

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
"Національний гірничий університет"

КРУПНИК ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.3.07, 621.316.71, 621.6-52, 669.1, 621.165



**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ВИРОБЛЕННЯМ  
ХОЛОДНОГО ДУТТЯ В ДОМЕННОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

Спеціальність 05.13.07 – «Автоматизація процесів керування»

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електротехніки та електромеханіки Дніпродзержинського державного технічного університету Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Садовой Олександр Валентинович**, проректор з наукової роботи, професор кафедри електротехніки та електромеханіки Дніпродзержинського державного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Щокін Вадим Петрович**  
завідувач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Державного вищого навчального закладу "Криворізький національний університет" Міністерства освіти і науки України.

кандидат технічних наук, доцент  
**Мацуй Анатолій Миколайович**  
доцент кафедри автоматизації виробничих процесів, Кіровоградського національного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

Захист відбудеться «31» березня 2016 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 в Державному вищому навчальному закладі «Національний гірничий університет» (49005, м. Дніпропетровськ, вул. Карла Маркса, 19).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного вищого навчального закладу "Національний гірничий університет" (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, просп. Карла Маркса, 19.

Автореферат розісланий «27» лютого 2016 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 08.080.07  
к.т.н., доц.



О.В. Остапчук

**КРУПНИК Олександр Олександрович**

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ВИРОБЛЕННЯМ  
ХОЛОДНОГО ДУТТЯ В ДОМЕННОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

(Автореферат)

Підписано до друку \_\_\_\_\_ 2016 р. Формат 60x90/16.  
Папір офсетний. Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. \_\_\_\_\_

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Собівартість виплавленого чавуну істотно залежить від енергетичної ефективності комплексу вироблення холодного дуття. У цьому комплексі очищене та збагачене киснем повітря стискається повітродувкою і газотранспортною системою подається до повітронагрівачів для підігріву і подачі в доменну піч.

На металургійних підприємствах України переважною більшістю використовуються некеровані турбоповітродувки, продуктивність яких завищена з метою забезпечення доменного виробництва максимальними обсягами дуття. В ході доменної плавки виникають технологічні ситуації, при яких піч погано сприймає дуття і потребує зменшення його кількості.

Для зменшення обсягів дуття без зміни режимів роботи турбоповітродувки на повітропроводі холодного дуття в безпосередній близькості від блоку повітронагрівачів встановлений повітряно-розвантажувальний клапан, через який за командою майстра доменної печі здійснюється викид в атмосферу до 30% збагаченого киснем стисненого повітря, виробництво якого потребує значних витрат електричної і теплової енергій.

Істотного зниження витрат збагаченого киснем стисненого повітря можна досягти шляхом цілеспрямованого керування продуктивністю турбоповітродувки і тому, визначення закономірностей енергообмінних процесів в ході вироблення та транспортування холодного дуття і побудова на базі цих закономірностей алгоритмів керування процесами стиснення, зміни витрат і транспортування газотранспортною мережею збагаченого киснем повітря для подачі в доменну піч є актуальною науковою задачею.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в Дніпродзержинському державному технічному університеті в рамках держбюджетних НДР, фінансованих Міністерством освіти і науки України: «Оптимізація за критерієм максимуму енергетичної ефективності технологічного процесу виробництва гарячого дуття» (№0110U002302), «Розробка наукових основ аналізу та синтезу оптимального енергоефективного керування електромеханічними системами» (№0112U000343) де автор був співвиконавцем.

**Мета і задачі досліджень.** Метою дисертаційної роботи є підвищення енергетичної ефективності доменного виробництва шляхом автоматизації процесу вироблення холодного дуття, що дозволить максимально знизити викиди в атмосферу збагаченого киснем стисненого повітря через повітро-розвантажувальні клапани.

Для досягнення зазначеної мети поставлені і вирішені наступні завдання:

1. Забезпечення сталості дуттьового режиму при нормальному ході доменної печі.
2. Зниження впливу на роботу системи підготовки холодного дуття транспортних затримок газодинамічного характеру, що викликані протяжністю газотранспортної мережі (ГТМ).
3. Зниження відхилень витрат дуття від заданого при зміні структури

ГТМ на вході повітрянагрівачів і доменної печі.

4. Уточнення математичного опису сукупності фізичних процесів, що відбуваються в тракті вироблення холодного дуття, з урахуванням динаміки агрегатів ГТМ.

5. Уточнення математичного опису динаміки парової конденсаційної турбіни для встановлення взаємозв'язку між кількістю поданої пари і швидкістю обертання валу турбіни з урахуванням сумарної пропускної можливості клапанів пристрою подачі пари.

6. Синтез системи автоматичного керування виробництвом дуття і транспортуванням його в доменну піч, що забезпечує зниження викидів в атмосферу стисненого повітря, збагаченого киснем, через повітряно-розвантажувальний клапан.

7. Здійснення математичного моделювання та експериментальних досліджень, які підтверджують справедливість основних теоретичних положень дисертаційної роботи.

**Об'єкт дослідження** – процеси вироблення та транспортування холодного дуття в доменному виробництві.

**Предмет дослідження** – автоматизована система керування виробництвом та транспортуванням дуття в доменному виробництві.

**Методи досліджень.** У дисертації використані загальні закони фізики та термодинаміки для побудови математичної моделі парової турбіни, методи варіаційного, інтегрального та диференціального числення для знаходження законів керування, теорії автоматичного керування для ідентифікації параметрів передавальної функції, методи математичного моделювання для отримання графіків перехідних процесів. Експериментальна перевірка виконана на комбінованому експериментальному стенді.

#### **Наукові положення, що виносяться на захист**

1. Запобігання викидам в атмосферу стисненого повітря, збагаченого киснем, через повітряно-розвантажувальні клапани та підвищення енергетичної ефективності доменного виробництва здійснюється шляхом автоматичного керування швидкістю обертання повітродувки за законами, які забезпечують стабілізацію заданих тиску дуття в режимі прямого продування та витрат дуття в режимі перемикавання повітрянагрівачів.

2. Випереджувальне керування повітродувкою з урахуванням циклічних змін в топології газотранспортної мережі підвищує стабільність подачі гарячого дуття та процесу доменної плавки.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше, на відміну від відомих залежностей, отримані аналітичні вирази, що описують динаміку швидкості обертання парової конденсаційної турбіни з урахуванням зміни пропускного перетину клапанів пристрою подачі пари в залежності від положення траверси.

2. Вперше, виявлено взаємозв'язок між коефіцієнтом підсилення парової конденсаційної турбіни і сигналом завдання на пристрій подачі пари, який дозволив встановити, що при синтезі регулятора швидкості обертання турбіни вона може бути розглянута як об'єкт, що складається з послідовного з'єднання

аперіодичної ланки другого порядку і ланки чистого запізнення зі змінними коефіцієнтами підсилення і сталими часу.

3. Доведено ефективність застосування модифікованого принципу симетрії при розв'язанні задачі аналітичного конструювання регуляторів агрегатів вироблення холодного дуття, що представляють собою об'єкти керування зі змінними коефіцієнтами підсилення та сталими часу, за рахунок надання синтезованим системам властивості стійкості при необмеженому збільшенні коефіцієнтів підсилення.

4. Вперше, на відміну від загальновідомого математичного опису рівняннями в частинних похідних газодинамічних процесів у елементах газотранспортної мережі, встановлений динамічний взаємозв'язок між тиском і витратами на виході газотранспортної мережі та їх значеннями на вході у вигляді звичайних нелінійних диференціальних рівнянь, що покладений в основу синтезу контурів керування витратами і тиском дуття на виході мережі.

**Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків, рекомендацій та результатів** підтверджується: коректністю постановки і вирішення завдань дослідження; застосуванням сучасних методів теорії автоматичного керування та математичного моделювання з урахуванням загальноприйнятих припущень; достатнім обсягом експериментів, проведених на об'єкті автоматизації, що забезпечило збіг модельних і експериментальних результатів з похибкою, що не перевищує 10%; адекватністю отриманих моделей.

**Практичне значення одержаних результатів.** Запропоновано спосіб отримання динамічних механічних характеристик парових конденсаційних турбін за різних витрат пари, який дозволив побудувати та впровадити у виробництво систему оптимального керування зі спостерігачем стану турбоповітродувки, динаміка якої представлена нелінійною математичною моделлю.

На підставі встановленого динамічного взаємозв'язку між тиском і витратами на виході газотранспортної мережі значної протяжності та їх значеннями на вході синтезовано систему керування витратами і тиском дуття на входах повітрянагрівачів, яка дозволяє виключити викиди в атмосферу через повітряно-розвантажувальні клапани великої кількості збагаченого киснем стисненого повітря.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися на конференції молодих вчених і спеціалістів «Дзержинка-2008» ПАТ «ДМКД» (м. Дніпродзержинськ, 2008), XVIII міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» (м. Одеса, 2011), міжнародних форумах молодих вчених «Проблеми надрокористування» (м. Санкт-Петербург, 2009, 2011 - 2013), науковій конференції «Інформаційні технології в керуванні складними системами» (м. Дніпропетровськ, 2011), XXXVIII Міжнародній науково-технічній конференції молоді ВАТ «Запоріжсталь» (м. Запоріжжя, 2011), наукових семінарах НАН України «Оптимізація роботи електромеханічних систем» (м. Дніпродзержинськ, 2008-2015).

