

УДК 621.746.27

DOI:10.26661/2071-3789-2019-2-42-12

Ніколаєнко Анатолій Миколайович, професор, кандидат технічних наук
Якушевич Іван Вікторович, магістрант

ОХОЛОДЖЕННЯ ЗЛИВКА ТА СТАБІЛІЗАЦІЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ В КРИСТАЛІЗАТОРІ ЛИВАРНО-ПРОКАТНОГО АГРЕГАТУ

Інженерний інститут Запорізького національного університету

Розроблено рекомендації щодо визначення загальної витрати води на охолодження зливка у роторній ливарній машині. Запропоновано алгоритм розподілення води між окремими зонами кристалізатора та систему автоматичної стабілізації його теплового режиму.

Ключові слова: ливарна машина, теплообмін, кристалізатор, система автоматичного регулювання

Вступ. Якість алюмінієвої заготовки та продуктивність ливарно-прокатного агрегату значною мірою залежать від роботи системи охолодження зливка, головною метою якої є безперервне і поступове видалення теплоти під час перетворення розплавленого алюмінію на тверду заготовку. Відбувається це за рахунок подавання води у певні зони охолодження через регульовані форсунки, розташовані за периметром і довжиною виливниці [1-3]. Одночасно загальна витрата води та розподіл її за зонами повинні бути такими, щоб фронт кристалізації металу у виливниці мав форму латинської літери «V», а твердіння зливка завершувалося на момент видалення його з ливарного колеса. Проте в технічних документаціях на технологічні лінії безперервного лиття та прокатки алюмінію виробники не дають конкретних відомостей з налагодження систем охолодження [2,3], що суттєво ускладнює запуск ливарно-прокатних агрегатів у роботу. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки рекомендацій щодо визначення загальної витрати води на охолодження зливка, а також алгоритму розподілу її між окремими зонами кристалізатора та створення умов для стабілізації його теплового режиму, а отже і якості алюмінієвої заготовки. Проте вирішення перелічених задач ускладнюється без наявності параметра, що прямо характеризує результати охолодження зливка.

Головна частина досліджень. З метою визначення технологічного параметра, який характеризує тепловий режим кристалізатора виконано аналіз теплового балансу кристалізатора машини безперервного лиття алюмінію [4]:

$$Q + Q_{кр} = Q_{вод} + Q_{вил} + Q_{стс} + Q_{стд} + Q_{пр} + Q_{заб} + Q_{дов} + Q_{заг} \quad (1)$$

де Q – загальна кількість теплоти, яку підводить рідкий алюміній у виливницю ливарного колеса; $Q_{кр}$ – теплота, що виділяється під час кристалізації зливка; $Q_{вод}$ – кількість теплоти, що витрачають з охолодною водою; $Q_{вил}$ – кількість теплоти, що витрачають на нагрівання виливниці; $Q_{стс}$ – кількість теплоти, що витрачають на нагрівання сталеві стрічки, що охоплює мідну виливницю; $Q_{стд}$ – кількість теплоти, що витрачають на нагрівання сталевих дисків ливарного колеса; $Q_{пр}$ – кількість теплоти, що витрачають на нагрівання газового проміжку між стінками виливниці та зливком; $Q_{заб}$ – втрата теплоти на термічних опорах забруднень (накипу); $Q_{дов}$ – втрата теплоти до довкілля; $Q_{заг}$ – кількість теплоти, що виводять з кристалізатора із затверділою заготовкою.

З рівняння (1) видно, якщо розрахувати приходну частину теплового балансу, а також кількість теплоти, яку виводять з кристалізатора із затверділою заготовкою за заданої температури та швидкості ливарного колеса, кількість теплоти, що витрачають на нагрівання виливниці, газового проміжку та термічних опорів забруднень, а також втрату теплоти до довкілля [4], тоді розв'язуючи рівняння теплового балансу щодо $Q_{вод}$, можна за її значенням, використовуючи формулу з роботи [5], визначити витрату води на охолодження зливка:

$$G_{ед} = \frac{Q_d}{c_d \cdot \Delta T_d}, \quad (2)$$

де $G_{кр}$ – витрата води, яку подають у кристалізатор, кг/с; c_d – теплоємність води, Дж/(кг·К); ΔT_d – різниця між температурою води $T_{вх}$, що подають у кристалізатор та температурою води $T_{вих}$, що відводять від нього, К.

