с;  $c_1$  – коефіцієнт температурного подовження алюмінію;  $T_C$  – температура зливка на виході з ливарного колеса, К;  $T_A$  – температура металу на вході в ливарне колесо, К;  $k$  – кількість циклів лиття;  $c_2$  – коефіцієнт передачі швидкості прокатного стану;  $n$  – швидкість обертання електропривода;  $\lambda$  – коефіцієнт витяжки прокатного стану;  $\Delta t$  – цикл лиття, с;

працює не тільки за довжиною заготовки, а і за збуреннями, що надходять з боку ливарного колеса і прокатного стану [16].

Охолодження катанки під час прокатування її у стані здійснюється шляхом керування витратою охолодної емульсії за температурою катанки на виході зі стану.

Формування бунта готової катанки з властивостями, що забезпечують бажаний режим охолодження, реалізується шляхом керування кутової швидкості обертання проводки виткоутворювача моталки [17]. При цьому швидкість для  $i$ -того витка змінюється ступінчасто, відповідно до виразу:

$$\omega_i = \frac{V}{R_{\max(\min)} \mp (i-1)d \cdot \alpha}, \quad (6)$$

а тривалість керування, яка дорівнює часу формування  $i$ -того витка, визначається із співвідношення:

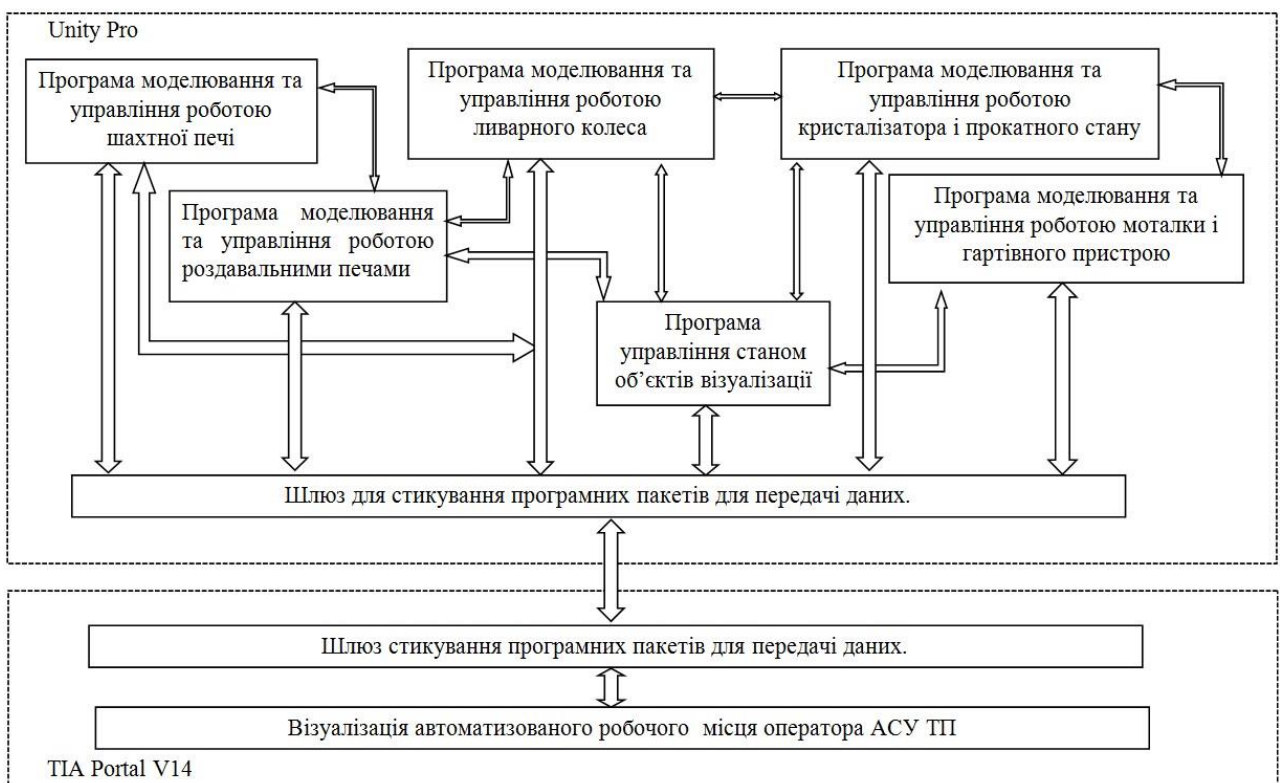
$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i}. \quad (7)$$

