



УДК 004.2

MODEL-ORIENTED COMPUTER-INTEGRATED SYSTEM FOR CONTROLLING THE WEAR RESISTANCE OF THE SURFACE OF HEAT EXCHANGE TUBES OF A DRUM STEAM GENERATOR AT A THERMAL POWER PLANT

МОДЕЛЬНО-ОРИЄНТОВАНА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОВЕРХНІ ТРУБ ТЕПЛООБМІНУ БАРАБАННОГО ПАРОГЕНЕРАТОРУ ТЕС

Brunetkin O.I. / Брунеткін О.І.

d.t.s., prof. / д.т.н., проф.

ORCID: 0000-0002-6701-8737

Sklifasovskyi D.E. / Скліфасовський Д.Є.

postgraduate student / аспірант

ORCID: 0009-0001-6202-3019

National University of Odesa Polytechnic,

Odessa, Shevchenko Avenue, 1, 65044

Національний університет «Одеська політехніка»,

Одеса, пр-т Шевченка, 1, 65044

Анотація. Було досліджено чотири сценарії зносу: поступове збільшення, постійний в межах норми, випадковий в задовільному діапазоні та контрольний тест з абсолютно випадковими значеннями. Динамічне моделювання показало здатність системи змінювати стратегію відбору проб і адаптувати відбір вугілля у відповідь на зміну рівня абразивності внаслідок спалювання. У сценаріях з високою абразивністю система регулювала частоту відбору проб для перевірки кожного вагона на наявність дефектів. Такі зміни відобразилися на споживанні вугілля на електростанції, зі збільшенням обсягу поставок для компенсації витрат на резерв на випадок відмови постачальника.

Проведений розрахунковий експеримент відобразив ключову роль розробленої КІСУ зносостійкістю труб теплообмінника на ТЕС. З огляду на умови обчислювального експерименту були помітні відмінності в результатах між сценаріями експлуатації з КІСУ і без неї. Відомості демонструють, що за наявності КІСУ ТЕС може своєчасно реагувати на зміни середнього індексу абразивності, зменшуючи абразивне пошкодження труб, підтримуючи планову товщину труб для експлуатації ТЕС до проведення необхідних ремонтів.

Ключові слова: зносостійкість труб, теплообмінник, обчислювальний експеримент, дефект, вугілля, комп'ютерно-інтегрована система управління.

Вступ.

У дослідницькому контексті проблема зносостійкості поверхні теплообміну в теплових електростанціях привертає велику увагу через свою критичну роль у роботі важливих об'єктів енергетики. Передчасна зупинка ТЕС на ремонт через неефективний контроль зносостійкості може мати суттєвий вплив на загальну стабільність енергосистеми, особливо коли враховується, що проведення ремонтних робіт для таких стратегічних об'єктів зазвичай вимагає значного часу і планується заздалегідь.

Проблема стає ще актуальнішою у світлі парадоксу, що полягає в розбіжності між фактичною якістю вугілля та інформацією, зазначеною в транспортних документах. Залишаючись без належного контролю, ТЕС змушені використовувати навіть низькоякісне вугілля, не маючи можливості швидко



замінювати паливо для спалювання без негативних наслідків. Внаслідок цього, труби поверхні теплообміну піддаються значному абразивному зносу.

Виходячи з попередніх досліджень, які вказують на можливість реалізації контролю зносостійкості труб через вчасне виявлення абразивної домішки у вугіллі та керування якістю вугілля, в даному розділі ставиться завдання розробити комп'ютерно-інтегровану систему управління (КІСУ) зносостійкості поверхні труб теплообміну котлоагрегатів (КІСУ розроблено за допомогою інтерактивного інструменту MATLAB®, Simulink® LICENSING 110721904 – MathWorks Trial – 22 Oct 2022). Основою такої системи буде розподіл потоку вугілля між керуючими впливами та умовами вивантаження і перевірки якості вугілля від постачальників, що має на меті мінімізацію витрат і забезпечення надійності роботи ТЕС. Очікується, що такий інтегрований підхід значно покращить управління зносостійкістю поверхонь теплообміну, відкривши нові перспективи в області ефективного використання вугілля та забезпечення стабільності роботи енергосистеми. КІСУ зображено на рисунку 1.