Оскільки інтенсивність тепловідведення від розплаву залежить не тільки від витрати води на охолодження, а і від умов теплообміну в кристалізаторі, для забезпечення рівномірного твердіння рідкого металу за поперечним перерізом і довжиною зливка, витрата води в окремі зони

кристалізатора має відбуватися з урахуванням коефіцієнтів теплопередачі його багат шарової стінки у цих зонах [4].

Для визначення алгоритму розподілу витрати води між окремими зонами кристалізатора припустимо, що коефіцієнти теплопередачі за напрямками охолодження в окремих зонах є однаковими та дорівнюють середньоарифметичному $\hat{E}_{\text{н\ddot{o}d}} = \hat{E}_{\text{н\ddot{o}i}} / n$. Тоді відсоток витрати води на кожну зону охолодження від загального її об'єму, що подають у кристалізатор, складає:

$$G = \frac{\hat{E}_{\text{н\ddot{o}d}}}{\hat{E}_{\text{н\ddot{o}i}}} \cdot 100\% , \quad (3)$$

де $\hat{E}_{\text{н\ddot{o}i}} = \sum_1^n K_i$ – сумарний коефіцієнт теплопередачі багат шарової стінки кристалізатора за всіма зонами охолодження.

Якщо коефіцієнт теплопередачі K_1 більше $K_{\text{сеп}}$ на $\Delta 1$, %, тоді реальна витрата води у першу зону охолодження має бути менше за уявну на $\Delta 1$, %:

$$G_1 = G - \Delta 1, \% . \quad (4)$$

Якщо коефіцієнт теплопередачі K_2 менше $K_{\text{сеп}}$ на $\Delta 2$, %, тоді реальна витрата води у другу зону має бути більше за уявну на $\Delta 2$, %:

$$G_2 = G + \Delta 2, \% . \quad (5)$$

І так за всіма коефіцієнтами теплопередачі.

Виходячи з цього, для рівномірного твердіння металу в роторній ливарній машині за поперечним перерізом та довжиною зливка, необхідно визначити зони охолодження кристалізатора та коефіцієнти теплопередачі його багат шарової стінки за напрямками охолодження у кожній з них і воду, що подають у кристалізатор, розподілити поміж визначеними зонами охолодження, відповідно до рівняння:

$$G_i = \frac{\hat{E}_{\text{н\ddot{o}d}}}{\hat{E}_{\text{н\ddot{o}i}}} \cdot 100\% - \frac{K_i - K_{\text{сеп}}}{K_{\text{сеп}}} \cdot 100\% = \left(1 + \frac{1}{n} - \frac{K_i}{K_{\text{сеп}}} \right) \cdot 100\% \quad (6)$$

де G_i – витрата води в i -ту зону кристалізатора на охолодження, кг/с; n – кількість зон охолодження; K_i – коефіцієнт теплопередачі багат шарової стінки в i -тій зоні кристалізатора за напрямком охолодження, Вт/(м²·К); $K_{\text{сеп}}$ – середній коефіцієнт теплопередачі багат шарової стінки кристалізатора за всіма зонами охолодження, Вт/(м²·К).

Після визначення загальної витрати води на охолодження зливка, а також розподілу її за зо-

нами кристалізатора, стабілізувати його тепловий режим за наявності збурень можна тільки з використанням системи автоматичного регулювання.

Зазвичай на подібних агрегатах стабілізацію теплового режиму реалізують за рахунок коригування витрати води, що подають на охолодження зливка [6,7]. Проте недоліком таких систем автоматизації є те, що регулювання теплового режиму кристалізатора здійснюють не за прямими показниками його стану, а шляхом регулювання охолодження зливка за непрямими показниками – температурою води до та після охолодження. Тому, для підвищення якості регулювання бажано використовувати у системі автоматизації параметр, що напряму характеризує тепловий режим кристалізатора.