Тут  $\omega_i$  – кутова швидкість обертання проводки, рад/с;  $V$  – швидкість подачі катанки, м/с;  $R_{\max}$  – радіус максимального витка, м;  $R_{\min}$  – радіус мінімального витка, м;  $d$  – діаметр катанки, м;  $1 \leq i \leq m$ ,  $m = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{d \cdot \alpha}$  – кількість витків у шарі,  $\alpha$  – крок укладання витків,  $1 \leq \alpha \leq \frac{R_{\max} - R_{\min}}{2d}$ , « $R_{\max} -$ » – при укладанні шару від периферії до центру, « $R_{\min} +$ » – при укладанні шару від центру до периферії.

Як видно з наведених формул та алгоритмів керування вони відображають зв'язки між окремими технологічними параметрами на кожній ділянці технологічної лінії і відповідають вимогам, висунутим до математичного забезпечення створюваної імітаційної моделі АСУТП.

### Результати

Імітаційна модель (імітатор) технологічної лінії неперервного лиття і прокатки алюмінієвої катанки розроблена на одній обчислювальній машині з використанням пакетів програмування UnityPro виробництва Schneider Electric [18] і TIA Portal компанії Siemens [19]. За допомогою UnityPro створені програми моделювання та керування технологічними процесами і агрегатами, а TIA Portal, який має широкі можливості у створенні людино-машинного інтерфейсу, використовувався для розробки автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора-технолога. Зв'язок між цими пакетами було створено за допомогою відповідних налаштувань у кожному з них. У програмі Unity Pro здійснили підключення до мережі Ethernet. Вказали тип модуля контролера Modicon, що підтримує цю мережу та його IP-адресу. В програмі TIA Portal створили та настроїли Ethernet-мережу і вказали драйвер з'єднання з контролерами серії Modicon, IP-адресу Ethernet-модуля та маску підмережі. При створенні проекту усі об'єкти автоматизації апроксимовані інерційними ланками із запізненням, а код програми, що моделює роботу агрегатів та систем автоматизації з відповідною анімацією на екрані імітатора, створено FBD – і ST- мовами. Архітектура розробленого проекту приведена на рисунку 2.





