

## АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КОНВЕРТЕРНОЮ ПЛАВКОЮ

*Приведен анализ существующих методов контроля температуры кислородно - конверторной ванны. Исследован балансовый метод контроля температуры, кинетика выгорания примесей железа, усвоения сыпучих материалов, нагрева футеровки и ее связь с изменением температуры ванны. Приведены результаты моделирования температурного режима конвертерной плавки.*

*An analysis of existing methods of controlling the temperature of oxygen - of converter bath. Investigated the balance method of temperature control, the kinetics of burning iron impurities, assimilation of bulk materials, the heating of the lining and its relation to changes in bath temperature. The results of simulation temperature konvertenoy melting.*

### Вступ

Серед способів виплавки сталі киснево-конвертерний є одним із найбільш складних за природою і методами керування, особливо оперативного. Керування здійснюється в умовах неповноти інформації, тому що при сучасному рівні розвитку техніки неможливо здійснити прямі виміри основних вихідних координат – складу металу, шлаку та їх температури.

Конвертерне виробництво сталі характеризується використанням засобів автоматизації й обчислювальної техніки для керування процесом. Автоматична система керування (АСК) забезпечує нормальну роботу цеха при мінімальній собівартості продукції, підвищує якість і розширює асортимент сталі, що виплавляється.

В 90-2000-і роки в наслідок інтенсивного введення в дію нових і модернізації діючих конвертерів, що оснащені системами автоматизації, постійно удосконалювались як теорія конвертерного процесу, так і технологія, устаткування, АСК, методи досліджень і засоби вимірювання. В працях вчених-теоретиків і спеціалістів практиків з'явилися нові відомості, що уточнюють і доповнюють попередні дослідження в галузі конвертерного виробництва [1, 2].

Відомі фізико-хімічні моделі описують процеси, що проходять в конвертерній ванні для вузьких діапазонів зміни температури і складу металу й шлаку. Рівняння нелінійні відносно масових часток домішок. Аналіз моделей, які використовуються на практиці, показує, що задача керування в них зводиться до обчислення таких керуючих діянь, які переводили б оптимальним чином об'єкт із вихідного стану в заданий кінцевий. Такі моделі успішно працюють тільки при ретельній підготовці шихтових матеріалів за хімічним складом, температурою та насипною масою, що відсутнє у вітчизняних конвертерних цехах.

Як правило навіть при повній модернізації конвертера моделі, алгоритми, засоби контролю і регулювання процесу, підходи до побудови обчислювального комплексу не є уніфіковані, а враховуючи неодноразову модернізацію конвертерів в цеху, що розтягується на роки і десятиліття (кількість конвертерів в цеху коливається від 2 до 6), устаткування й системи автоматизації не уніфіковані й важко сумісні.

Все це свідчить про актуальність розробки АСК конвертерною плавкою, зокрема моделей і устаткування.

Наведені в статті дослідження проводились в Національному технічному університеті України «КПІ» за темами „Принципи створення математичної моделі системи управління кисневим конвертером”, Державний реєстраційний номер 0109U001838 і „Математичні моделі й алгоритми системи управління кисневим конвертером”, Державний реєстраційний номер 0110U002880.

### Постановка задачі

Метою досліджень є розробка принципів уніфікації створення АСК конвертерною плавкою, зокрема моделей, алгоритмів, і технічних засобів.

### Методика досліджень

Дослідження проведені на конвертерах місткістю 350 т ВАТ «Металургійний комбінат „Азовсталь”». Технологія продувки у процесі досліджень характеризувалась наступним чином. В конвертерах переплавлявся переробний чавун з вмістом (%): силіцію 0,4...1,1, мангану 0,3...0,5, сірки 0,02...0,04, фосфору 0,02...0,15 і температурою 1250...1450 °С. В завалку завантажували металевий брухт у кількості 0...30 % від маси чавуну. Рідкий чавун із міксера подавали в 300 т ковшах. Як шлакоутворюючі матеріали використовували вапно в кількості 8...15 % і плавиковий шпат – 0,1...0,5 %. В останній час при доведенні плавки на агрегатах позапічної обробки плавиковий шпат в продувку не вводять. Продувку проводили через багатосоплові фурми з кількістю сопел 6 – одне центральне, інші розташовані під кутом вісі сопла до вертикалі 15...20 град. Інтенсивність подання кисню становила 2,5...3,5 м³/(т · хв.). Асортимент марок сталі характеризувався вмістом вуглецю 0,09...0,40 % і температурою випуску 1620...1700 °С.