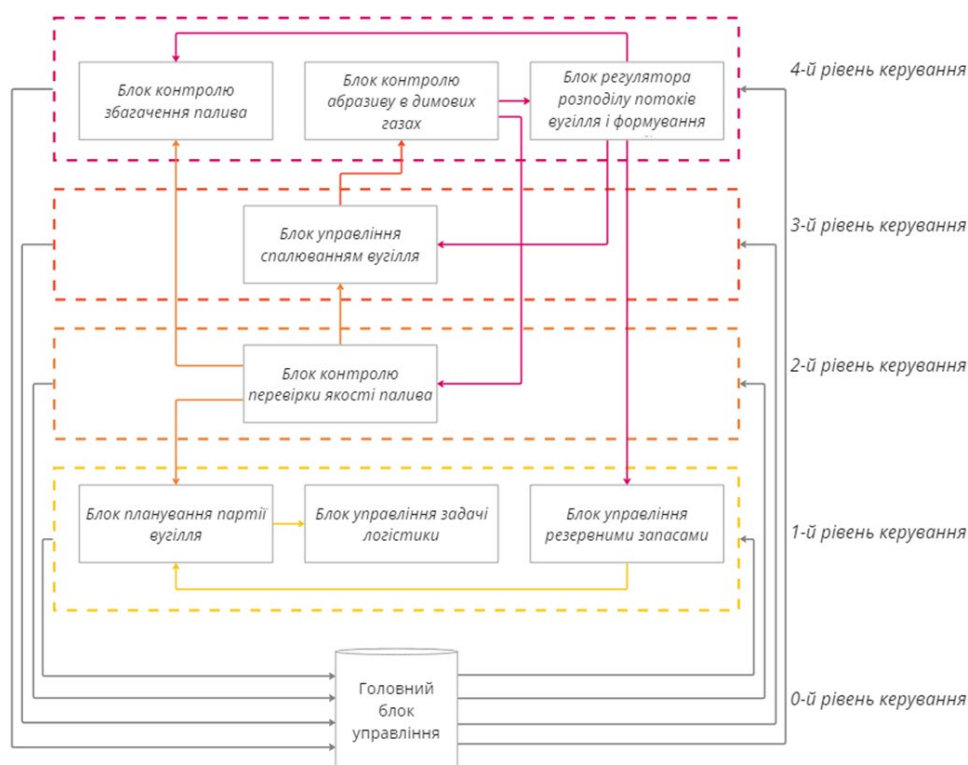


Рисунок 1 – Схема КІСУ зносостійкості поверхні труб теплообміну парогенератору ТЕС

Джселеро: [1]

Аналіз літературних джерел

Знос, пов'язаний з процесом спалювання абразивного палива, є добре відомим явищем, яке детально описано в [2]. Це спричиняє поступову і безперервну ерозію поверхні теплообмінних труб на ТЕС. Існуючі методи контролю якості вугілля, такі як метод детального відбору проб, представлений в [2], є трудомісткими і недостатньо адаптивними. Ці процедури вимагають безперервної оцінки кожної партії вугілля та індивідуального визначення кроку відбору проб, що, враховуючи постійне надходження змішаних поставок вугілля



з різних джерел, може призвести до значних затримок при транспортуванні. Ці затримки також призводять до значних витрат ТЕС через надмірне утримання вагонів. Існуючі методи прогнозування неефективно враховують реальний час роботи котла. Це стосується прогнозування споживання палива, виявлення летючої золи й абразивності. Зараз немає математичної моделі для парового котла ТЕС, яка поєднує різні аргументи, такі як різні види витрат палива, витрати летючої золи у золовловлювачах, показник абразивності, із функціями. Модель також повинна описувати загальні витрати золошлакової пульпи, втрати вуглецю (від невідповідності заявленої та фактичної зольності), тривалість роботи труб до проведення технічного обслуговування. Крім того, модель повинна враховувати розбіжності в зольності та тривалість до технічного обслуговування. В [4,5,6,7] висвітлюються питання, пов'язані з неоднозначною зольністю продуктів вуглезбагачення та завищеною похибкою коефіцієнту вуглезбагачення, виведеного емпіричними методами. Основною проблемою є складність чіткого визначення перехідного маркера якості для вугілля, де збагачення не потрібне. Процес збагачення також призводить до значної втрати вмісту вуглецю. Крім того, було введено можливість розміщення збагачувального обладнання на території ТЕС для роботи (тобто за необхідністю), а не для очищення палива на збагачувальній фабриці.

В роботах [3] та [2] розглядаються різні методи визначення зольності палива під час відбору проб. Однак ці процедури є трудомісткими, що створює проблеми під час безперервного використання палива. Необхідність спалювати наявне паливо до отримання результатів лабораторного аналізу може призвести до високої зольності або, в даному контексті, високого вмісту абразивного матеріалу в обхід заходів контролю. Цей непомітний сплеск абразивних домішок в потоці вугілля може неминуче призвести до абразивного зносу труб теплообмінної поверхні котлоагрегату. Існуючі методи забезпечення ТЕС високоякісним вугіллям є недостатніми для зменшення абразивного впливу на труби парогенераторів. Ці методи потребують вдосконалення шляхом інтеграції можливості регулювання кроку відбору. Таке регулювання дозволить вчасно відмовлятися від високозольного палива та контролювати знос теплообмінних труб у парогенераторах ТЕС.

Метою статті є вдосконалення методів і моделей комп'ютерно-інтегрованої системи управління зносостійкості труб теплообміну парогенератора ТЕС, що використовують вугілля з невідомим абразивним складом. Для досягнення мети, необхідно розробити:

- транспортну задачу постачання вугілля від дев'яти постачальників з території України та однієї доставки морем до трьох різних ТЕС;
- математичну модель у вигляді системи рівнянь, які описують параметричну схему котлоагрегату, виражена в зольних потоках;
- модель регулятора при різних характеристиках абразивності вугілля.

Основний текст

Транспортна задача постачання вугілля. В якості прототипів А1, А2 і А3 для побудови транспортної задачі було обрано наступні ТЕС [8]: Запорізька ТЕС, Вуглегірська ТЕС і Бурштинська ТЕС. Все обрані ТЕС працюють на вугіллі.



Оскільки питома теплота згоряння кам'яного вугілля приблизно 31 МДж / кг, наведено наступні показники орієнтовних потреб у таблиці 1.

Таблиця 1 - Потреби ТЕС у вугіллі

| ТЕС | Встановлена електрична потужність, МВт | Споживання вугілля, кг/с | Споживання млн. тонн/рік |
|-------|--|--------------------------|--------------------------|
| A_1 | 3600 | 290,32 | 9,16 |
| A_2 | 3600 | 290,32 | 9,16 |
| A_3 | 2400 | 193,55 | 6,10 |

Авторська розробка

У якості постачальників для прототипів було обрано деякі шахти Донецького вугільного басейну (крім Волиньвугілля та Львіввугілля).