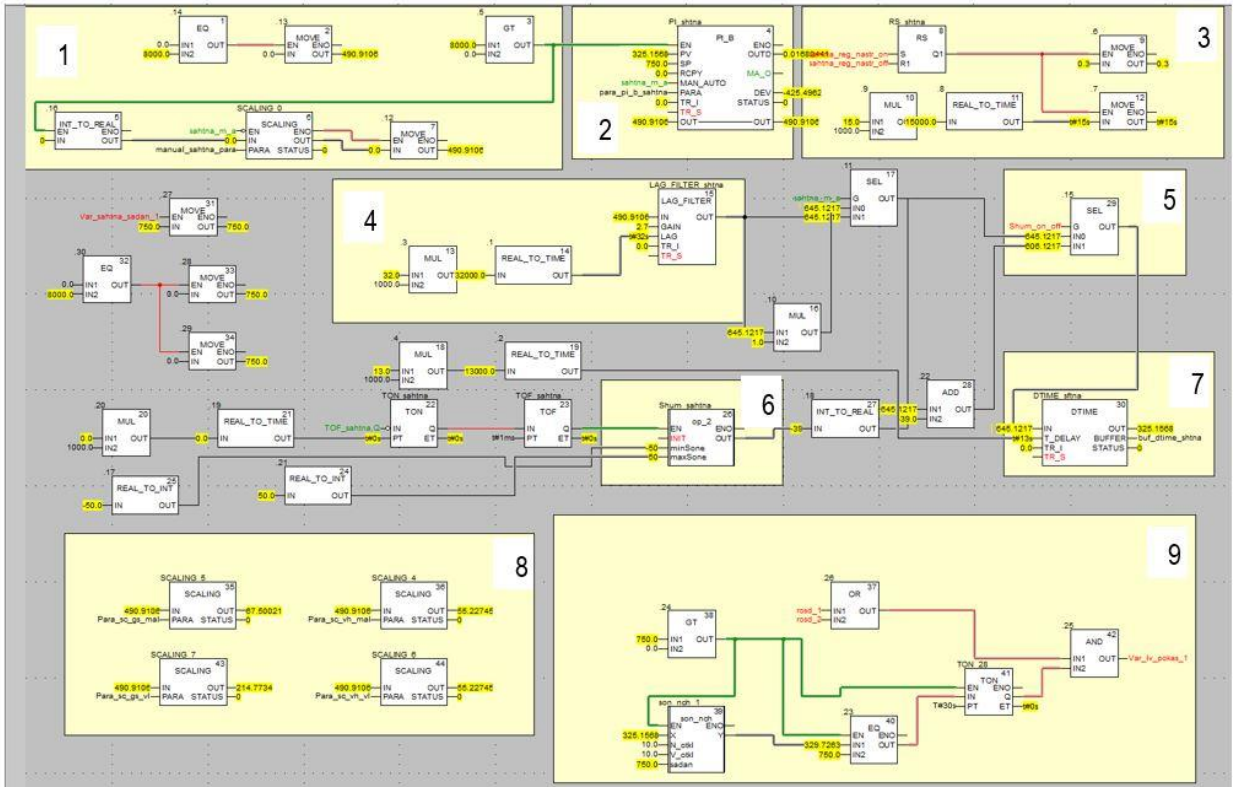


Рис.4. Програма моделювання роботи та анімації шахтної печі

Панель установлення параметрів об'єкта, настройок регулятора та активізації збурень, що випадково з'являються у системах автоматизації, показана на рисунку 5.

**Настройки**

Параметри об'єкта

Коб

T

Tau

Настройка регулятора

Kp

Ti

Збурення

Час формування нового збурення

Максимальна амплітуда збурення

Мінімальна амплітуда збурення

Shum\_sahntna

op\_2

EN ENO

INIT OUT

minSone

maxSone

```

if INIT then
  ri:=7;
end_if;
ri:=MOD(69069*ri+7,16#7FFF);
OUT:=DINT_TO_INT(INT_TO_DINT(maxSone-minSone)
  *UDINT_TO_DINT(ri)/32767)+minSone+nch;
  
```

а) б)

Рис.5. Панель настроювання системи автоматичного регулювання (а) та програмний блок формування випадкових збурень (б)

У другому вікні показані ливарна машина із заготовкою та прокатний стан з пультами керування роботою агрегатів і приладами, що показують значення регульованих параметрів (рис.6).