**Публікації.** Основний зміст, наукові положення, результати та висновки дисертаційної роботи відображені в 13 друкованих працях, опублікованих у

збірниках науково-технічних статей, матеріалів конференцій та тез доповідей, 6 з них в друкованих наукових спеціалізованих виданнях України, затверджених МОН України, в тому числі 1 стаття у виданні, що входить до міжнародних наукометричних баз.

**Особистий внесок автора** полягає в самостійно виконаному аналізі існуючих систем керування виробленням і транспортуванням холодного дуття, формулюванні наукових положень і результатів, побудові математичних моделей досліджуваного об'єкта, синтезі законів керування та їх структурній реалізації, моделюванні системи керування та аналізі отриманих даних в порівнянні з експериментальними, розробці ідеї та побудові комбінованого стенду для проведення експериментальних досліджень.

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел із 127 найменувань на 13 сторінках, 8 додатків на 14 сторінках. Загальний обсяг дисертації складає 162 сторінки, у тому числі 133 сторінки основного тексту, 62 рисунки та 1 таблиця.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

*У вступі* обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи та її зв'язок з науковими програмами і темами, сформульовано мету та задачі досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено данні про рівень апробації, кількість публікацій за тематикою виконаних досліджень.

*У першому розділі* розглянуто особливості технологічного процесу доменного виробництва, умови забезпечення стійких режимів роботи доменної печі та способи керування процесом доменної плавки. Проаналізовано методи керування інтенсивністю плавки з дотриманням технологічних вимог. Розглянуто метод керування процесом плавки «знизу», який є найбільш оперативним. Основним діючим фактором такого методу є зміна витрат дуття, яке являє собою суміш очищеного повітря та кисню, на виробництво якого витрачається до 60% електричної енергії, яка споживається металургійним підприємством. Ця суміш стискається і транспортується до повітрянагрівачів повітродувкою (рис.1).

Через те що на металургійних підприємствах України для приводу повітродувки використовуються нерегульовані парові турбіни, керування витратами дуття на вході повітрянагрівачів здійснюється майстром доменної печі шляхом відкриття/закриття повітряно-розвантажувального клапана. Надлишки дуття при такому способі керування скидаються в атмосферу. За даними Дніпровського металургійного комбінату (м. Дніпродзержинськ) втрати дуття на повітряно-розвантажувальних клапанах доменних печей помісячно у 2005 році становили від 20,3% до 27,5%.

Проведено огляд та проаналізовано математичні моделі парових турбін та систем керування (СК) їх швидкістю обертання.

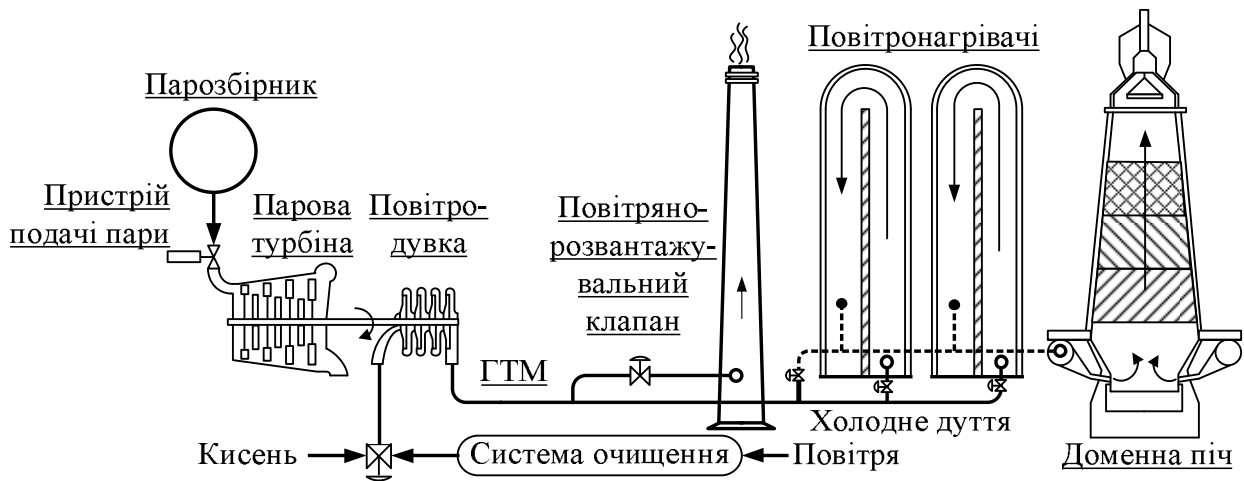


Рис. 1 - Функціональна схема технологічного процесу вироблення холодного дуття

На підставі проведеного аналізу існуючих на металургійних підприємствах України технологічних процесів і агрегатів вироблення та транспортування холодного дуття в доменному виробництві зроблено висновок про необхідність створення систем автоматичного керування турбоповітродувками, які забезпечують оптимальну за мінімумом інтегральної суми зважених за коефіцієнтами функції Ляпунова відхилень поточних значень координат об'єкта керування від заданої траєкторії руху. Запропоновано синтез контурів керування здійснювати шляхом розв'язання задачі аналітичного конструювання регуляторів (АКР) методом модифікованого принципу симетрії.

Сформульовані мета і завдання наукового дослідження.

**Другий розділ** присвячений математичному опису об'єкта керування (ОК), зокрема: розробці математичної моделі динаміки парової конденсаційної турбіни; уточненню математичної моделі повітродувки, математичному опису газотранспортної мережі, побудові структурної схеми тракту дуття.

Грунтуючись на принципах функціонування реактивної парової турбіни та відомих фізичних законах, розроблена математична модель конденсаційної парової турбіни, яка, на відміну від відомих, встановлює взаємозв'язок між кількістю пари, яка надходить до турбіни через пристрій подачі пари (ППП), та швидкістю обертання її валу з урахуванням особливостей конструкції ППП та характеру вентиляторного моменту навантаження з боку повітродувки

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_C} \left( z R_{CP} S_l \sqrt{(P_{np} - P_0) \rho} \times \left( \sqrt{\frac{2}{z}} \sqrt{k^* P_{np} - h_2} - R_{CP} \omega \right) - k_N \omega^2 - M_C \right), \\ \frac{dP_{np}}{dt} = \frac{\sqrt{\rho}}{V_{np} C_g} \left( S_o \sqrt{(P_H - P_{np})} - S_l \sqrt{(P_{np} - P_0)} \right), S_o = \sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{d_k}{2} \right)^2 - r o_i^2 \right) \pi, \\ r o_i = \begin{cases} d_k / 2 & \text{при } h_i \leq -h_k \\ d_k / |h_i / 2 h_k| & \text{при } -h_k \leq h_i \leq 0, h_i = L - d f_i - h_k. \\ 0 & \text{при } h_i > 0 \end{cases} \end{array} \right. \quad (1)$$



де  $\omega$  - швидкість обертання валу,  $P_{np}$  - тиск пари в парозбірнику,  $S_o$  - сумарна площа перетину відкритих клапанів,  $J_C$  - сумарний момент інерції повітродувки та турбіни,  $R_{CP}$  - середнє значення радіусу коліс турбіни,  $S_l$  - сумарна площа перетину, через який відбувається витікання пари з парозбірника,  $P_0$  - тиск пари на виході з парової турбіни,  $\rho$  - густина пари,  $z$  - число коліс парової турбіни,  $k^*$  - стала зміни питомого об'єму пари за часом,  $h_2$  - питома ентальпія пари після розширення,  $k_N$  - коефіцієнт вентиляторного моменту навантаження,  $V_{np}$  - об'єм парозбірника,  $C_g$  - коефіцієнт, що характеризує стан пари,  $d_k$  - максимальний діаметр зрізу клапану,  $P_H$  - тиск пари в паропроводі,  $df_i$  - величина зазору хвоста  $i$ -го клапану,  $h_k$  - висота конусу клапана від вершини до діаметру максимального зрізу  $d_k$ ,  $L_m$  - максимальний хід траверси з клапанами,  $i$  - номер клапану.

Значення змінних, які входять до системи рівнянь (1), обчислюються на основі номінальних конструктивних даних агрегату.

Динамічні процеси в повітродувці описані рівняннями Мура-Грейтцера

$$\frac{d\Psi}{d\xi} = \frac{1}{4B^2l_c} (\Phi - \Phi_t(\Psi)), \quad \frac{d\Phi}{d\xi} = k_{pr} \sqrt{\Psi_m(\Phi, y_{00}) - \Psi}, \quad (2)$$

де  $\Psi$  - ступінь стиснення газу,  $\Phi$  - відносні витрати газу через повітродувку,  $\Phi_t(\Psi)$  - газодинамічна характеристика мережі,  $\xi = Ut/R$  - відносний час,  $t$  - поточний час,  $B = (U_1 \sqrt{V_p / A_L l_c}) / 2a_{01}$  - параметр моделі, який запропонував Грейтцер,  $U_1$  - швидкість газу на виході імPELLера,  $V_p$  - об'єм ємності після повітродувки,  $a_{01}$  - швидкість звуку,  $A_L$  - площа поперечного перетину трубопроводу, що з'єднує повітродувку та ємність на виході,  $l_c$  - довжина трубопроводу та повітродувки,  $k_{pr}$  - коефіцієнт, який залежить від площі перетину ділянки трубопроводу, через яку протікає газ, та його густини,  $\Psi_m(\Phi, y_{00})$  - газодинамічна характеристика повітродувки,  $y_{00}$  - відносна швидкість обертання вала повітродувки.