Таблиця 2 - Вартість перевезення палива на рік з кожної шахти, млн. грн

| | | | | | |
|-------------|-------------|-------------|---------|-------|-------------------|
| 127,1801847 | 45,53740265 | 25,05064244 | 0,525 | B_1 | Волиньвугілля |
| 744,1657721 | 733,8540063 | 112,856549 | 2,9655 | B_2 | Львіввугілля |
| 66,7066685 | 19,85776548 | 242,3418564 | 0,998 | B_3 | Мирноград-вугілля |
| 101,2467087 | 34,75224867 | 350,532524 | 1,4165 | B_4 | Селидів-вугілля |
| 185,097695 | 65,47338679 | 610,4285685 | 2,5483 | B_5 | м. Добропілля |
| 62,04281552 | 6,4617811 | 8,502343553 | 0,2515 | B_6 | м. Соснівка |
| 61,55068896 | 19,52414327 | 221,7148473 | 0,8565 | B_7 | м. Вугледар |
| 71,45735598 | 80,15046498 | 156,475962 | 0,9 | B_8 | м. Олександрія |
| 628,2408455 | 585,0998432 | 3084,581662 | 13,9575 | B_9 | м. Павлоград |
| A_1 | A_2 | A_3 | Z | | |

$$\Sigma A_n = \Sigma B_m = 24,42$$

Також було розглянуто варіант дефіциту товару на внутрішньому ринку. У цьому випадку було розглянуто імпорт вугілля з ПАР. Відповідно до джерела [8] середню ціну за тону на вугілля на умовах CIF порт ПАР було обрано 2'724,96 грн.

З огляду на середні відстані від портів Одеської області (порт Південний і ТІС) до розглянутих ТЕС (555 км до Запорізької ТЕС, 845 км до Світлодарськ та 764 км до міста Бурштин).

З огляду на відносну дешевизну вугілля з ПАР і розташування глибоководного Південного порту по відношенню до ТЕС A_1 , A_2 і A_3 , схема з імпортом вугілля з ПАР через порт Південний виходить дешевше і вигідніше для ТЕС в закупівлі.

Транспортну задачу було вирішено з урахуванням річних потреб ТЕС,



річним видобутком з шахт і постачанням вугілля через сумарно в рік [9].

Було припущено, що для поставки, була здійснена закупівля вугілля з ПАР, який виявився неякісний з високим показником зольності 50%. Отже, вугілля, що доставляється цим шляхом, потрібно в два рази більше.

Також було припущено, що джерело В2 також має високу зольність (30%), лише 5,6875 тис. тонн корисної маси з видобутих щодня 8,125 тис. тонн.

Оскільки нам бракує 4,06233 тис. тонн. корисного вантажу без зольної домішки, реального вантажу з урахуванням зольності знадобиться 5,80333 тис. тонн. При цьому ні ціна на закупівлю, ні транспортні витрати не зміняться, тому що реальна маса залишається незмінною.

Було розглянуто дві умови флотації: 1) три механічні флотаційні машини МФУ-25, 2) п'ять МФУ-25.

1) В першому випадку, при проведенні процедури тричі, отримано концентрату в кінцевому підсумку 67,2% від початкової маси і 32,8% – хвости за всі етапи очищення палива.

З огляду на потужність установки 30 кВт на кожен агрегат отримано, що потужність збагачувальної фабрики 90 кВт і за день споживає 2'160 кВт*год.

Згідно з [8] було прийнято, що збагачення 2'400 т вугілля на добу становить 3'749,76 грн.

2) Для п'яти установок для обробки 500 тонн вугілля на годину було отримано переробку 12'000 тон вугілля з зольністю 30% на добу для отримання 8'064 тон палива з зольністю 10,8%. Експлуатація даної машини буде обходитись в 10,8 МВт * год на добу, що буде еквівалентно 18'749 грн на добу.

Попри те, що на перший погляд, спалювання палива без очищення виходить вигідніше через відсутність втрати частки палива разом з хвостами та немає потреби у витраті електроенергії для збагачення, однак в той самий момент формується абразивний знос конвективних поверхонь нагріву.

Якщо порівняти результати транспортних задач за цільовою функцією із витратами на збагачення і без, з [8] свідчить, що вигідніше встановити збагачувальне обладнання і очищати вугілля при зольності 30%, ніж вдаватися до термінового ремонту і заміні обладнання на ТЕС. Якщо взяти за приклад експлуатацію турбіни К-300 (10 років), то економія виходить в середньому більш ніж на 25,5 млн.грн.

Було розв'язано транспортну задачу у таблиці 3, де В2 – постачальник від української шахти, а В* - постачальник з ПАР, Ad обох партій складає 30%.

Оптимальний план є виродженням, так як базисна змінна $x_{104} = 0$.

Оцінка транспортування вугілля для трьох обраних ТЕС (Запорізька, Вуглегірська, Бурштинська) показала, що імпорт вугілля з ПАР, незважаючи на його нижчу якість та час на транспортування, може бути суттєвою підтримкою у випадку дефіциту палива. Дослідження показує, що навіть з урахуванням додаткових витрат на збагачення вугілля для зменшення зольності, це все одно є економічно вигідним завдяки економії від зменшення зносу обладнання. Крім того, оптимальний план транспортування визначає найбільш ефективний розподіл вугілля з різних шахт та південноафриканського постачальника на ТЕС.