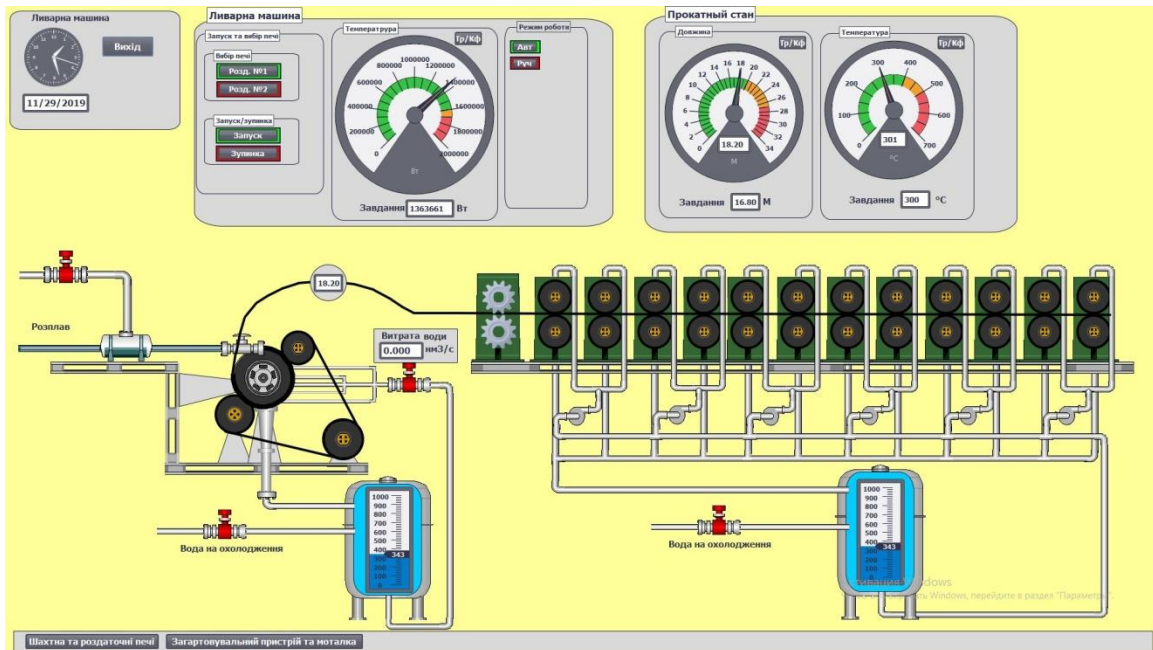


Рис.6. Вікно візуалізації ливарної машини та прокатного стану

Програмне забезпечення цього вікна дозволяє здійснити з анімацією вмикання в роботу ливарної машини та прокатного стану, керування їх швидкістю в ручному режимі, відслідковування вторинними приладами значень контрольованих і регульованих параметрів, формування траєкторії руху катанки від кристалізатора до прокатного стану та автоматичне регулювання теплового режиму кристалізатора, довжини заготовки і температури катанки після прокатного стану.

Програма регулювання теплового режиму кристалізатора за розрахованими значеннями кількості теплоти, що виноситься із заготовкою з кристалізатора, і кількості теплоти, що втрачається з охолодною водою, приведена на рисунку 7. Вона включає 9 основних фрагментів: моделі кристалізатора 1 і транспортного запізнювання (2), блоки формування 6 і увімкнення 4 збурень, блоки розрахунку кількості теплоти, що виноситься із заготовкою з кристалізатора 8, і кількості теплоти, що втрачається з охолодною водою 9, та блоки ПІ-регулятора 3 і зміни його налаштувань 7.