Побудова математичної моделі газотранспортної мережі при ізотермічних умовах ґрунтується на запропонованій схемі руху фронту газових сумішей елементарним об'ємом  $e$  в трубопроводі довжиною  $l$  і об'ємом  $V$  зі швидкістю  $v$  від джерела з тиском  $P_1$  до приймача з тиском  $P_T$  через умовний опір трубопроводу величиною  $k_v$  за час  $t = \tau$ , яка зображена на рис. 2, де 1-нерегульоване джерело тиску обмеженої потужності; 2-магістраль; 3-змінний опір трубопроводу; 4-приймач.

Відповідно до відомих фізичних законів газодинаміки отримано структурну схему газотранспортної мережі, яка встановлює зв'язок між змінами параметрів дугтя на вході та на виході з урахуванням протяжності мережі (рис. 3).

На основі структурної схеми (рис. 3) побудовані структурні схеми повіронагрівача, кільцевого повітропроводу та доменної печі, які відображають ди-

наміку зміни навантажень на газотранспортну мережу та дають змогу побудувати структурну схему тракту дуття (рис. 4).

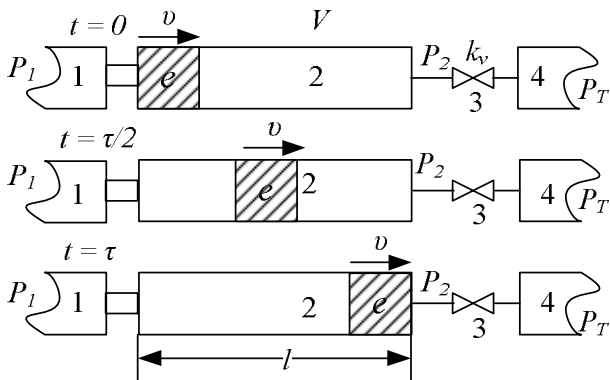


Рис. 2 - Функціональна схема руху фронту газових сумішей в трубопроводі

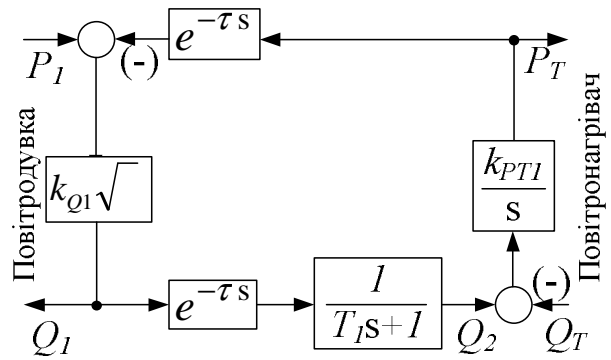


Рис. 3 - Структурна схема газотранспортної мережі

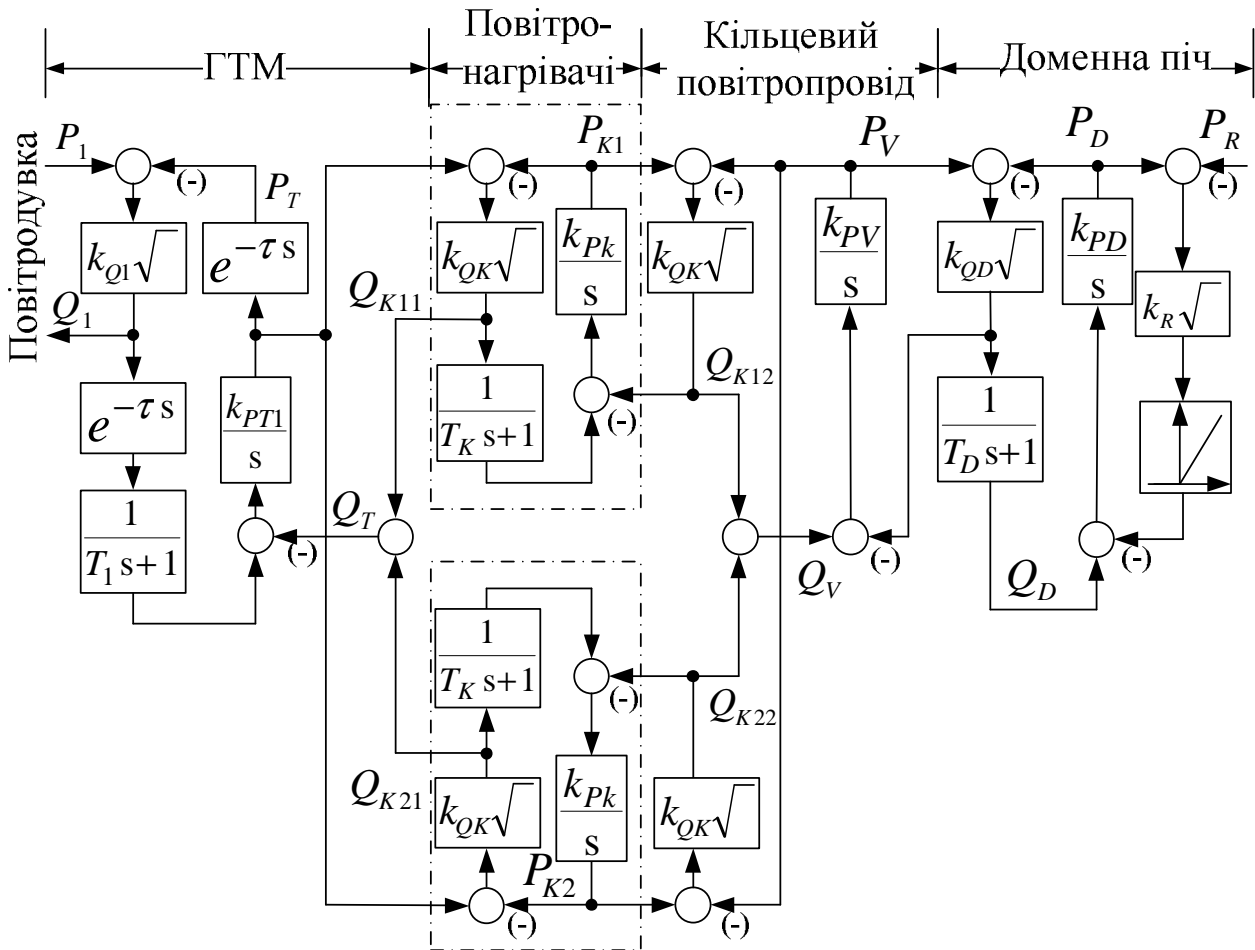


Рис. 4 - Структурна схема тракту дуття з двома повітронагрівачами і доменною піччю

Адекватність запропонованої схеми доведена експериментальними дослідженнями зміни параметрів дуття на вході газотранспортної мережі (ГТМ) при зміні структури мережі під час технологічних процесів заповнення нагрітого повітронагрівача, його підключення до мережі та відключення остиглого повітронагрівача.

**Третій розділ** присвячений синтезу та реалізації системи підпорядкованого керування витратами та тиском дугтя на вході повітрянагрівачів.

Послідовно проведено розрахунок релейних алгоритмів керування контурами струму, швидкості та положення електромеханічного позиціонера (ЕМП), який приводить в дію пристрій подачі пари в турбіну.

Нелінійна математична модель парової турбіни (1) приведена до системи лінійних диференціальних рівнянь, яка може бути представлена у вигляді передавальної функції (3) зі змінними сталими часу та коефіцієнтами підсилення

$$G(s) = e^{-s\tau_b(\alpha)} \frac{k_b(\alpha)}{(T_{1b}(\alpha)s + 1)(T_{2b}(\alpha)s + 1)}, \quad (3)$$

де  $\tau_b(\alpha)$ ,  $k_b(\alpha)$ ,  $T_{1b}(\alpha)$ ,  $T_{2b}(\alpha)$  - функції, значення яких залежать від рівня сигналу завдання  $L = \alpha \cdot 1(t)$ .

Виконані ідентифікація параметрів передавальної функції (3) та встановлення взаємозв'язків (рис. 5) між амплітудою вхідного сигналу і значеннями сталих часу, коефіцієнтів підсилення та часу затримки.