Таблиця 3 - Транспортна задача

| | | | корисний обсяг | реальний обсяг | |
|-------------|-------------|-------------|----------------------------------|----------------|-------|
| 348,45 | 124,77 | 68,64 | 1,438356 | | B_1 |
| 1652,383592 | 1631,363195 | 365,4681826 | 4,062329 | 5,803326811 | B_2 |
| 757,6973391 | 1096,359289 | 1001,767503 | 4,062329 | 5,80332681 | B^* |
| 182,78 | 54,42 | 663,97 | 2,734247 | | B_3 |
| 277,42 | 95,24 | 960,39 | 3,880822 | | B_4 |
| 507,17 | 179,43 | 1 672,46 | 6,981644 | | B_5 |
| 169,99 | 17,71 | 23,30 | 0,689041 | | B_6 |
| 168,65 | 53,51 | 607,45 | 2,346575 | | B_7 |
| 195,79 | 219,61 | 428,72 | 2,465753 | | B_8 |
| 1 721,48 | 1 603,28 | 8 451,18 | 38,23973 | | B_9 |
| 25,08705259 | 25,08705259 | 16,72470172 | Z | | |
| A_1 | A_2 | A_3 | $\Sigma A_n = \Sigma B_m = 66,9$ | | |

Математична модель у вигляді системи рівнянь, які описують параметричну схему котлоагрегату, виражена в зольних потоках

Для побудови математичної моделі спочатку була побудована параметрична схема (рис. 1.) для розуміння зв'язків інформаційних потоків на ТЕС [10], [11], базуючись на математичній моделі вимірювальному каналі рис. 2. Ці зв'язки були об'єднані у вигляді системи рівнянь (1).

$$\begin{cases} M_{sl} = M_f a_1 + M_{f_a} a_2 + M_{Ad} a_3 \\ M_{loss} = M_f b_1 + M_{f_a} b_2 + M_{Ad} b_3 \\ V_{res} = M_f c_1 + M_{res} c_2 + M_{en} c_3 \\ T_{op} = M_f d_1 + M_{f_a} d_2 + M_{Ad} d_3 + M_{res} d_4 + M_{en} d_5 \\ N = M_f e_1 + M_{res} e_2 + M_{en} e_3 \end{cases} \quad (1)$$

де a_n, b_n, c_n, d_m, e_n – постійні коефіцієнти; $n = \overline{1,3}$; $m = \overline{1,5}$; M_f – витрата палива, кг/год; M_{en} – витрата збагаченого палива, кг/год; M_{res} – витрата резервного палива, кг/год; M_{f_a} – витрата золи з золоуловлювачів, кг/год; M_{Ad} – зольність палива, %; M_{sl} – витрата загальної кількості золошлакової пульпи, кг/год; T_{op} – час роботи до заміни труб теплообмінника, год; M_{loss} – втрати вуглецю через невідповідність між заявленою та фактичною зольністю, якої не вистачає, що зумовлює необхідність збагачення або використання запасів, кг/год; V_{res} – запас палива на резервному складі, т; N – потужність станції, МВт.

Параметрична схема була адаптована для зосередження на розв'язанні трьох основних показників: поточний обсяг резервних запасів, час експлуатації труб до ремонту та заміну та чинний потік летючої золи (рис. 3).

Відповідно до рис. 3. систему рівнянь (1) було представлено у наступному вигляді.

$$\begin{cases} M_{f_a} = M_{sl} - F_{f_a}(M_f, A_d) \\ V_{res} = V_0 - F_{en}(M_f, A_d, M_{en}) \\ T_{op} = T_0 - F_T(M_f, A^d,) \\ M_{ash} - M_{sl} = 0 \end{cases} \quad (2)$$



де M_{ash} – це загальна витрата золи.