Виходячи з рівняння теплового балансу, таким параметром можна вважати теплоту, що виводять з кристалізатора із затверділою заготовкою $Q_{\text{з\ddot{a}d}}$ [4]:

$$Q_{\text{з\ddot{a}d}} = \frac{\rho \cdot V}{60} \cdot F \cdot h_{\text{д\ddot{i}c}} - G_{\text{д\ddot{i}c}} \cdot (h_{\text{д\ddot{i}c}} - h_{\text{з\ddot{a}d}}) , \quad (7)$$

де $G_{\text{д\ddot{i}c}} \cdot (h_{\text{г}} - h_{\text{e}})$ – теплота, що віддається гарячим теплоносієм, Вт [8]; $G_{\text{д\ddot{i}c}}$ – витрата розплаву, що визначається продуктивністю агрегату та швидкістю лиття, кг/с; $h_{\text{г}} = L + c_{\text{n}} \cdot T_{\text{д\ddot{i}c}}$ – ентальпія сплаву на початку виливниці, Дж/кг; $h_{\text{e}} = L + c_{\text{e}} \cdot T_{\text{з\ddot{a}d}}$ – ентальпія сплаву у кінці виливниці, Дж/кг; $T_{\text{д\ddot{i}c}}$, $T_{\text{з\ddot{a}d}}$ – початкова та кінцева температура алюмінієвого сплаву у виливниці, °С, відповідно; c_{n} , c_{e} – теплоємність алюмінієвого сплаву, відповідно, для початкової та кінцевої температури, Дж/(кг·°С).

При цьому, якщо як допоміжний параметр використовувати кількість теплоти, що втрачають з охолодною водою $Q_{\text{в\ddot{o}d}}$ [5]:

$$Q_{\text{в\ddot{o}d}} = c_{\text{в}} \cdot G_{\text{в}} \cdot \Delta T_{\text{в}} , \quad (8)$$

тоді можна реалізувати систему автоматичного регулювання теплового режиму кристалізатора, яка буде коригувати витрату води на охолодження зливка не тільки за відхиленням основного параметру $Q_{\text{з\ddot{a}d}}$, а і за збуреннями, що надходять з боку параметра $Q_{\text{в\ddot{o}d}}$.

На рис. 1 наведено структурну схему системи автоматичного регулювання теплового режиму кристалізатора. На підставі інформації з датчиків швидкості лиття V , температури розплаву $T_{\text{роз}}$ та температури затверділої заготовки $T_{\text{з\ddot{a}d}}$ з урахуванням відомих значень решти параметрів, обчислювальний пристрій ОПІ за формулою (7) обчислює поточне значення теплоти,

що виводиться заготовкою з кристалізатора Q_{zag} , яку порівнюють з розрахованим заздалегідь заданим значенням $Q_{c\ddot{a}a}^{c\ddot{a}a}$ для встановленої швидкості лиття та теплофізичних характеристик розплаву, що кристалізують. Сигнал, пропорцій-

ний різниці цих величин прямує на перший вхід регулятора $Wp(p)$. Під час незбігання розрахованих параметрів Q_{zag} і $Q_{c\ddot{a}a}^{c\ddot{a}a}$ регулятор змінює подавання води на охолодження зливка до повної компенсації розбалансу на його вході.