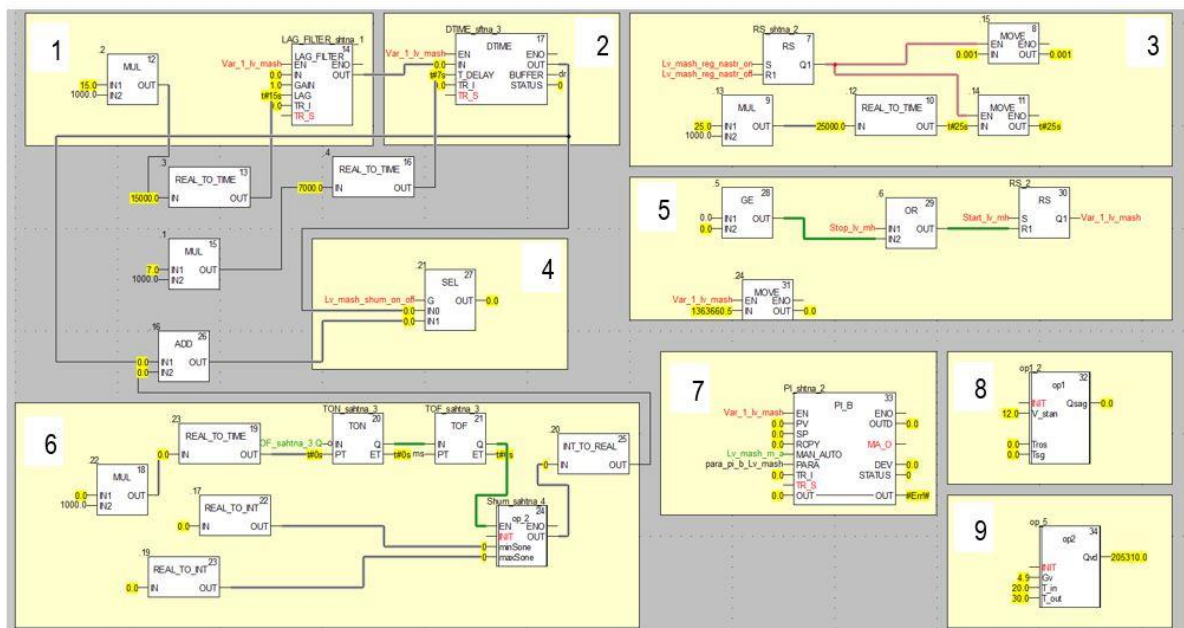


Рис.7. Програма регулювання теплового режиму кристалізатора

На рисунку 8 показана панель настроювання САР теплового режиму кристалізатора і графік перехідного процесу після встановлення заданого значення кількості теплоти, що виноситься із заготовкою з кристалізатора, при появі випадкових збурень та після зменшення завдання.



Рис.8. Панель настроювання САР теплового режиму кристалізатора (а) та графік перехідного процесу при зміні завдання та під впливом випадкових збурень (б)

Програма імітації роботи системи автоматичного регулювання довжини заготовки приведена на рисунку 9. Основними у її структурі є функціональні блоки, що формують петлю заготовки та розраховують її довжину між ливарним колесом і прокатним станом 2, моделюють ПІ-регулятор 1 і надають можливість коригувати його настройки 3.

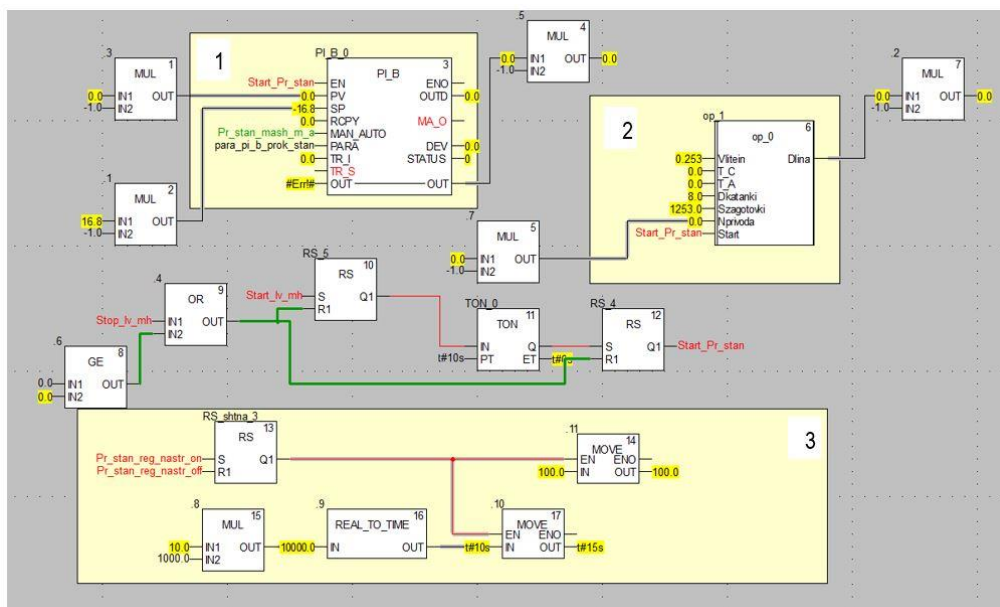


Рис.9. Програма імітації формування заготовки та регулювання її довжини

У третьому вікні імітатора представлено пристрій для гартування й охолодження катанки та здвоєна моталка кошикового типу. Також передбачені візуальні засоби контролю та керування відповідними технологічними параметрами (рис.10). З пульта оператора за допомогою кнопок можна увімкнути в роботу та вимкнути моталку, настроїти її роботу на відповідний діаметр катанки із заданим кроком укладання. При цьому на екрані відбувається емуляція її роботи та графік зміни швидкості виткоутворювача залежно від установлених параметрів формування бунта.