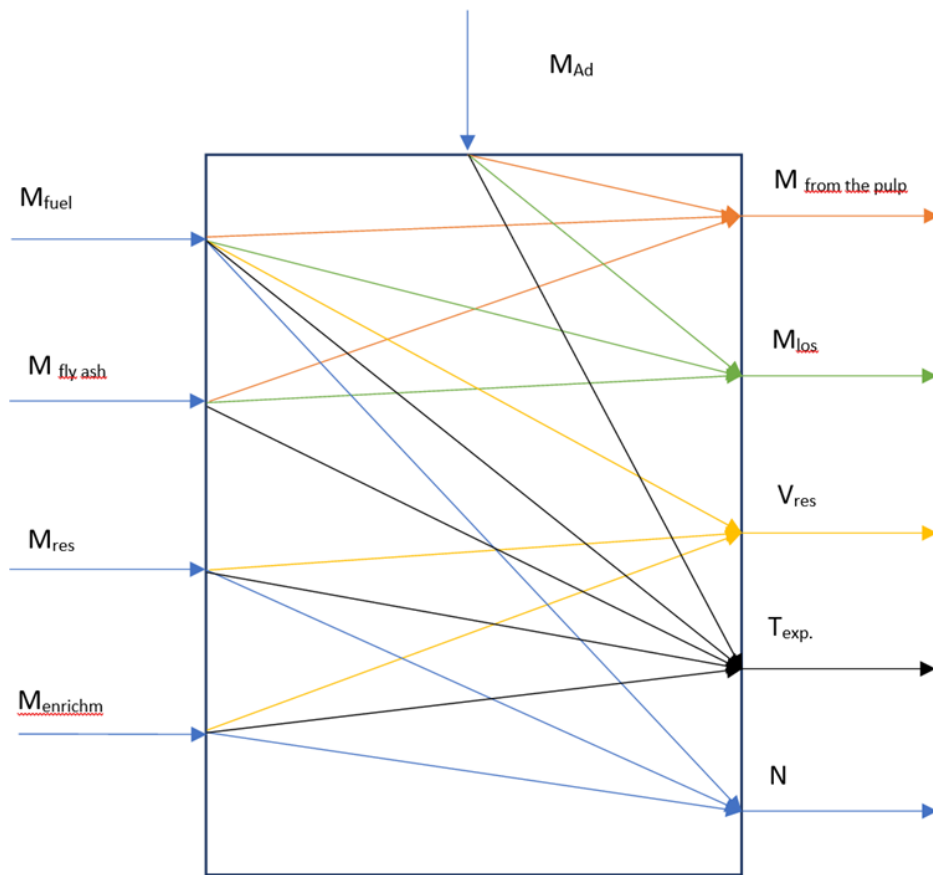


Рисунок 2 – Параметрична схема котлоагрегату

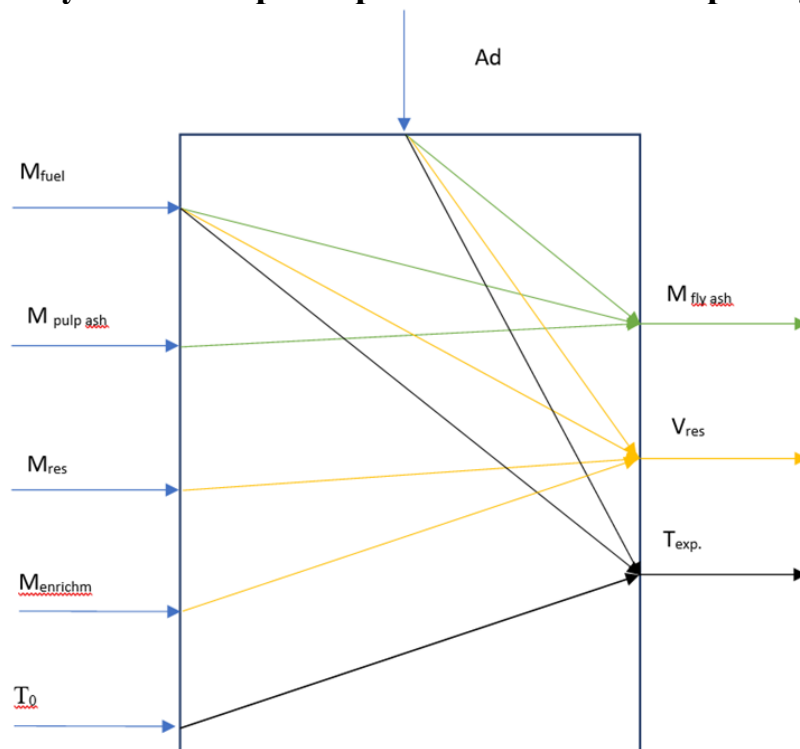


Рисунок 3 – Адаптована параметрична схема котлоагрегату ТЕС



Щоб зрозуміти, як система розвивається з часом, статичного розв'язку недостатньо. Для побудови математичної моделі необхідно використати диференціальні рівняння, які описують, як змінюються величини в системі з плином часу:

$$\begin{cases} \frac{dM_{Ad}}{d\tau} = (M_{ash} + dM_{ash}) - (M_{sl} + dM_{sl}) \\ \frac{dM_{Ad}}{d\tau} = dM_{ash} - dM_{sl} \end{cases} \quad (3)$$

Таким чином, система диференціальних рівнянь (3) представляє часову еволюцію системи, яка раніше описувалася статичними алгебраїчними рівняннями (2). Після перетворення статичних рівнянь на диференціальні, було отримано можливість відстежувати і прогнозувати, як система змінюється з часом. У (3) для позначення часу використовується τ , та система (3) описує зміну. Кожен член рівняння у цих диференціальних рівняннях описує швидкість зміни величини M_{Ad} з часом.

Математична модель котлоагрегату ТЕС, представлена у вигляді системи рівнянь, визначає взаємозв'язки між різними параметрами, такими як споживання палива, витрати золи, резервні запаси та час роботи до ремонту. Модель було адаптовано для зосередження уваги на еволюції резервних запасів, часі роботи до ремонту та поточних витратах золи. Перехід від статичних алгебраїчних рівнянь до диференціальних рівнянь дозволив відстежувати і прогнозувати зміни системи в часі, забезпечуючи цінний інструмент для стратегічного планування та оптимізації на ТЕС.

Розробка регулятора поточного часу для управління процесом контролю якості вугілля, що відвантажується

Було розглянуто ситуацію, коли ТЕС отримує вугілля від трьох постачальників, обраних на основі ціни, швидкості доставки та якості, згідно з методом планування поточної партії та управління задачі логістики описаному в третьому розділі. Всі поставки надходять одночасно і змішуються на складі ТЕС. Як описано в моделі Dw у другому розділі, при задовільній якості вугілля ТЕС обробляє на добу 840 вагонів вугілля, з регулярними перевітками в якості кожного десятого вагону. Якщо виявляється неякісне вугілля, цьому постачальнику відмовляють у співпраці, а його обсяги заміщуються перевіреними вантажовідправниками та новим постачальником. Це вимагає залучення резервних запасів та щоденна кількість вагонів поступово збільшується і прагне до максимальної позначки в 1092, поки резервний запас не відновиться, щоб компенсувати витрати на використання резервного палива та втрати від відмови постачальника. На станції також є нечітка система для виявлення неякісного вугілля під час спалювання [12], яка, якщо спрацьовує, збільшує частоту перевірок. Необхідно змоделювати автоматизований контролер.