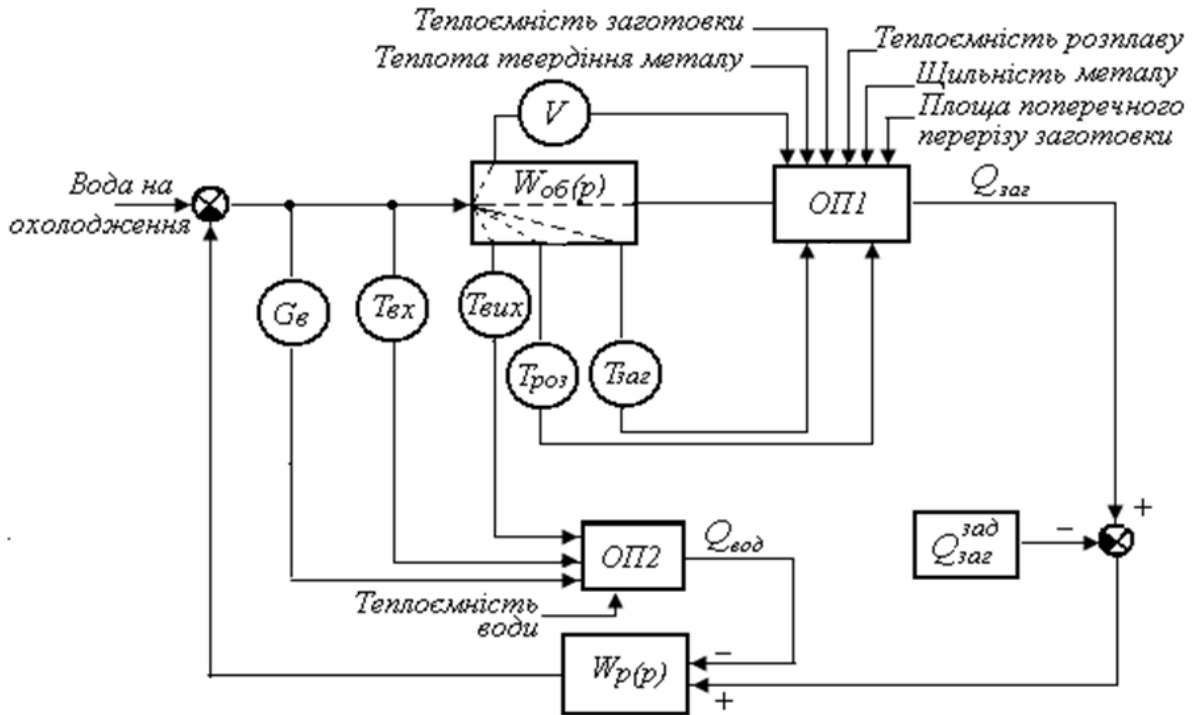


Рисунок 1 – Структурна схема системи автоматичного регулювання теплового режиму кристалізатора

Під час змінювання вхідних параметрів G_v , $T_{вх}$ або $T_{вих}$, що впливають на ступінь охолодження зливка, у системі регулювання з'являється збурення з боку теплоти, що втрачають з охолодною водою $Q_{вод}$. Обчислювальний пристрій ОП2 за формулою (8) обчислює поточну величину $Q_{вод}$ і подає сигнал пропорційний цьому параметру на другий вхід регулятора $Wp(p)$, що здійснює випереджувальне коригування витрати охолодної води у бік компенсації збурення $Q_{вод}$. Оскільки запізнювання за каналом регулювання $Q_{вод}$ на порядок менше запізнювання за каналом регулювання Q_{zag} , використання інформації про теплоту, яку втрачають з охолодною водою, підвищить якість регулювання, що призведе до стабілізації процесу кристалізації та покращенню структури заготовки.

Дослідження роботи системи автоматичного регулювання теплового режиму в кристалізаторі ливарно-прокатного агрегату виконано на комп'ютерній моделі (рис. 2), що створена за

допомогою пакетів програмування мікропроцесорних контролерів «UnityPro» виробництва «Schneider Electric» [9] і «TIA Portal» компанії «Siemens» [10], яка додатково має широкі можливості у створенні людино-машинного інтерфейсу.

Для забезпечення зв'язку між цими пакетами в програмі «UnityPro XL» створили підключення до мережі «Ethernet». В настройках вказали тип модулю Modicon, що підтримує цю мережу та його IP-адресу. Створили та налаштували Ethernet-мережу в програмі TIA Portal і вказали драйвер з'єднання з контролерами Modicon, IP-адресу Ethernet-модуля та маску підмережі.

Як видно з рис. 3, запропонована система автоматичного регулювання забезпечує високу якість роботи та стійкість за появи як зовнішніх так і внутрішніх збурень. Це суттєво сприяє стабілізації теплового режиму в кристалізаторі та одержанню заготовки з необхідними властивостями.