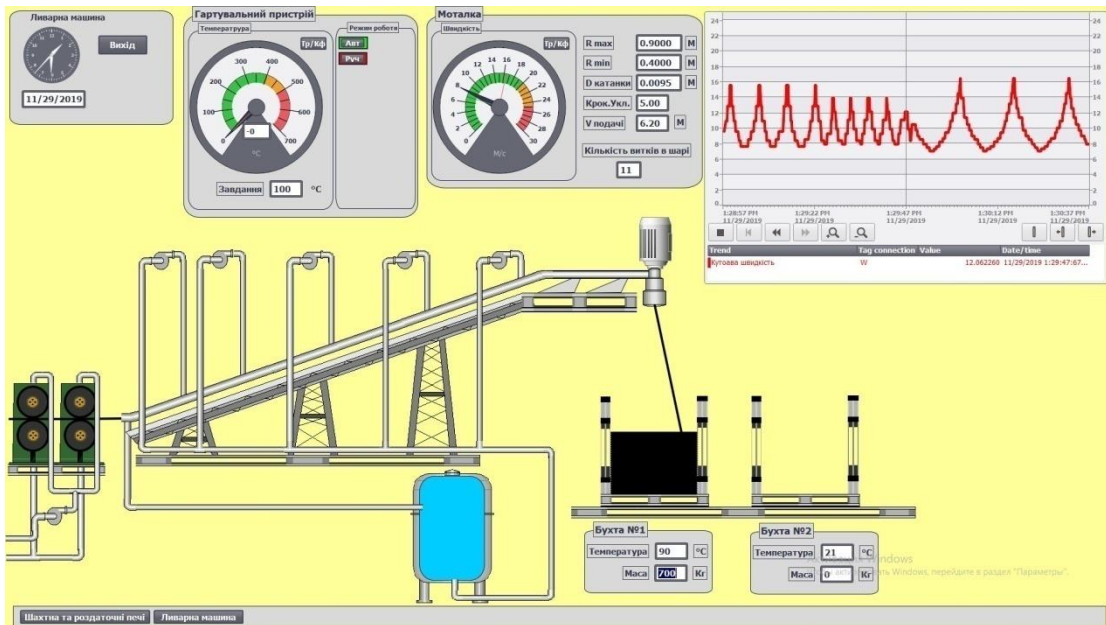


Рис. 10. Вікно візуалізації гартувального пристрою та здвоєної моталки

Код програми, що дискретно керує швидкістю виткоутворювача моталки, приведено на рисунку 11. У блоці 1 розраховується кількість витків у шарі, у блоках 2 і 4 – кутова швидкість проводки виткоутворювача при укладанні витків, відповідно, від периферії до центру і навпаки, а у блоках 3 і 5 розраховується час формування витків при кожній швидкості виткоутворювача.