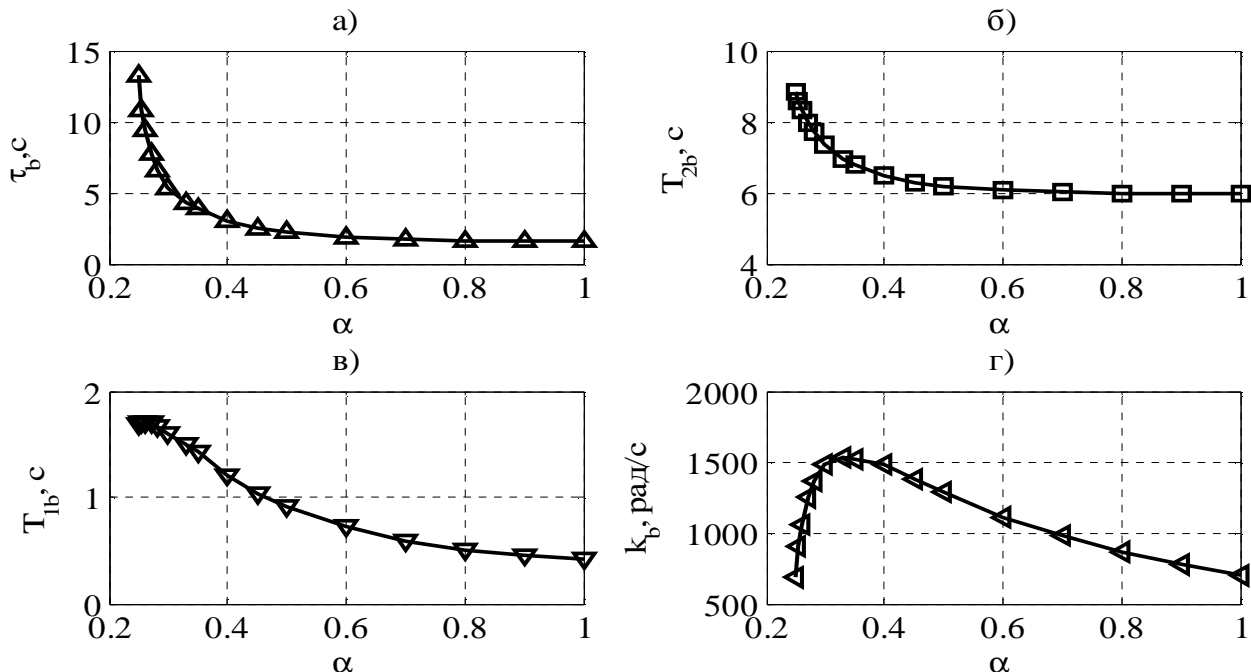


Рис. 5 - Залежності коефіцієнтів передавальної функції (3) при різних значеннях коефіцієнта  $\alpha$ : а) – сталої часу ланки чистого запізнювання; б, в) – сталих часу аперіодичних ланок першого порядку; г) – коефіцієнта підсилення.

В результаті вибору значень параметрів  $k_b$ ,  $T_{1b}$ ,  $T_{2b}$ ,  $\tau_b$  передавальної функції (3) на основі отриманих залежностей (рис. 5) та розв'язання задачі АКР синтезовано релейну СК швидкістю обертання парової турбіни, яка працює в ковзному режимі та має за рахунок цього низьку чутливість до зміни параметрів ОК. Неможливість проведення прямого вимірювання проміжних координат об'єкта керування зумовила використання спостерігача стану. Структурна реалізація знайденого алгоритму керування швидкістю парової турбіни з пристроєм спостереження наведена на рис.6.

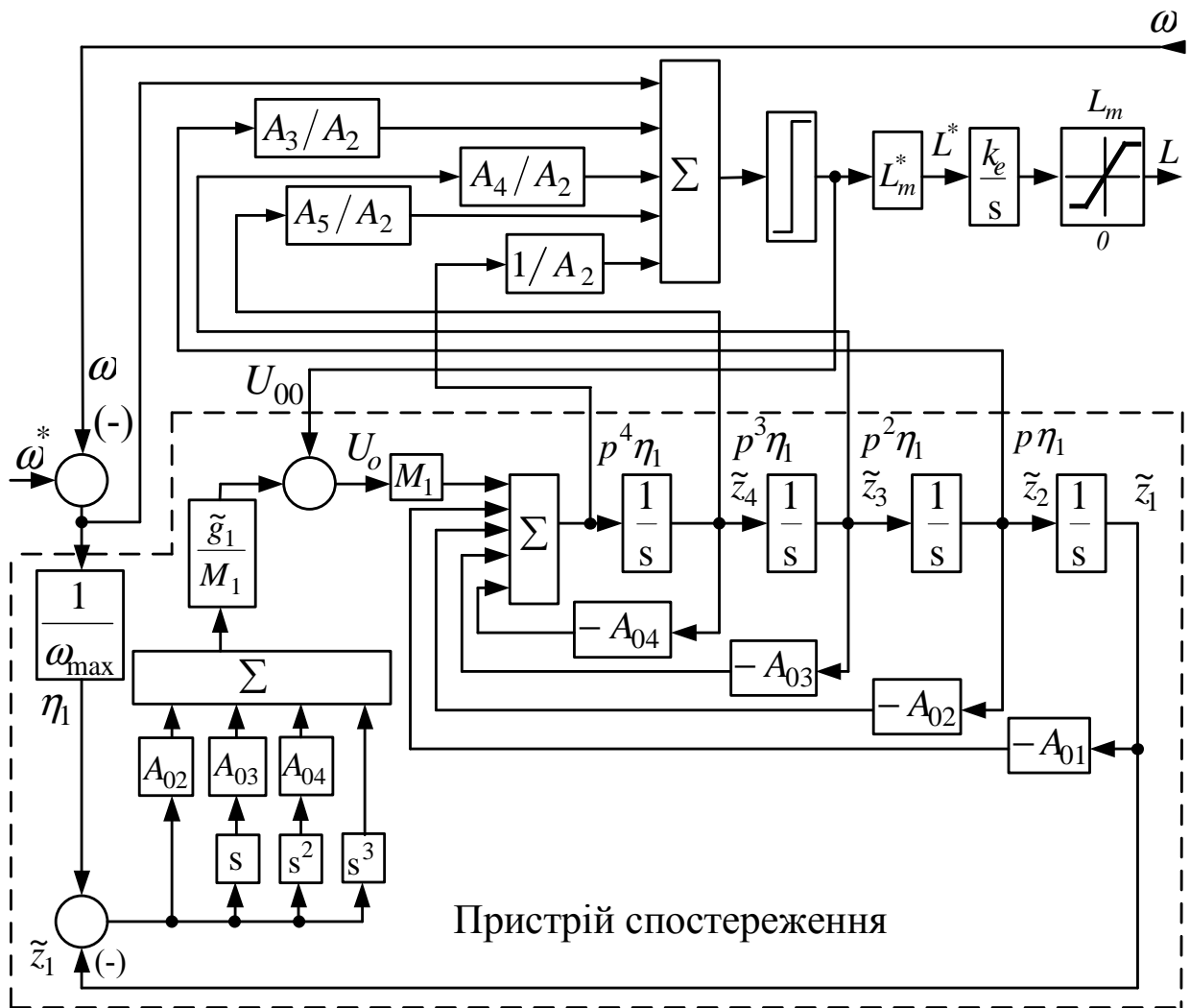


Рис. 6 - Структурна схема системи керування швидкістю обертання парової турбіни з пристроєм спостереження та СК ЕМП

Проведені дослідження впливу параметрів математичної моделі повітродувки (2) на динамічні показники перехідних процесів дали можливість відмовитися від другого рівняння моделі, оскільки воно описує фізичні процеси, що відбуваються під час помпажу та зриву потоку. Швидкоплинність таких процесів на порядки більша від процесів компреміювання у нормальному режимі роботи, тому використана лінійна залежність між швидкістю обертання повітродувки і витратами стисненого повітря, збагаченого киснем, на її виході. В результаті математична модель процесу стиснення дуття зведена до диференціального рівняння першого порядку в іменованих одиницях

$$\frac{dP_1}{dt} = k_3(Q_k - Q_1), \quad Q_k = k_{ck} \cdot \omega, \quad k_3 = P_a / (4B^2 l_c Q_{k \max}), \quad (3)$$

де  $P_1 = \Psi \cdot P_a$ ,  $Q_1$  - тиск та витрати дуття на виході повітродувки,  $P_a$  - атмосферний тиск,  $Q_{k \max}$  - максимальна продуктивність повітродувки,  $k_{ck} = Q_{k \max} / \omega_{\max}$ ,  $\omega_{\max}$  - максимальна швидкість обертання турбоповітродувки.

Порівняння динамічних показників ГТМ та синтезованої системи підпо-

рядкованого керування швидкістю обертання турбоповітродувки дозволили встановити, що з достатньою для інженерних розрахунків точністю керована турбоповітродувка в складі об'єкта керування витратами та тиском дуття на виході ГТМ може бути представлена типовою нелінійною схемою обмеження прискорення вхідного сигналу (Rate Limiter).

З врахуванням такого представлення і використанням модифікованого принципу симетрії синтезовані закони керування витратами та тиском дуття на виході ГТМ, структурні схеми реалізації яких наведені на рис. 7 та рис. 8.