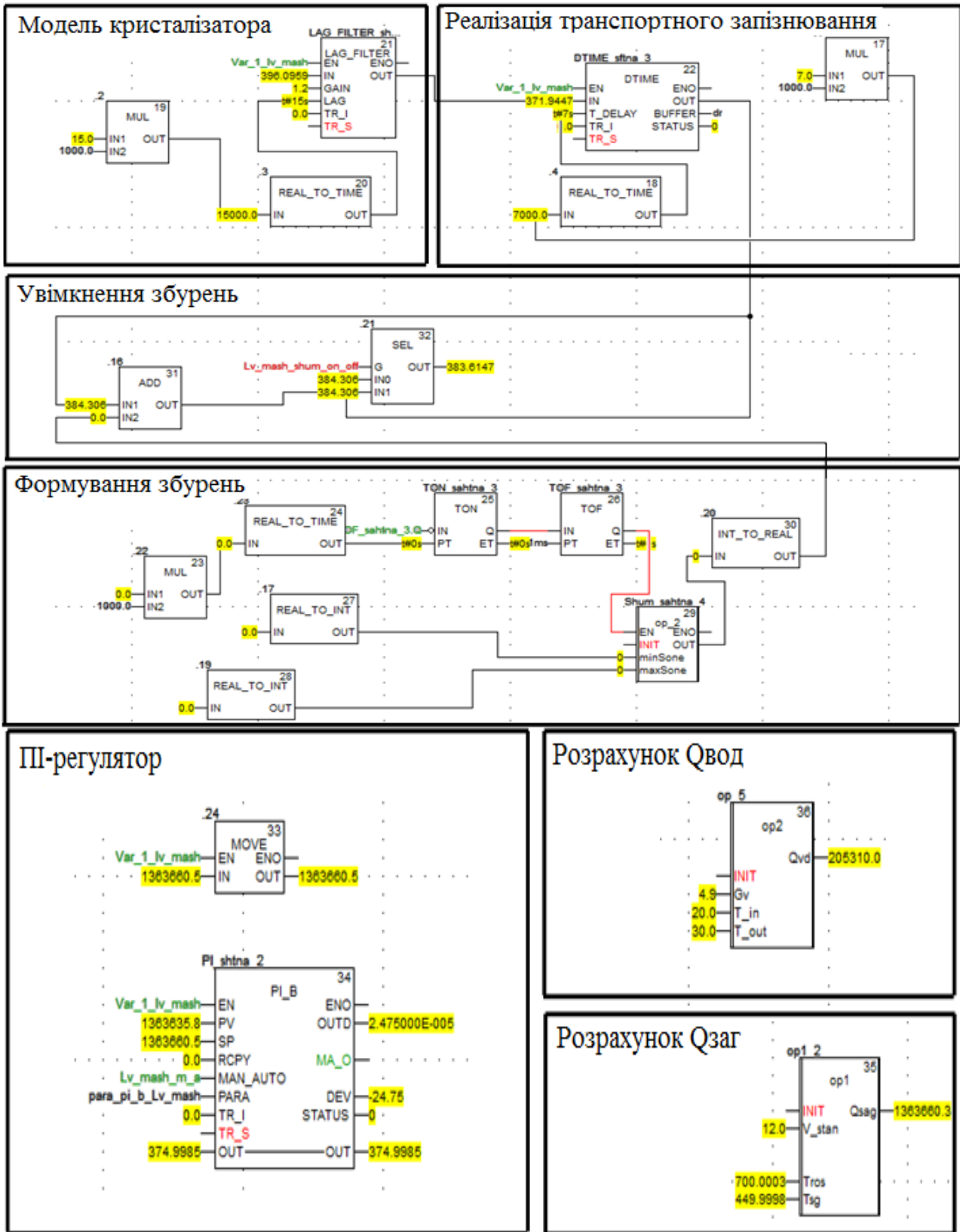


Рисунок 2 – Комп’ютерна модель САР теплового режиму в кристалізаторі ливарно-прокатного агрегату