У період дослідження технологічне устаткування було оснащене такими засобами вимірювання і передачі інформації: крановими електронно-тензометричними вагами для виміру маси брухту в совку, чавуна і сталі в ковші з точністю 0,5 %; вимірювальною системою контролю температури чавуна з точністю 8 °С; газоаналізаторами газів,

що відходять з конвертера, і дуття під час продувки системи ФТІАН; витратомірами кисню дуття з точністю 0,5 %; газів, що відходять, з точністю 2 %; вагами для виміру маси сипких і розкиснюючих з точністю 0,2 %; вимірювачами акустичної характеристики продувки з точністю 1,5 %; температури газів, що відходять, з точністю 10 °C і швидкодією 8 с; тиску кисню до та після відсічного клапану з точністю 0,5 %; вимірювальними системами контролю хімічного складу чавуна, металу і шлаку з точністю виміру за ДСТУ; положення фурми з точністю 0,16 калібр., з корекцією на розгараження футерівки і коливання маси металошихти;

Дослідження проводились на плавках поточного виробництва, балансових і таких, що проводились зі зміною параметрів за допомогою методів планування експерименту. На всіх плавках відбиралися проби чавуну, металу і шлаку на повалках конвертера і фіксувалися вихідні параметри процесу, також частину вимірювань робили занурювальним зондом без припинення продувки.

### Результати досліджень

#### Критерій керування

Критерій апроксимуємо виразом

$$I(x_1, x_2, \dots, x_n) = \alpha_1 M(C_M - C^*)^2 + \alpha_2 M(t_M - t^*)^2 + \alpha_3 M(S_M - S^*)^2, \quad (1)$$

де  $I \rightarrow \min$  – функціонал від керуючих діянь;  $x$  – керуючі діяння, наприклад, для статичного керування  $m_b, m_v, m_{vp}, m_{sh}, V, H$ ;  $\alpha_1, \dots, \alpha_3$  – коефіцієнти, що залежать від масштабів змінних, які входять у критерій, а також від співвідношення частот коректування плавки по вуглецю, температурі й сірці відповідно;  $M$  – знак математичного очікування;  $C^*, t^*, S^*$  – “точки прицілу” по вуглецю, температурі і сірці в металі (визначаються методом експертних оцінок в залежності від марки сталі, що виплавляється і технологічної ситуації на початку продувки: наявність замовлення марки сталі, готовність сталерозливного ковша, розливної площадки і установки позапічної обробки й ін.). Тут  $m_b, m_v, m_{vp}, m_{sh}$  – маса відповідно брукху, вапна, вапняку, плавикового шпату,  $t$ ;  $V$  – загальна витрата дуття на плавку,  $m^3$ ;  $H$  – середньоінтегральна відстань кінцевика фурми від рівня спокійного металу, калібр.

#### Принципи створення моделі

Основою математичного описання технології киснево-конвертерної плавки є керування за “зразковими”

плавками. Маючи вибірку траєкторій плавки, що успішно проведені ( $\vec{U}_1[\tau], \dots, \vec{U}_n[\tau]$ ), можна говорити про

виділення в реальній траєкторії керування  $\vec{U}_i[\tau]$ , двох складових: програмної частини  $\vec{U}_{i_{пр}}[\tau]$  і додаткового

керування  $\Delta \vec{U}_i[\tau]$ , що зв’язане як з неточним визначенням вихідного стану плавки, так і з дією перешкод. Таким чином, стратегія керування не може бути зведена тільки до детермінованої, а містить детерміновану частину по вибору програми і стохастичну для додаткових керуючих діянь.