Підсистема буде виглядати так, як показано на рисунку 4. Ключовими блоками цієї підсистеми є наступні:

- "Variable Transport Delay" враховує транспортну затримку при відборі зразка.



- "UpdateSelectWagon" – функція, яка виконує роль контролера системи та визначає крок вибірки (r) для поточної ситуації.

- "Flow opening level of combustion" – відсоток потоку палива, який припадає на горіння (сигнал зворотного зв'язку від нечіткого контролера, який пропорційно розподіляє паливо за напрямками).

Згідно із запрограмованих правил керуючого пристрою на основі нечіткої логіки для керування зносостійкістю поверхні теплообміну, якщо в топку подається не більше половини потоку, це означає, що вугілля незадовільної якості. В якості регулятора буде виступати запрограмована функція "updateSelectWagon", яка працює за принципом, що якщо "Flow opening level of combustion" менше ніж 0,5, тоді за принципом Кокрана змінюється крок вибірки для контролю якості. Функція "updateSelectWagon" запрограмована наступним чином [11]:

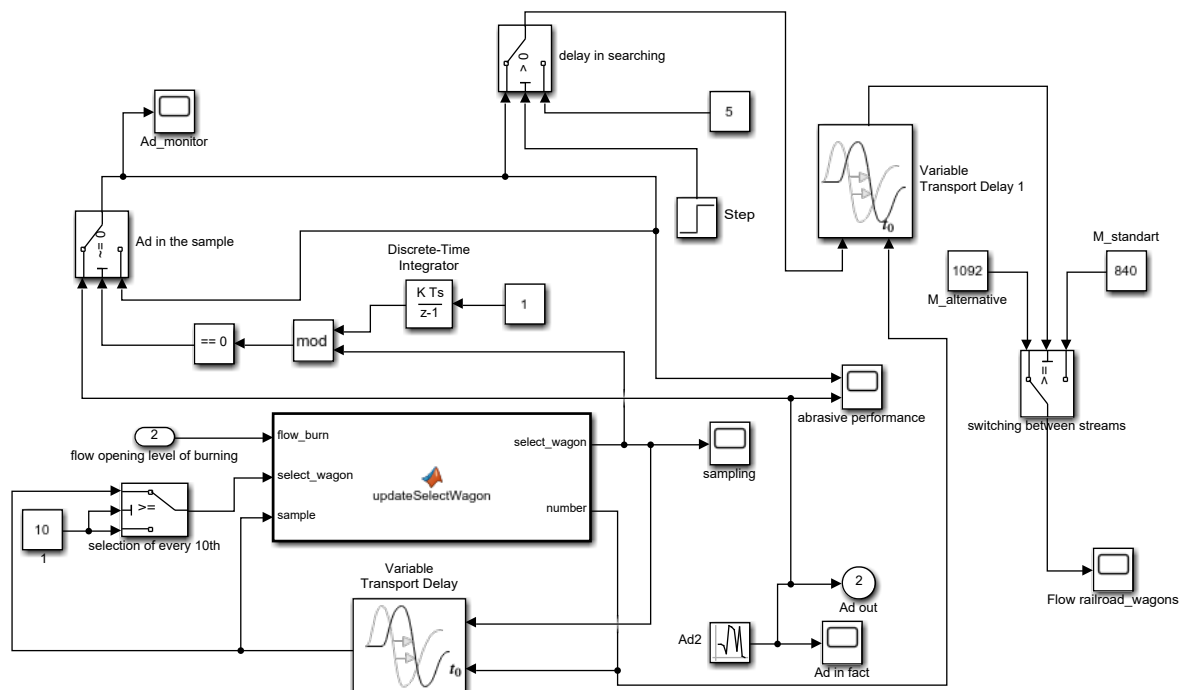


Рисунок 4 – Схема регулювання приймання вугілля та відбору проб на складі

```
function [select_wagon, number] =
updateSelectWagon(flow_burn, select_wagon, sample)
    if flow_burn <= 0.5
        select_wagon = ceil(select_wagon / 2);
    else
        select_wagon = 10;
    end
    number = 1;
    while sample >= 10
        sample = ceil(sample / 2);
        number = number + 1;
    end
end
```



Коли система контролю якості вугілля виявляє падіння якості вугілля, алгоритм оптимізує частоту відбору проб, поступово зменшуючи її до тих пір, поки не буде виявлено джерело проблеми.

Якщо відповідне джерело низької якості вугілля виявлено, система приймає низку стратегічних рішень: відмовляється від неякісного постачальника, активізує використання резервних ресурсів, збільшує кількість вагонів, що надходять від надійних вантажовідправників, залучає додаткових постачальників, щоб максимально ефективно компенсувати витрати на резервні ресурси. Тобто регулятор відправляє сигнал, що терміново необхідно прагнути до максимального числа обробки вагонів на добу. Для того, щоб переконатись, що КІСУ працює правильно, необхідно проаналізувати результати симуляції за різних умов.

Розрахунковий експеримент. Далі розглядається перевірка роботи КІСУ поверхні теплообмінних труб парогенератора ТЕС побудована на принципі А/В-тестування (також відоме як bucket-тестування або спліт-тестування [13-17]). Для цілей цього обчислювального експерименту приймаються наступні умови: ТЕС отримує партії вугілля з задовільним показником абразивності $A_d = 10\%$ від трьох постачальників B_1 , B_2 і B_3 протягом року. Початкова товщина труб становить 10 мм, і вони потребують заміни при досягненні товщини 2 мм. Далі припускається, що постачальник B_2 починає постачати вугілля нижчої якості $A_d = 20\%$ з 90-го дня, а постачальник B_3 постачає вугілля $A_d = 30\%$ з 180-го дня.