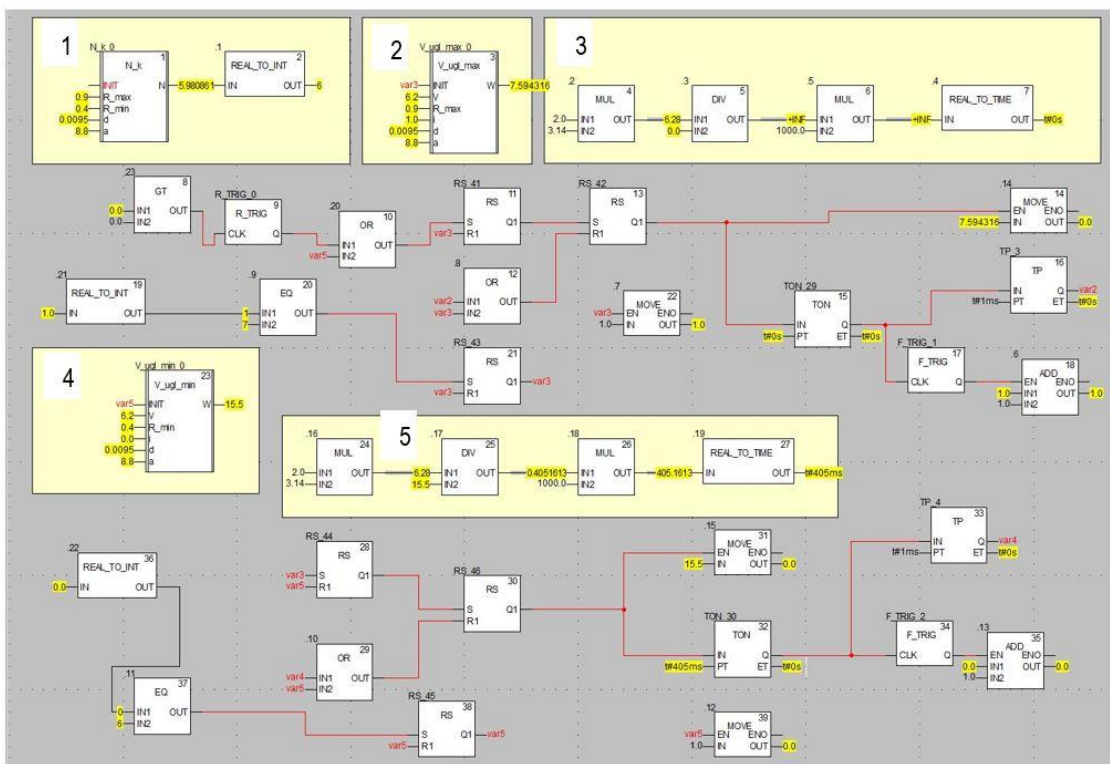


Рис. 11. Програма керування швидкістю виткоутворювача моталки

### Дослідження на імітаційній моделі

Для підтвердження можливостей розробленої імітаційної моделі АСУТП з виробництва алюмінієвої катанки методом неперервного лиття та прокатки проведені деякі дослідження у технологічному процесі та у роботі систем автоматичного регулювання.



Для одержання заготовки бажаної якості необхідно забезпечувати стабільні умови кристалізації рідкого металу або здійснювати управління процесом його твердіння. У зв'язку з цим проведені дослідження впливу швидкості обертання ливарного колеса, температури металу на вході і виході з кристалізатора на величину теплоти, що виноситься заготовкою з ливарної машини, а також довжину заготовки на шляху до прокатного стана. Для цього в імітаційній моделі у ручному режимі роботи по черзі змінювали швидкість ливарного колеса у діапазоні 0,19 – 0,21 м/с, температуру розплаву від 963К до 983К та температуру заготовки на виході з ливарного колеса з 723К до 773К і за показаннями приладів у другому вікні імітаційної моделі відслідковували кількість теплоти, що виноситься заготовкою з ливарного колеса та довжину заготовки. За результатами досліджень встановлено, що найбільший вплив на кількість теплоти, що виноситься з заготовкою має швидкість ливарного колеса та температура заготовки на його виході. При коливаннях швидкості ливарного колеса в межах (0,19 – 0,21)м/с та незмінних умовах охолодження розплаву, кількість теплоти, що виноситься заготовкою з ливарної машини, змінюється з 1029273Вт до 1194647Вт тобто на 13,8%. При підвищенні температури заготовки на виході з ливарної машини з 723К до 773К, кількість теплоти, що виноситься заготовкою з ливарного колеса збільшується з 1111960Вт до 1192411Вт, на 6,8%. У той же час вплив температури алюмінієвого розплаву незначний. При коливаннях його температури від 963К до 983К, кількість теплоти, що виноситься заготовкою змінюється від 1114764Вт до 1140656Вт, на 2,3%.

Результати досліджень, що до впливу розглянутих параметрів на довжину заготовки показали, що найбільший вплив має швидкість ливарного колеса. Коливання її в межах  $\pm 0,5\%$  від базового 0,2м/с приводять до зміни довжини заготовки на 0,18м або на 1,07%. Зміна температури розплаву від 963К до 983К та температури заготовки в діапазоні (723–773)К практично не впливають на довжину заготовки. Її коливання складають долі процента. Додаткові дослідження впливу коефіцієнта витяжки металу при його прокатуванні показали, що цей параметр має такий самий вплив на довжину заготовки, як і швидкість ливарного колеса. При зміні коефіцієнта витяжки від 22,4 до 21,4 довжина заготовки між ливарною машиною та прокатним станом збільшилась на 0,16м.