Відстань  $d(\vec{U}_i[\tau], \vec{U}_j[\tau])$  між траєкторіями керування відповідно для  $i$ -ї й  $j$ -ї плавки використовували для розбиття траєкторій керування на класи  $S_1, S_2, \dots, S_k$  так, щоб кожному класу  $S_i$  відповідали траєкторії керування  $S_i \sim \{U_{i1}[\tau] \dots U_{ik}[\tau]\}$ , що є реалізацією одної програми керування  $\vec{U}_{i_{онт}}[\tau]$  з різними додатковими керуючими діяннями  $\Delta \vec{U}_i[\tau]$ . Цю умову можна виконати шляхом відповідного вибору функції ваги так, щоб відстань між реальними траєкторіями керування було менше, ніж відповідна відстань  $d(\vec{U}_i[\tau], \vec{U}_v[\tau])$  для траєкторій, які реалізують різні програми керування [3].

#### Реалізація моделі

Розроблена за наведеними принципами модель призначена для функціонування в інформаційно - порадчому режимі, при якому технічні засоби, що реалізують модель, видають оперативному персоналу інформацію, зокрема про керуючі параметри процесу. Модель забезпечує: шляхом видання уставок в локальні системи контролю і керування положенням фурми, регулювання витрати кисню, в АСК ТП ВТ (вертикального тракту сипких матеріалів) діяти на приводи кисневих фурм, клапани витрати дуття і формувати завдання для програмного керування дозуванням сипких і феросплавів. Модель забезпечує керування продувкою плавки, в тому числі й на останніх хвилинах продувки (до 2,5 хв.) з використанням інформації про температуру і вміст вуглецю розплаву або тільки про температуру “без повалки конвертера” виданням уставок в локальні системи контролю і керування положенням фурми, витрати дуття й АСК ТП ВТ.

Модель вирішує наступні задачі (рис. 1):

– розрахунок шихтовки плавки [4]

1) визначає по хімічному складу чавуна і його температурі, масі повернутої рідкої сталі, а також заданій марці сталі (або заданому хімічному складу, температурі металу на випуску і масі рідкої сталі) кількість чавуну і брукху на плавку. Модель дозволяє визначити одну із складових при фіксованому значенні іншої;

2) визначення заданих параметрів режиму дуття (інтенсивності подання дуття і положення фурми) [5];

3) визначення кількості шлакоутворюючих і охолоджуючих матеріалів (теплоносія у випадку від’ємного теплового балансу або коректування кінцевого вмісту вуглецю при відсутності теплоносія) [6];

4) визначення сумарної кількості кисню на плавку і тривалості продувки [5];

– повторні розрахунки кількості шлакоутворюючих, охолоджуючих матеріалів, сумарної кількості кисню на плавку і тривалості продувки у випадку відхилення режиму дуття від заданого;

- визначення моменту проміжного виміру параметрів ванни без повалки конвертера по ходу продувки;
  - коректуючий розрахунок для доводки плавки після проміжного виміру (може використовуватися для додувки плавки у випадку непопадання її в задані межі після повалки) [7];
  - розрахунок розкиснювачів;
  - коректування коефіцієнтів моделі за результатами плавки, що проведена.
- Критерії розбиття плавков на класи для кожної задачі представлені в таблицях 1...3.

Таблиця 1

**Критерії близькості плавков позитивного досвіду для статичного і динамічного керування**

| Параметр на вході      | Інтервал розбиття | Кількість класів | Параметр заданий          | Інтервал розбиття | Кількість класів |
|------------------------|-------------------|------------------|---------------------------|-------------------|------------------|
| Силіцій в чавуні, %    | 0,3               | 5                | Вміст вуглецю, % абс.     | 0,01              | 5                |
| Манган в чавуні, %     | 0,1               | 5                | Вміст фосфору, % абс.     | 0,005             | 5                |
| Фосфор в чавуні, %     | 0,03              | 5                | Температура металу, °C    | 10                | 8                |
| Сірка в чавуні, %      | 0,005             | 5                | Вміст сірки, % абс.       | 0,005             | 5                |
| Температура чавуна, °C | 25                | 8                | Оснóвність шлаку, одиниць | 0,2               | 5                |
| Маса чавуна, т         | 5                 | 5                | Витрата дуття, м³/хв.     | 50                | 5                |
| Маса брукху, т         | 5                 | 5                | Положення фурми, калібр   | 1                 | 5                |

Вид брукху розбито на 7 класів, тривалість простою – на 3 класи; номер плавки по футерівці конвертера – на 3 класи.