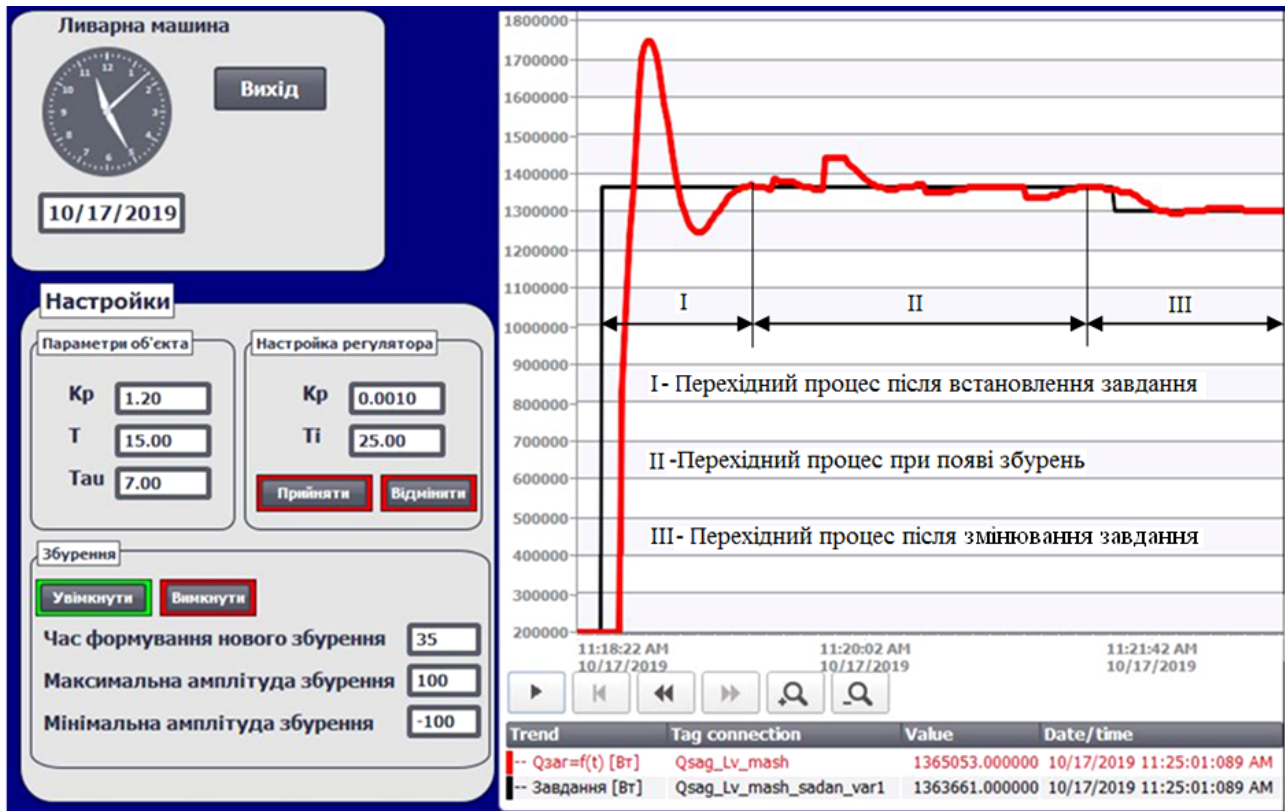


Рисунок 3 – Перехідні процеси при встановленні завдання, його зміні та при появі збурень

Висновки. На підставі аналізу рівняння теплового балансу та математичних співвідношень для обчислень його складових, встановлено, що за значенням теплоти, яку втрачають з охолодною водою $Q_{вод}$, можна розрахувати необхідну загальну витрату води на охолодження зливка у ливарній машині. Запропоновано алгоритм розподілу визначеної витрати води між окремими зонами кристалізатора з урахуванням коефіцієн-

тів теплопередачі його багаточарової стінки в цих зонах та систему автоматичного регулювання, яка за кількістю теплоти, що виводять з кристалізатора із затверділою заготовкою та значенням втрат теплоти з охолодною водою забезпечує якісне регулювання теплового режиму в кристалізаторі не тільки за відхиленням, а й за збуренням.