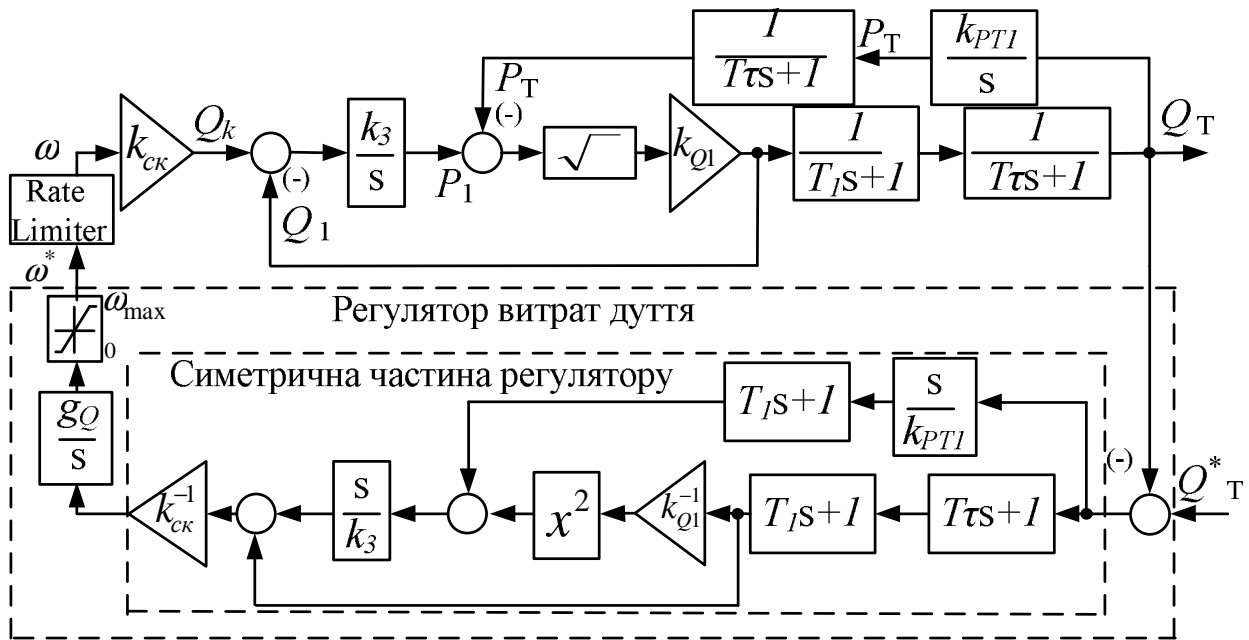


Рис. 7 - Структурна схема контуру керування витратами дуття на виході ГТМ

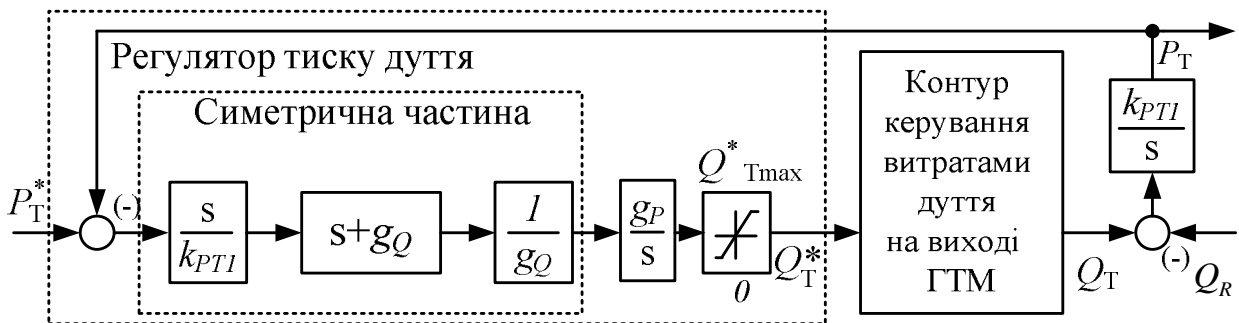


Рис. 8 - Структурна схема контуру керування тиском дуття на виході ГТМ

**У четвертому розділі** досліджено динаміку системи керування виробленням та транспортуванням холодного дуття.

Через неможливість проведення експерименту на реально діючому технологічному об'єкті усі дослідження СК виробленням холодного дуття та її контурів проведені на комбінованому стенді. Стенд складається з регульованого електроприводу та ЕОМ. Регульований електропривод представлений ЕМП Exlar, керованим перетворювачем Unidrive SP, який реалізує роботу системи керування пристроєм подачі пари. За допомогою ЕОМ забезпечується відображення технологічних режимів роботи турбоповітродувки, газотранспортної ме-

режі з повітрянагрівачем і доменною піччю з синтезованими підсистемами керування. Функціональна схема стенду наведена на рис. 9.

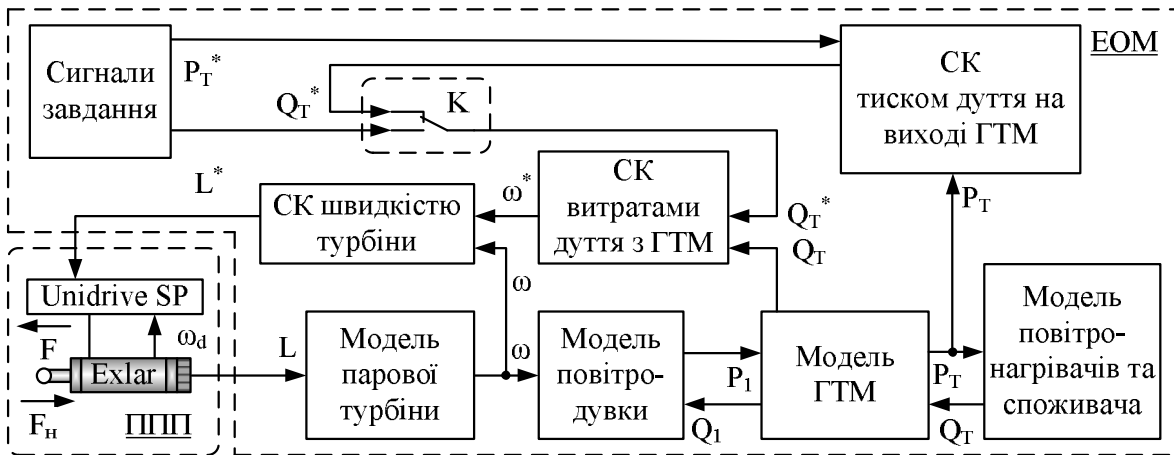


Рис. 9 – Функціональна схема комбінованого стенду для дослідження системи керування виробленням та транспортуванням холодного дуття

Досліджувана система підпорядкованого керування процесом вироблення холодного дуття містить від 5 до 6 контурів регулювання в залежності від технологічного режиму. Контури керування положенням ППП реалізовані на реально діючому обладнанні, а контури швидкості обертання парової турбіни, регулювання витратами та тиском на виході ГТМ – віртуально на ЕОМ. Залежно від технологічного режиму процесу вироблення холодного дуття до системи керування підключається або відключається контур керування тиском на виході ГТМ.

Дослідження проведені послідовно поконтурно, при цьому виконані кількісна та якісна оцінки показників процесів керування у підпорядкованих контурах СК технологічних агрегатів: конденсаційної турбіни малої потужності К-12-35, повітродувки К-3250-41-1, ГТМ протяжністю 900м та виконані дослідження законів керування ППП з сервоприводом Exlar GSX20-0601-MFA-CT3-138-AR (далі Exlar) та закону керування швидкістю обертання вала турбіни.

Сервопривод Exlar забезпечує необхідне зусилля та швидкість переміщення штоку ППП турбіни К-12-35. Виконано порівняння результатів математичного моделювання системи керування ЕМП, яка синтезована у 3-му розділі, з результатами, що отримані на експериментальному стенді. Графіки перехідних процесів зміни струму, швидкості переміщення та положення ЕМП з найтяжчими відповідно до технологічного процесу навантаженнями наведені на рис. 10.

Порівнюючи графіки перехідних процесів Exlar, що отримані на математичній моделі та зняті на випробувальному стенді, зроблено висновок про їх ідентичність та можливість використання такого ЕМП для привода ППП турбіни К-12-35.

Досліджено керування швидкістю обертання парової турбіни з синтезованими алгоритмами, і на рис.11 наведено перехідні процеси зміни швидкості обертання  $\omega$  при зміні сигналу завдання  $\omega^*$  та величини моменту навантаження  $M_H$ , а також зміна положення  $L$  штоку ППП. Аналізуючи отримані резуль-

тати, можна зробити висновок, що СК з регулятором швидкості є астатичною і характеризується перерегулюванням за збурюючим впливом не більше 3% при зміні навантаження на  $\pm 10\%$  від номінального.