Таблиця 2

**Критерії близькості плавков позитивного досвіду для доводки**

| Параметр на вході                        | Інтервал розбиття | Кількість класів | Параметр заданий                                  | Інтервал розбиття | Кількість класів |
|------------------------------------------|-------------------|------------------|---------------------------------------------------|-------------------|------------------|
| Зміна вмісту вуглецю при доводці, %      | 0,1               | 8                | Заданий мінімальний вміст вуглецю в сталі, % абс. | 0,01              | 8                |
| Зміна температури металу при доводці, °C | 10                | 8                | Задана температура металу, °C                     | 15                | 8                |
| Маса садки, т                            | 10                | 5                | Вміст сірки, %                                    | 0,005             | 5                |

Таблиця 3

**Критерії близькості плавков позитивного досвіду для розкиснення**

| Параметр на вході                   | Інтервал розбиття | Кількість класів |
|-------------------------------------|-------------------|------------------|
| Вміст вуглецю в сталі на повалці, % | 0,03              | 4                |
| Вміст мангану в сталі на повалці, % | 0,1               | 3                |
| Температура сталі на повалці, °C    | 10                | 8                |

Дані таблиці 3 використовують окремо до таких груп сталі: сталь кипяча; напівспокійна; спокійна; низьколегована; легована хромом; легована нікелем; легована міддю; легована титаном; легована ніобієм; легована ванадієм; легована азотом; легована молібденом; легована бором; легована кальцієм; легована РЗМ; легована іншими елементами.

Розкиснювачі розраховуються у дві стадії: перед продувкою за очікуваними параметрами плавки на повалці („груба” доза розкислювачів) і за параметрами на повалці („точна” доза розкислювачів).

$$m_{\text{фс}} = \frac{\gamma(m_{\text{б}} + m_{\text{ч}})(R_{\text{с}} - R_{\text{м}})}{b_{\text{R}} \cdot R_{\text{фс}}}, \quad (2)$$

де  $\gamma$  – вихід придатного металу;  $m_{\text{б}}$ ,  $m_{\text{ч}}$ ,  $m_{\text{фс}}$  – маса відповідно брукху, чавуну і феросплаву, т;  $R_{\text{с}}$ ,  $R_{\text{м}}$ ,  $R_{\text{фс}}$  – вміст елемента відповідно в сталі, металі на повалці і феросплаві, %;  $b_{\text{R}}$  – коефіцієнт засвоєння елемента. Тут  $b_{\text{R}}$  – розраховується по формулі

$$b_{\text{R}} = b_{\text{R}}^0 + \alpha_4(1/C_{\text{п}}^0 - 1/C_{\text{п}}) + \alpha_5(t_{\text{п}} - t_{\text{п}}^0) + \alpha_6(R_{\text{м}} - R_{\text{м}}^0), \quad (3)$$

де індекс „0” – значення параметра на плавці позитивного досвіду;  $\alpha_4, \dots, \alpha_6$  – статистичні коефіцієнти;  $C_{\text{п}}$ ,  $t_{\text{п}}$  – відповідно міст вуглецю, %, і температури металу, °C, на повалці.

При отриманні хімічного складу металу після розкиснення визначаються дійсні значення коефіцієнтів засвоєння елементів в плавці по формулі

$$b_{\text{R}}^0 = \frac{\gamma(m_{\text{л}} + m_{\text{ч}})(R_{\text{р}} - R_{\text{м}})}{m_{\text{фс}} \cdot R_{\text{фс}}}, \quad (4)$$

де  $R_{\text{р}}$  – вміст елемента в металі після розкиснення, %.

При відсутності плавки позитивного досвіду (розкиснення) для якого-небудь елемента його коефіцієнт засвоєння і кінцеве значення береться із таблиці нормативно довідкової інформації. Розрахунок виконується окремо для двох вмістів мангану в сталі – мінімального і середнього для марки сталі, що виплавляється.