Обговорення результатів. Було детально описано проблему транспортування вугілля для ТЕС A_1 , A_2 та A_3 . Було розглянуто можливість закупівлі вугілля з окремих шахт Донецького вугільного басейну, з додатковим розглядом можливості імпорту вугілля з Південної Африки у випадку дефіциту вугілля на внутрішньому ринку. Зрештою, було зроблено висновок, що, незважаючи на вищі початкові витрати, обслуговування збагачувального обладнання для зниження зольності призводить до значної довгострокової економії, що перевищує витрати на термінові ремонти та заміну обладнання ТЕС. Аналіз також дозволив отримати оптимальний план розподілу вугілля з різних шахт на ТЕС, хоча було зазначено, що цей план є виродженим через те, що базова змінна x_{104} дорівнює нулю.

Описано побудову математичної моделі для опису параметричної схеми котлоагрегату теплової електростанції з акцентом на динаміку потоків золи. Модель була розроблена шляхом створення складної системи рівнянь, яка відображає взаємозв'язок різних факторів, включаючи витрату палива, витрату збагаченого палива, витрату резервного палива, витрату золи, зольність, загальну витрату золошлакової пульпи, час роботи, втрати вуглецю, запас палива та потужність установки. Ця параметрична схема була адаптована, щоб сконцентруватися на трьох основних показниках: поточному обсязі резервних запасів, часу роботи труб до заміни та поточному потоці золи. Розроблені алгебраїчні рівняння були далі перетворені в диференціальні рівняння для відстеження і прогнозування змін M_{Ad} в системі з часом, що має вирішальне значення для побудови регулятора та запровадження керуючих впливів в режимі поточного часу.



Представлено комплексне моделювання роботи регулятора за різних умов абразивності вугілля. Розроблено регулятор, який працює шляхом дробового розподілу напрямків потоку енергетичного вугілля, був протестований за двома основними сценаріями: постійна абразивність 35% при 90% резервних запасів і безперервне збільшення абразивності з 14% до 35% при 100% резервних запасів. Результати продемонстрували успішний розподіл регулятором потоку вугільного палива в топку з резерву при високому вмісті абразиву і його здатність коригувати розподіл потоку палива при постійному зростанні абразивності. Примітно, що при зростанні абразивності витрата резервного палива також зростала, а витрата подаваного зольного палива зменшувалася, тим самим мінімізуючи швидкість зносу поверхні теплообмінника від пневматичного потоку абразивного матеріалу при спалюванні.

Представлено розробку автоматизованого контролера, призначеного для управління процесом контролю якості вугілля, що надходить на ТЕС від різних постачальників. Розроблений контролер, інтегрований в блок "Acceptance, control, and unloading of fuel", враховує транспортну затримку при відборі проб, рівень відкриття потоку при спалюванні, а також коригує крок відбору проб у відповідь на зміну якості вугілля за допомогою нечіткої логіки. Важливою функціональністю цієї системи є її здатність виявляти вугілля низької якості, вчасно змінювати частоту відбору проб і приймати рішення. Це включає припинення співпраці з постачальником неякісного вугілля, збільшення використання резервних ресурсів, збільшення кількості вагонів від перевірених постачальників та залучення нових постачальників, щоб компенсувати витрати на резервні ресурси. Ці функціональні можливості демонструють здатність контролера підтримувати стабільний ланцюжок постачання вугілля, забезпечуючи при цьому якість палива, що обіцяє підвищити операційну ефективність ТЕС.

Заклучення і висновки.

1. Роботу КІСУ було підтверджено за допомогою моделювання в різних умовах. Було досліджено чотири сценарії: поступове збільшення Ad від «Ideal» до «Bad» класу, постійна Ad в межах норми, випадкова Ad в задовільному діапазоні та контрольний тест з абсолютно випадковими значеннями Ad . Ці симуляції показали здатність системи динамічно змінювати стратегію відбору проб і адаптувати відбір вугілля у відповідь на зміну рівня абразивності внаслідок спалювання. У сценаріях з високою абразивністю система регулювала частоту відбору проб для перевірки кожного вагона на наявність дефектів, тоді як у сценаріях з низькою абразивністю відбір проб відбувався рідше (кожний десятий залізничний вагон). Ці зміни відобразилися на споживанні вугілля на електростанції, зі збільшенням обсягу поставок для компенсації витрат на резерв на випадок відмови постачальника. Випробування продемонстрували адаптивність системи в управлінні різною якістю палива для забезпечення стабільної роботи та запобіганню дефіциту палива.

2. Розрахунковий експеримент відобразив ключову роль розробленої КІСУ зносостійкістю труб теплообмінника на ТЕС. З огляду на умови обчислювального експерименту, які враховували варіації якості вугілля від трьох



різних постачальників, було підкреслено помітні відмінності в результатах між сценаріями експлуатації з КІСУ і без неї. Відомості демонструють, що за наявності КІСУ ТЕС може своєчасно реагувати на зміни середнього індексу абразивності (Ad_{avg}), зменшуючи таким чином абразивне пошкодження труб, підтримуючи планову товщину труб для експлуатації ТЕС до проведення необхідних ремонтів.