Якість роботи систем автоматичного регулювання можна дослідити за будь-яким технологічним параметром від шахтної печі до моталки. Для цього на кожному з трьох основних екранів імітаційної моделі необхідно установити автоматичний режим роботи і за допомогою настроювальної панелі вибрати настройки регулятора, активізувати появу збурень і змінити задане значення. Результати роботи системи автоматичного регулювання можна спостерігати на відповідному тренді. В роботі приведені дослідження систем автоматичного регулювання теплоти, що виноситься заготовкою з ливарного колеса, та довжини заготовки, а також системи автоматичного керування роботою моталки. На рисунку 11.17 послідовно показані перехідні процеси в системі автоматичного регулювання теплоти, що виноситься заготовкою з ливарного колеса, при зміні завдання, при регулюванні тільки за відхиленням теплоти, що виноситься заготовкою, та при регулюванні за відхиленням теплоти і збуренням, що надходить з боку системи охолодження зливка. Як видно з рисунку, якість регулювання у комбінованій системі автоматичного регулювання краща за всіма

показниками: максимальне динамічне відхилення, перерегулювання та тривалість перехідного процесу. Це суттєво сприяє стабілізації теплового режиму в кристалізаторі та одержанню заготовки з необхідними властивостями.



Рисунок 11.17 – Перехідні процеси в САР теплоти, що виноситься заготовкою з ливарного колеса

На рисунку 11.18 приведені перехідні процеси, що отримані у системі автоматичного регулювання довжини заготовки, яка працює тільки за відхиленням регульованого параметра і за алгоритмом, що використаний у імітаційній моделі. Аналіз приведених графіків показав, що якість регулювання за всіма показниками краща при комбінованій системі автоматичного регулювання (останній фрагмент графіка).



Рисунок 11.18 – Перехідні процеси в САР довжини заготовки

При дослідженні системи автоматичного керування укладанням катанки в бунт на екрані, що відображає гартівник та моталку, установили діаметр катанки 9,5мм і по черзі змінювали крок укладання, так, щоб у кожному шарі бунта формувалось послідовно – 6, 3 і 18 витків. На рисунку 11.19 видно, що керування швидкістю виткоутворювача відбувається дискретно, чим більше кількість витків у шарі, тим більше частота зміни швидкості роботи виткоутворювача.

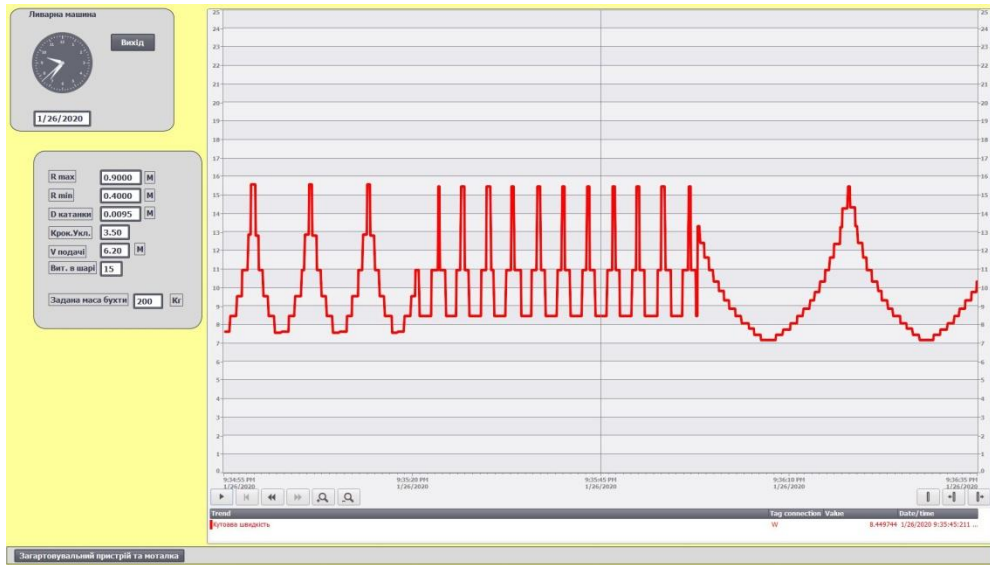


Рисунок 11.19 – Графік зміни швидкості виткоутворювача при кількості витків катанки у шарі, відповідно 6, 3 і 18