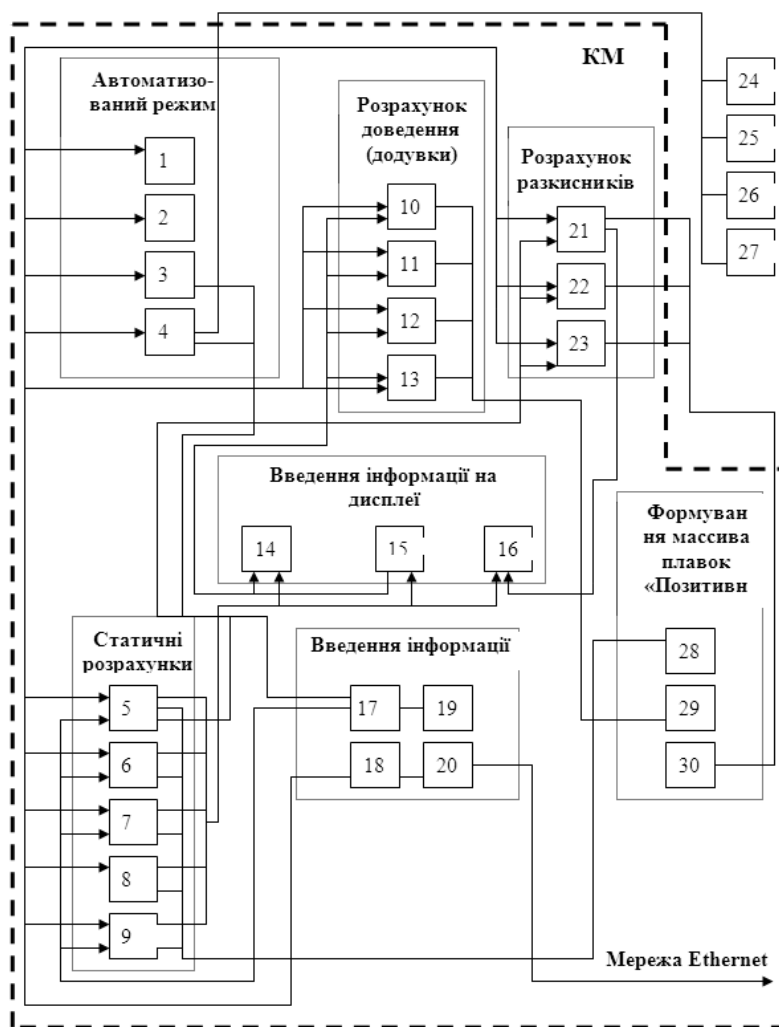


Рис. 1. Схема функціональної структури системи

1 – дозування розкиснювачів і легуючих; 2 – дозування шлакоутворюючих і охолоджувачів; 3 – положення кисневих фурм; 4 – регулювання витрат дуття; 5 – розрахунок маси лому, чавуна і параметрів рідкої сталі на плавку; 6 – розрахунок параметрів режиму дуття; 7 – розрахунок шлакоутворюючих і охолоджувачів; 8 – розрахунок витрат кисню на плавку і тривалість продувки; 9 – визначення моменту проміжного заміру параметрів ванни (без повалки); 10 – розрахунок режиму дуття; 11 – розрахунок сумарного кисню на додувки; 12 – розрахунок кількості охолоджувачів (теплоносіїв); 13 – розрахунок шлакоутворюючих; 14 – робоча станція конвертора №1; 15 – робоча станція конвертора №2; 16 – робоча станція площадки; 17 – перевірка достовірності інформації; 18 – перевірка достовірності інформації; 19 – інформація, що вводиться вручну; 20 – інформація, яка отримана по мережі; 21 – грубий розрахунок розкислювачів; 22 – точний розрахунок розкислювачів; 23 – коректування коефіцієнтів угару; 24 – АСУ ТП ВТ; 25 – система регулювання

витрат кисню; 26 – система контролю і керування пожеженням фурми; 27 – АСУ CONTROL; 28 – формування масиву плавки для продувки; 29 – формування масиву плавки для додувки; 30 – формування масиву плавки для розкиснення.