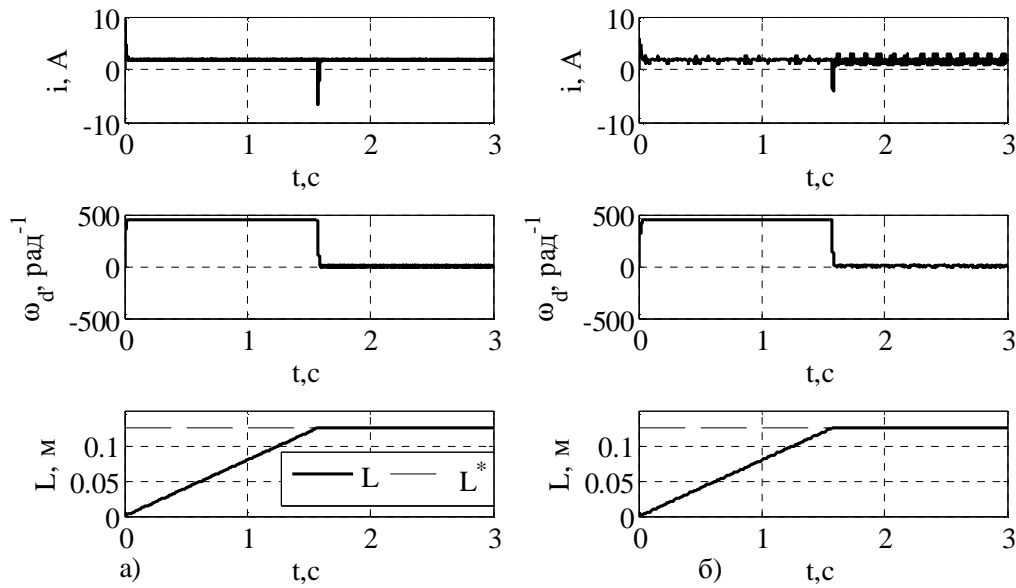


Рис. 10 – Графіки перехідних процесів струму, швидкості переміщення та положення Exlar GSX20-0601-MFA-CT3-138-AR, отримані на:  
а) – математичній моделі, б) – експериментальному стенді

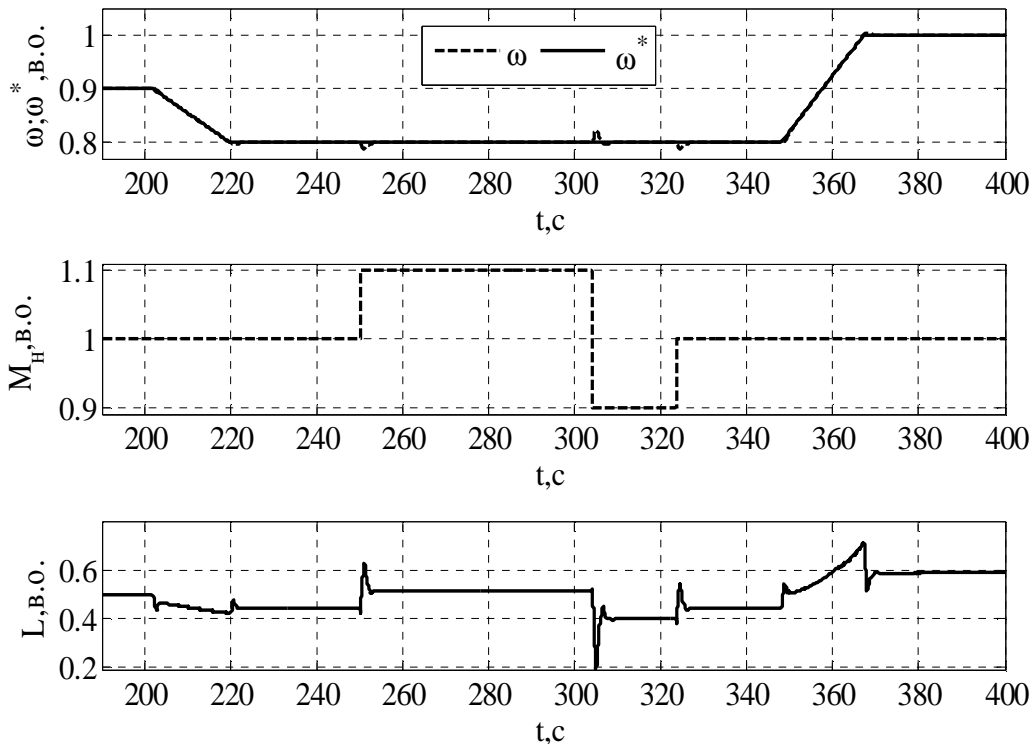


Рис. 11 – Графіки перехідних процесів роботи системи керування швидкістю парової турбіни

Для перевірки адекватності моделі ГТМ виконано математичне моделювання її роботи відповідно до вимог діючого технологічного процесу транспортування дуття до повітрянагрівача та порівняння результатів моделювання з перехідними процесами на виході і вході ГТМ в процесі підключення нагрітого

повітрянагрівача і відключення остиглого, зафіксованих в доменному цеху ЗАТ «Донецьксталь» - металургійний завод. Результати моделювання і експериментів наведені на рисунках 12 та 13.

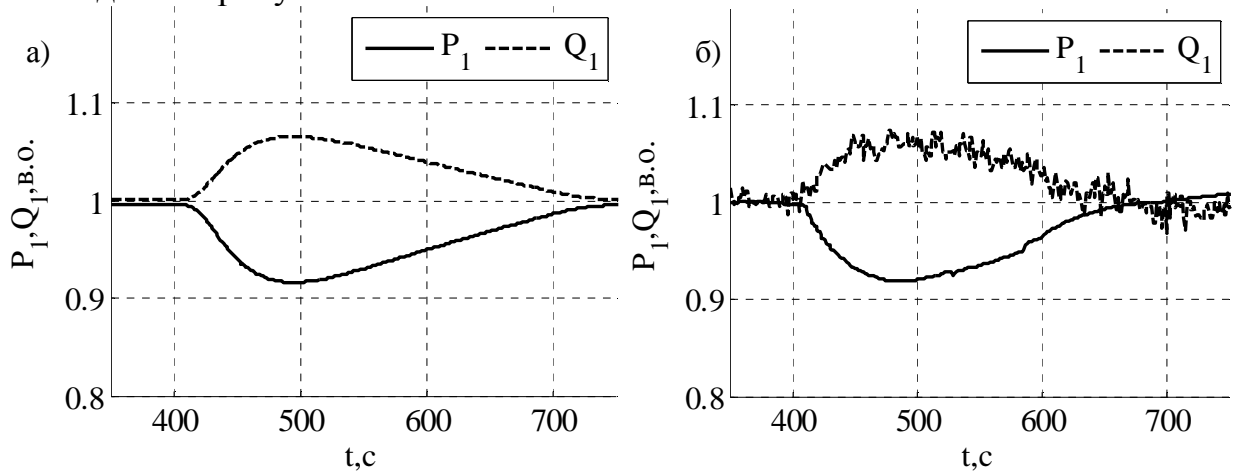


Рис. 12 – Графіки перехідних процесів тиску та витрат на вході ГТМ, отримані: а) – на математичній моделі, б) – на діючому обладнанні

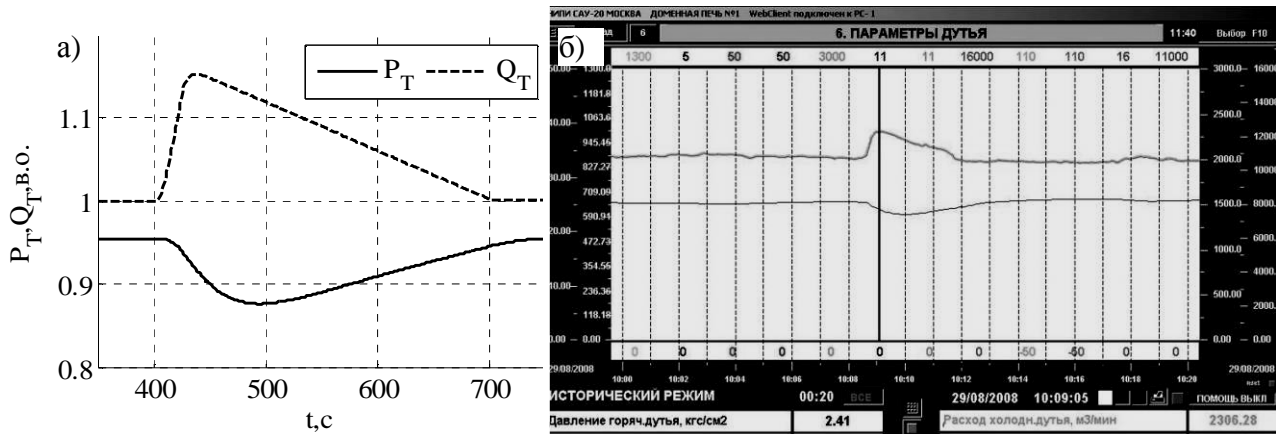


Рис. 13 – Графіки перехідних процесів тиску та витрат на виході ГТМ, отримані: а) – на математичній моделі, б) – на діючому обладнанні

Порівняння експериментальних даних з результатами моделювання дозволяє зробити висновок про збіг законів зміни витрати і тиску на кінцях ГТМ і слугує доказом адекватності математичної моделі ГТМ. Розбіжності результатів моделювання становлять не більше 10% від знятих експериментально. Це пояснюється складною геометрією реального трубопроводу, яка не враховувалася при моделюванні, і неврахованою взаємодією з зовнішнім середовищем.

В результаті дослідження процесів вироблення холодного дуття виявлена необхідність підвищення динамічної точності системи стабілізації витрат дуття на виході повітрянагрівачів в режимі їх перемикавання. Ця задача розв'язана шляхом випереджуючої на витримку часу  $\tau_y$  подачі завдання на збільшення витрат дуття на виході ГТМ порівняно з моментом початку заповнення нагрітого повітрянагрівача.

Перехідні процеси зміни витрат дуття в режимі перемикавання повітрянагрівачів в системі з випереджуючим керуванням наведені на рис. 14. Для порівняння на рисунку 15 приведені перехідні процеси в системі без випередження.