Бібліографічний перелік

1. **Ніколаєнко А. М.,** Таран Ю. П., Трегулова І. П. Особливості технології безперервного лиття та прокатки алюмінію. *Металургія : наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2017. Вип. 1(37). С. 100-105.
2. **Техническое описание** и руководство по эксплуатации литейно-прокатного оборудования по производству алюминиевой катанки с дополнениями. «Continuous Properzi S.P.A.». 1992.
3. **Линия для непрерывного литья** и прокатки алюминия. Техническое описание. Шанхайский научно-исследовательский электротехнический институт. КНР, 2008. 40 с.
4. **Ніколаєнко А. М.,** Трегулова І. П., Барищенко О. М. Дослідження теплообміну у роторній ливарній машині. *Металургія : наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2017. Вип. 1(41). С. 64-69.
5. **Емельянов В. А.** Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок. Москва : Металлургия, 1988. 143 с.
6. **Глинков Г. М.,** Маковский В. А. АСУТП в черной металлургии. М. : Металлургия, 1999, 310 с.
7. **Способ управления** тепловым режимом. А.С. 197099. СССР. МПК В 22 d/00. Опубл. 31.05.1067.
8. **Таранцева К. Р.,** Таранцев К. В. Процессы и аппараты химической технологи в технике защиты окружающей среды: учебное пособие. М. : НИЦ ИНФРА-М, 2014. 412 с.
9. **Пупена О. М.,** Ельперін І. В. Програмування промислових контролерів у середовищі Unity Pro : Навч. посібник. Київ : Видавництво Ліра-К, 2017. 376 с.
10. **Руководство по программированию** S7-1200/S-1500. Entry-ID: 81318674, V1.4, 11/2015. 109 с. URL: https://ecshop.com.ua/files/programming_S7_1200_1500.pdf. (дата звернення 20.09.2019).

Николаенко Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, инженерный институт Запорожского национального университета (Украина, Запорожье). E-mail: tetri@ukr.net

Якушевич Иван Викторович, магистрант кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, инженерный институт Запорожского национального университета (Украина, Запорожье). E-mail: ei@znu.edu.ua

ОХЛАЖДЕНИЕ СЛИТКА И СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ ЛИТЕЙНО-ПРОКАТНОГО АГРЕГАТА

Разработаны рекомендации по определению общего расхода воды на охлаждение слитка в роторной литейной машине. Предложены алгоритм распределения воды между отдельными зонами кристаллизатора и система автоматической стабилизации его теплового режима.

Ключевые слова. литейная машина, слиток, охлаждение, кристаллизатор, теплообмен, система автоматического регулирования

Nikolaenko Anatoly, Candidate of Technical Sciences, Professor of Department of Automated Control by Technological Processes, Engineering Institute of Zaporizhzhia National University (Ukraine. Zaporizhzhia). E-mail: tetri@ukr.net

Yakushevich Ivan, Postgraduate of Department of Automated Control by Technological Processes, Engineering Institute of Zaporizhzhia National University (Ukraine. Zaporizhzhia). E-mail: ei@znu.edu.ua

COOLING OF BAR AND STABILIZING OF THERMAL MODE IN CRYSTALLIZER OF CASTING-ROLLING AGGREGATE

The performance of the casting unit depends largely on the operation of the ingot cooling system, whose main purpose is the continuous and gradual removal of heat during the conversion of molten aluminum to a solid workpiece. However, in the technical documentation for continuous casting and aluminum rolling lines, manufacturers do not provide specific information on the adjustment of cooling systems, which significantly complicates the start-up of rolling-stock units. In this regard, there is a need to develop recommendations for determining the total flow rate of water for cooling the ingot, as well as the algorithm for distributing it between the individual zones of the mold and creating conditions for stabilization of its thermal regime. Based on the analysis of the equilibrium balance of the crystallizer of the continuous casting machine of aluminum and the mathematical ratios for calculating its components, it is established that the value of the total heat lost with the cooling water can calculate the required total water flow to cool the ingot in the foundry machine. An algorithm for the distribution of the determined water flow between the individual zones of the crystallizer is proposed taking into account the coefficients of heat transfer of its multilayer wall in these zones and the system of automatic control, which by the amount of heat discharged from the crystallizer with the solidified workpiece and the value of heat loss by the cooling water the crystallizer is not only in deviation but also in perturbation. The study of the proposed system was performed on a computer model, created with the help of programming packages of microprocessor controllers "UnityPro" manufactured by "Schneider Electric" and "TIA Portal" of "Siemens", showed high quality of its work and stability in the appearance of both external and internal disturbances.

Key words; casting machine, cooling, crystallized, automatic control system

Стаття надійшла до редакції 18.10.2019 р.

Рецензент, проф. І. Г. Яковлева