Засоби обчислювальної техніки (рис. 2) АСК ТП включають центральний комп'ютер для реалізації моделей керування, робочі станції (АРМ) на кожному конвертері, робочу станцію площадки (майстра конвертерного відділення), АРМ скрапного відділення, контролери керування процесом дозування матеріалів і регулювання положення фурми на базі контролерів QUANTUM, регулювання витрати кисню на базі контролерів ROC. Зв'язок між центральним комп'ютером і локальними системами відбувається по мережі Ethernet і ModBus.

Система, що реалізує Модель виконана по дворівневій схемі – з верхнім і нижнім ієрархічними рівнями.

Верхній рівень реалізований на базі двопроцесорного промислового комп'ютера. Він забезпечує централізоване приймання інформації від нижнього рівня і суміжних підсистем, її обробку, рішення задач розрахунку і керування технологічного процесу, представлення інформації по керуванню і поточних значень технологічних параметрів, формування відеокadrів на екранах робочих станцій, а також передавання завдань по керуванню в локальні системи нижнього рівня й підключення до інших систем автоматизації конвертера.

Нижній рівень забезпечує функції збирання, обробки, представлення інформації про поточні значення технологічних параметрів, і керування технологічними параметрами, а також передавання інформації на верхній рівень. Інформація на нижній рівень поступає через крос контрольно-вимірювальних параметрів (КВП).

Нижній рівень забезпечує вимір таких параметрів процесу: маси чавуна в ковші після міксера, температури чавуна в ковші, інтенсивності подання кисню, загальної витрати кисню на продувку, положення лівої і правої фурми, маси сипких матеріалів в дозаторі (вапна, вапняку, шпату, магнезиту, доломіту, окатків, вугілля), маси феросплавів і розкиснювачів в дозаторі (феросиліцію, феромангану, силікомангану, алюмінію, ТШС), температури металу в конвертері на повалці.

Нижній рівень також формує такі технологічні сигнали проходження плавки: “початок продувки”, “перерва у продувці”, “кінець продувки”, “злив плавки”, “момент уводу сипких і феросплавів в конвертер”.

Інформація нижнього рівня використовується для контролю ходу плавки, ведення протоколу і паспорта плавки. Крім того, по сигналу “злив плавки” інформація на поточну плавку передається по мережі із локальної бази даних системи в базу сервера конвертерного цеха (ККЦ).