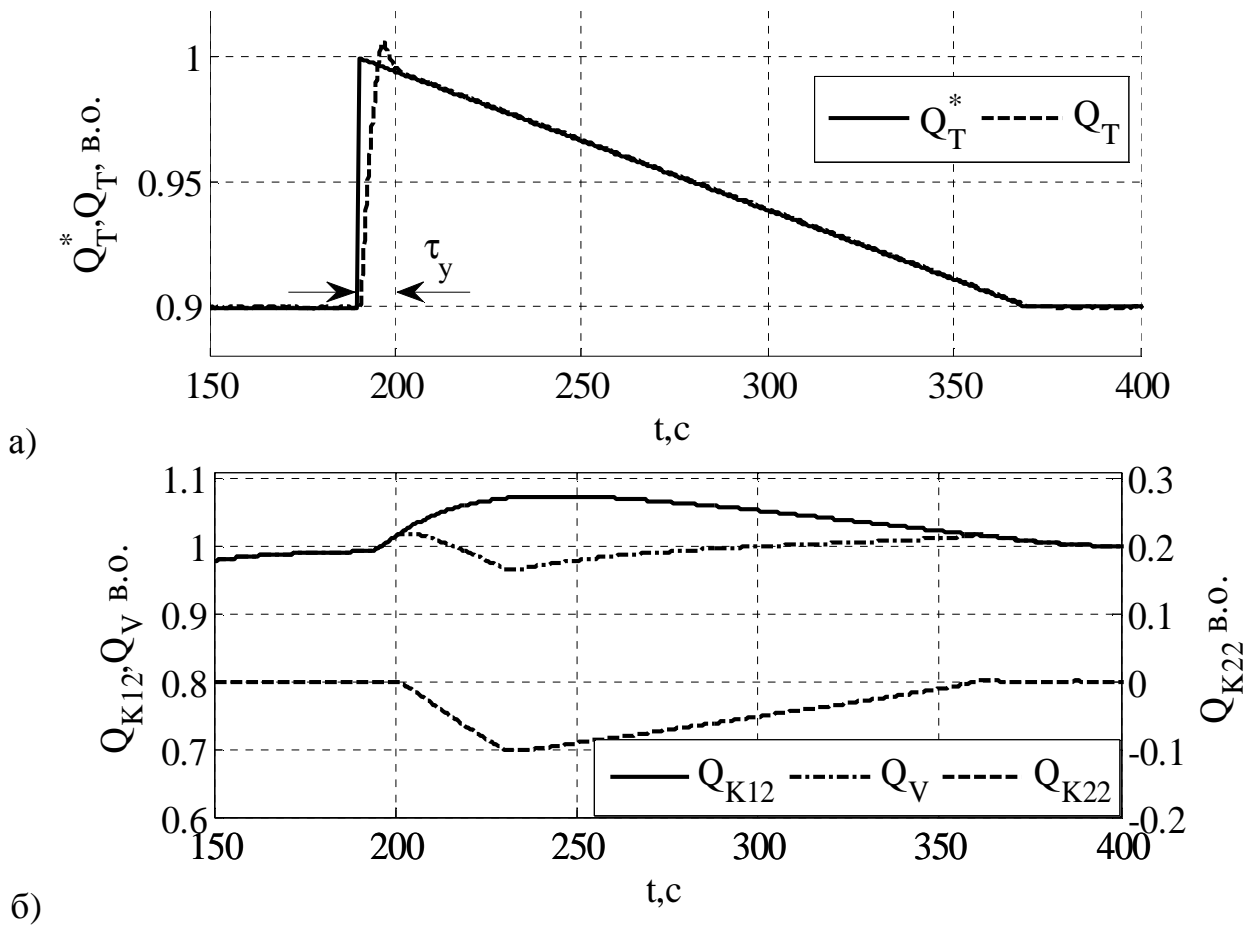


Рис. 14 – Перехідні процеси зміни витрат дуття в режимі перемикання повітрянагрівачів в системі з випереджуючим керуванням

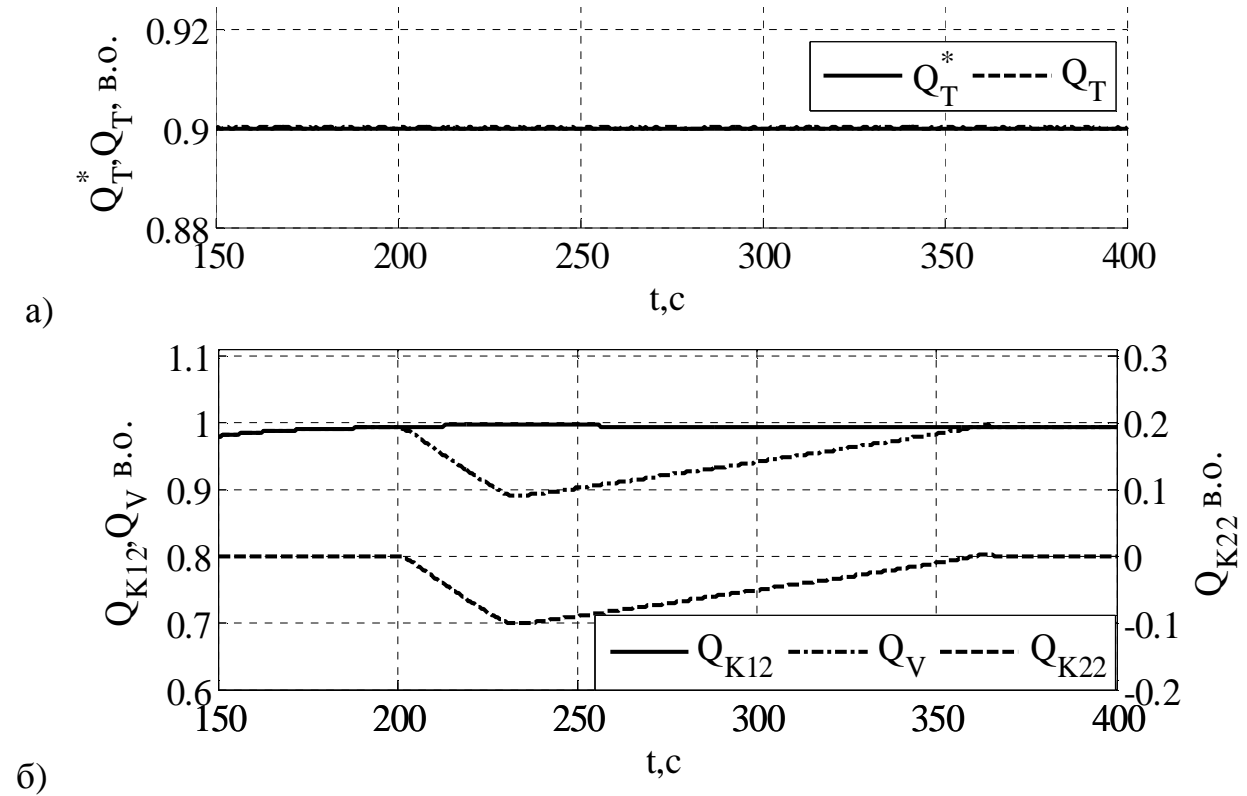


Рис. 15 – Перехідні процеси зміни витрат дуття в режимі перемикання повітрянагрівачів в системі без упереджуючого керування

На рис. 14, 15 використані такі позначення:  $Q_T^*$  - завдання на витрати дуття  $Q_T$  на виході ГТМ,  $Q_{K12}$  - витрати дуття через остиглий, а  $Q_{K22}$  - через нагрітий повітрянагрівачі,  $Q_V = Q_{K12} + Q_{K22}$  - витрати дуття, що подається в доменну піч.

Отримані графіки ілюструють динаміку етапу заповнення нагрітого повітрянагрівача зі сторони доменної печі під час технологічного процесу перемикання.

В системі з випереджуючим керуванням на 190 с починається збільшення сигналу  $Q_T^*$  завдання на СК витратами дуття з ГТМ, що призводить до розгону повітродувки, зростання тиску та витрат дуття на виході газотранспортної мережі. На 200 с в обох системах відкривається шибер заповнення нагрітого повітрянагрівача зі сторони доменної печі, що в умовах відсутності випереджуючого керування призводить до зниження витрат дуття, що подається в доменну піч, на 11% (рис. 15, б), в той час як в системі з випереджуючим керуванням динамічне падіння витрат дуття на вході доменної печі не перевищує 3,5% (рис. 14, б).

Підвищення стабільності витрат дуття, що подається в доменну піч, забезпечує поліпшення якості протікання доменної плавки.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідницькою роботою в якій розв'язано актуальну задачу розробки системи керування витратами та тиском дуття на вході повітрянагрівачів, що дозволяє зменшити викиди в атмосферу збагаченого киснем повітря без порушення технологічного процесу виплавки чавуну.

Відповідно до мети роботи отримані наступні результати:

1. Встановлено, що застосування електромеханічного позиціонера як приводу пристрою подачі пари конденсаційної турбіни забезпечує можливість побудови системи підпорядкованого керування виробленням холодного дуття.

2. Доведено, що зміна способу подачі холодного дуття до повітрянагрівачів шляхом керування продуктивністю повітродувки і виключення з роботи повітряно-розвантажувального клапана дозволяє знизити викиди в атмосферу збагаченого киснем стисненого повітря і знизити тим самим енергетичну складову в собівартості чавуну.