Література:

1. Grishyn M. V., Matiko F.D., Tarakhtij O. S., Zhanko K. O., Vereskun S. O. Automated solid fuel quality control system for measuring the wear resistance of heat exchange tubes. // Herald of Advanced Information Technology. 2023; Vol. 3 No.2 : 11–25. DOI: <http://doi.org/10.15276/hait.07.2023.18>.
2. Бондзик Д. Л., Дунаєвська Н. І. Перспективні технології спалювання пиловугільногопалива. // Вугільна теплоенергетика: шляхи реновації та розвитку. XVIII Міжнародна науково-практична конференція. Збірка наукових праць. 2022. С. 195-203. DOI: <https://doi.org/10.48126/conf2022>.
3. Singh A., Sharma, V., Mittal, S. An overview of problems and solutions for components subjected to fireside of boilers. // Int J Ind Chem 9. 2018. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40090-017-0133-0>.
4. Moshfiqur Rahman, Deepak Pudasainee, Rajender Gupta. Review on chemical upgrading of coal: Production processes, potential applications and recent developments. // Fuel Processing Technology. 2017. Vol. 158. P. 35-56. ISSN 0378-3820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.12.010>.
5. Yadong Tao, Wenge Song, Ziqi Zhu, Bin Wang, Ming Shang, Sa Zhang, Chao Lu. Optimization Analysis of Power Coal-Blending Model and Its Control System Based on Intelligent Sensor Network and Genetic Algorithm. // Journal of Sensors. 2023. Vol. 2023. Article ID 3898063. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/3898063>.
6. Hongxu Zhou, Rabin Bhattarai, Yunkai Li, Buchun Si, Xinxin Dong, Tengfei Wang, Zhitong Yao. Towards sustainable coal industry: Turning coal bottom ash into wealth. // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 804 (149985). ISSN 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149985>.
7. Vilakazi A.Q., Ndlovu S., Chipise L., Shemi A. The Recycling of Coal Fly Ash: A Review on Sustainable Developments and Economic Considerations. // Sustainability. 2022. Vol. 14(4): 1958. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14041958>.
8. Грішин М.В., Беглов К.В.. Оцінка ефективності збагачення палива для зменшення ризику витрат ТЕС. // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. Том. 32 (71). № 3. С. 82-89. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/14>.
9. Maksym Grishyn. Modelling of automated steam coal transportation and enrichment systems for efficient operation and cost reduction of thermal power plants. // Scientific Collection «InterConf+». 2023. Vol 34(159). P. 271–285. DOI: <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.06.2023.027>
10. Grishyn M. V., Matiko F.D., Tarakhtij O. S., Zhanko K. O., Vereskun S. O. Automated solid fuel quality control system for measuring the wear resistance of heat exchange tubes. // Herald of Advanced Information Technology. 2023; Vol. 3 No.2 :



11–25. DOI: <http://doi.org/10.15276/hait.07.2023.18>.

11. Grishyn M.V. Wear control of heat exchange surface tubes of a TPP steam generator by means of automatic regulation of coal fuel abrasiveness. // Science and technology: problems, prospects and innovations. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Osaka, Japan. 2023. P. 143-153. URL: <https://sci-conf.com.ua/ix-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-and-technology-problems-prospects-and-innovations-8-10-06-2023-osaka-yaponiya-arhiv/>

12. Grishyn M.V., Tarakhtij O.S. Simulation modelling of sampling and replacement of coal suppliers for thermal power plants. // Applied Aspects of Information Technology. 2023. Vol.6 No. 2. P. 175–189. DOI: <https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.13>.

13. Sheng J., Liu H., Wang B. Research on the Optimization of A/B Testing System Based on Dy-namic Strategy Distribution. // Processes. 2023. Vol. 11(3):912. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11030912>.

14. Федорченко А.В., Пономаренко І.В. А/В-Тестування як ефективний інструмент цифрового маркетингу. // Проблеми інноваційно-інвестиційного розвитку. 2019. С. 36-42. DOI: <http://doi.org/10.33813/2224-1213.19.2019.4>.

15. Backstrom L., Kleinberg J. Network bucket testing. // In Proceedings of the 20th international conference on World wide web (WWW '11). Association for Computing Machinery. 2011. P. 615–624. DOI: <https://doi.org/10.1145/1963405.1963492>.

16. Tamburrelli G., Margara A. Towards Automated A/B Testing. // Search-Based Software Engi-neering. SSBSE. Lecture Notes in Computer Science. 2014. Vol. 8636. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-09940-8_13.

17. Kohavi R., Longbotham R. Online Controlled Experiments and A/B Testing. // In: Sammut, C., Webb, G.I. (eds) Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining. 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7687-1_891.

Abstract. Four wear scenarios were investigated: gradual increase, constant within normal limits, random within a satisfactory range, and a control test with completely random values. Dynamic simulations showed the ability of the system to change the sampling strategy and adapt the coal selection in response to the change in the abrasiveness level due to combustion. In highly abrasive scenarios, the system adjusted the sampling frequency to check each car for defects. Such changes were reflected in the consumption of coal at the power plant, with an increase in the volume of deliveries to compensate for reserve costs in case of failure of the supplier.

The conducted calculation experiment reflected the key role of the wear resistance of the heat exchanger pipes at the TPP developed by the KISU. Given the conditions of the computer experiment, there were noticeable differences in the results between the scenarios of operation with and without the CSI. The information shows that in the presence of CSI, the TPP can respond in a timely manner to changes in the average abrasiveness index, reducing the abrasive damage of the pipes, maintaining the planned thickness of the pipes for the operation of the TPP until the necessary repairs are carried out.

Key words: pipe wear resistance, heat exchanger, computational experiment, defect, coal, computer-integrated control system.