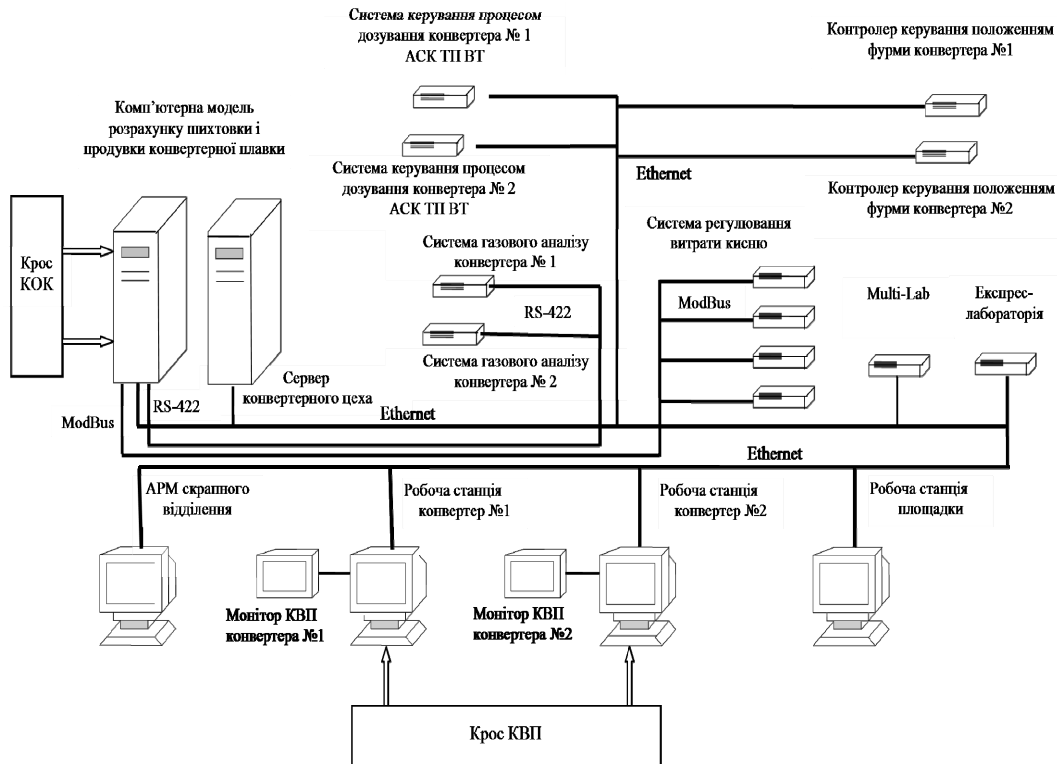


Рис. 2. Структурна схема засобів обчислювальної техніки системи

В сервер ККЦ також безпосередньо поступає інформація з хімічної лабораторії про хімічний склад металу на повалці конвертера (вуглець, сірка, фосфор, манган), хімічний склад шлаку ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_{\text{заг}}$ ), хімічний склад металу після розкиснення (вуглець, сірка, фосфор, манган, силіцій, хром, нікель, мідь), хімічний склад чавуна (вуглець, сірка, фосфор, манган, силіцій), а також інформація про масу і вид брухту від АРМ скрапного відділення.

В центральний комп'ютер безпосередньо з кросу керуючого обчислювального комплексу (КОК) поступає інформація про хімічний склад дуття (кисень, азот, аргон) і газів, що відходять (окис і двоокис вуглецю, азот, аргон) від газоаналізатора ФТІАН, що також підключений в мережу.

Нижній рівень реалізований на базі контролера QUANTUM, АРМів конвертерів № 1 і № 2 (машиністів дистрибуторів) і робочої площадки – на базі промислових комп'ютерів.

Промислові іспити системи показали її високу надійність і ефективність.

#### Висновки

Для конвертерного цеха ВАТ „Металургійний комбінат „Азовсталь” з конвертерами місткістю 350 тонн розроблена автоматизована система керування конвертерною плавкою, зокрема моделі, алгоритми, програми і технічні засоби.

Розвиток системи буде йти в напрямку введення в експлуатацію локальної підсистеми Quik-Tap на базі занурювального вимірювача параметрів ванни без переривання продувки.

#### Список літератури

1. Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С.: Підручник / Конвертерне виробництво сталі (теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія). – Дніпропетровськ: РВА „Дніпро-ВАЛ”, 2004. – 454 с.
2. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник / Д.Ф.Чернега, В.С.Богусhevський, Ю.Я.Готвянський та ін.; За ред. Д.Ф.Чернеги, Ю.Я.Готвянського. – К.: Вища школа, 2006. – 503 с.
3. Bogushevsky V., Sharbatian M., Suhenko V. Automatic control of converter process//Materialy IV Mezinarodni Vedecko-Practicka Ronference “Evropska Veda XXI Stoleti-2008”, 16 – 30 kvetna 2008 roku. – P. 26 – 29.
4. Розрахунок металеві частини шихти киснево-конвертерної плавки / В.С.Богусhevський, В.Ю.Сухенко, К.О.Сергеева, С.В.Жук // Металургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 7. – С. 266 – 269.
5. Богусhevський В.С., Сухенко В.Ю. Керування режимом дуття конвертерної плавки // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2009. – № 1. – С. 58 – 64.
6. Богусhevський В.С., Сергеева К.О. Контроль температурного режиму конвертерної плавки // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2009. – № 6. – С. 75 – 80.
7. Богусhevський В.С., Сухенко В.Ю., Сергеева Е.А. Управление доводкой конвертерной плавки // Металл и литье Украины. – 2010. – № 3. – С. 14 – 17.