3. Дослідження основних газодинамічних і механічних процесів, які протікають в паровій конденсаційній турбіні, забезпечило отримання закономірностей зміни швидкості обертання валу турбіни від кількості пари, що подається на її вхід. На основі цього дослідження вперше виконано побудову комбінованої динамічної моделі термодинамічних і механічних процесів, які відбуваються в робочому просторі парової турбіни.

4. В результаті дослідження парової конденсаційної турбіни як об'єкта керування у вигляді «чорної скриньки» доведено, що її динамічна модель замість системи нелінійних диференціальних рівнянь може бути представлена послідовним з'єднанням двох аперіодичних ланок першого порядку та ланки запізнення зі змінними в функції амплітуди задавального діяння коефіцієнтами

підсилення та сталими часу. Це дозволило використати апарат аналітичного конструювання регуляторів для створення релейного закону керування швидкістю обертання парової турбіни.

5. Встановлено, що з достатньою для інженерних розрахунків точністю керована турбоповітродувка в складі об'єкта керування витратами та тиском дуття на виході ГТМ може бути представлена динамічною ланкою Rate Limiter.

6. Використаний підхід для опису процесів в газотранспортній мережі дав можливість отримати математичний опис динаміки газодинамічних об'єктів тракту дуття, який дозволив встановити взаємозв'язки між змінами параметрів дуття на вході та виході ГТМ.

7. Виконане дослідження термодинамічних процесів, які протікають при підключенні нагрітого і відключенні остиглого повітрянагрівачів, дозволило виявити причини та закономірності зміни тиску і витрат дуття на вході доменної печі.

8. Доведено, що застосування випереджуючої у часі подачі завдання на збільшення витрат дуття на виході ГТМ порівняно з моментом відкриття шибєру на заповнення нагрітого повітрянагрівача підвищує стабільність витрат дуття, яке подається в доменну піч, що сприяє поліпшенню якості протікання доменної плавки.

### ПУБЛІКАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Опубліковані у виданнях, що включені до переліку МОН України:*

1. Черв'яков В.Д. Об'єктний аналіз технологічної системи нагнітання в доменному виробництві / В.Д. Черв'яков, О.О. Крупник // Восточно-европейский журнал передових технологий. – 2007. – № 4/1 (28). - С.59–64.
2. Садовой А.В. Математическая модель паровой конденсационной турбины с электромеханическим управлением / А.В. Садовой, А.А. Крупник, Н.Т. Тищенко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2008. – № 3/ (50) Частина 2. – С.121-123.
3. Крупник А.А. Модель газотранспортной системы как объекта управления / А.А. Крупник, А.В. Садовой, Н.Т. Тищенко, Р.С. Волянский, // Сборник научных трудов Днепропетровского государственного технического университета (технические науки) Днепропетровск: ДГТУ. – 2009.–№ 1(11). – С.152 - 157.
4. Садовой А.В. Электромеханическая система регулирования скорости паровой турбины / А.В. Садовой, А.А. Крупник // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – К.:Техніка, 2011. – № 03 (79). – С.198-199. (науково метрична база РИНЦ)
5. Крупник А.А. Закономерности изменения параметров дуття в технологическом процессе доменного производства / А.А. Крупник, А.В. Садовой, Н.Т. Тищенко // Сборник научных трудов Днепропетровского государственного технического университета (технические науки) Днепропетровск: ДГТУ. – 2011. –№ 1(16) – С.92-97.

6. Крупник А.А. Автоматическое управление скоростью паровой турбины привода воздуходувки / А.А. Крупник, А.В. Садовой, // Сборник научных трудов Днепропетровского государственного технического университета (технические науки) Днепропетровск: ДГТУ. – 2015. – № . – 1(26) – С.121-129.

*Тези доповідей:*

7. Крупник А.А. Моделирование системы управления сопловой подачи пара в турбину / А.А. Крупник, А.В. Садовой, Н.Т. Тищенко // VI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів. Тези доповідей. – Кременчук: КДПУ, 2008. – С.230–231.
8. Крупник А.А. К вопросу о моделировании газотранспортной системы / А.А. Крупник, Р.С. Волянский // Международный форум-конкурс молодых ученых. Проблемы недропользования, Санкт-Петербург, 2009. – С.126.
9. Крупник А.А. Электромеханическая система регулирования скорости паровой турбины / А.А. Крупник, А.В. Садовой, А.М. Шипельский // Проблемы недропользования. Международный форум-конкурс молодых ученых: Сборник научных трудов. Часть I / Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), СПб, 2011. – С.199-200.
10. Крупник А.А. Математическая модель паровой конденсационной турбины / А.А. Крупник, А.В. Садовой. – Информационные технологии в управлении сложными системами. Сборник докладов научной конференции. Днепропетровск: изд-во «Свидлер А.Л.», 2011. – С.31–33.
11. Крупник А.А. Регулятор расхода газотранспортной сети с запаздыванием / А.А. Крупник, А.В. Мельник, Н.В. Семипятная // Проблемы недропользования. Международный форум-конкурс молодых ученых: Сборник научных трудов. Часть I / Национальный минерало-сырьевой университет «Горный». СПб, 2012. – С.178-180.
12. Крупник А.А. Исследование устойчивости некоторых нелинейных систем / А.А. Крупник, В.И. Барашкина, В.В. Блощицина // Проблемы недропользования. Международный форум-конкурс молодых ученых: Сборник научных трудов. Часть I / Национальный минерало-сырьевой университет «Горный». СПб, 2013. – С.207-209.
13. Крупник А.А. Регулирование расхода в газотранспортных сетях / А.А. Крупник, Ю.В. Сохіна // Проблеми, перспективи та нормативно правове забезпечення енерго-ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві: матеріали V міжнар.наук.-практ. конф.; Харк.нац.ун-т міськ. госп-ва. ім.О.М.Бекетова, 2013. С.94-95.

У роботах, написаних у співавторстві, дисертанту належить: у [1] розробка об'єктно-орієнтованої моделі плавки чавуну та системи нагнітання повітря; у роботах [2,10] розробка математичної моделі парової турбіни та виявлення взаємозв'язків між витратами пари і швидкістю обертання валу; у публікаціях [3,8] уточнення математичної моделі газотранспортної системи; у роботах [4,9] розробка та дослідження системи керування швидкістю парової обертання валу турбіни; у роботі [5] розробка газодинамічної моделі тракту холодного дуття та

виявлення взаємозв'язків між зміною технологічних режимів і параметрами холодного дуття на вході повітрянагрівачів; у роботі [6] розроблена система автоматичного керування швидкістю обертання валу парової турбіни; у роботі [7] отримання залежності зміни моменту навантаження та сумарного перерізу пристрою подачі пари від положення керуючого органу з урахуванням особливостей конструкції; у публікаціях [11,13] синтез модифікованим принципом симетрії законів керування витратами дуття на виході газотранспортної мережі; у роботі [12] проведено дослідження стійкості системи керування з нелінійною ланкою типу «квадратний корінь», яка характерна для динамічних моделей газотранспортних систем.

### АНОТАЦІЯ

**Крупник О.О. Автоматизація процесу керування виробленням холодного дуття в доменному виробництві.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 - Автоматизація процесів керування. – Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет». – Дніпропетровськ, 2016.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню наукової задачі підвищення енергетичної ефективності доменного виробництва шляхом пошуку нових закономірностей і взаємозв'язків процесу вироблення і транспортування холодного дуття для його автоматизації, що дозволяє максимально знизити викиди в атмосферу стисненого повітря, збагаченого киснем, через повітряно-розвантажувальні клапани.

Використовуючи модифікований принцип симетрії для розв'язання задачі аналітичного конструювання регуляторів побудована система підпорядкованого керування тиском та витратами холодного дуття на виході газотранспортної мережі.

Розроблені нові алгоритми керування елементами системи вироблення холодного дуття під час технологічних процесів підключення/відключення повітрянагрівачів з метою зменшення часу роботи повітряно-розвантажувальних клапанів.

Ключові слова: система керування, вироблення дуття, доменне виробництво, електромеханічний перетворювач, парова турбіна, повітродувка, газотранспортна мережа, повітрянагрівач, конструювання регуляторів.

### АНОТАЦІЯ

**Крупник А.А. Автоматизация процесса управления выработкой холодного дутья в доменном производстве.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 - Автоматизация процессов управления. - Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет». - Днепропетровск, 2016.

Диссертация посвящена решению научной задачи повышения энергетической эффективности доменного производства путем поиска новых законо-

мерностей и взаимосвязей процесса выработки и транспортировки холодного дутья для его автоматизации, что позволяет максимально снизить выбросы в атмосферу сжатого воздуха, обогащенного кислородом, через воздушно-разгрузочные клапаны.

Опираясь на основные законы термодинамики и механики создано математическое описание динамики паровой конденсационной турбины малой мощности, позволяющее получать динамические механические характеристики агрегата на основании его номинальных параметров, а также установить связь между количеством пара, подаваемого в паросборник, и скоростью вращения вала.

Предложено использование электромеханического позиционера в качестве привода устройства подачи пара в турбину, который по основным техническим характеристикам не уступает существующему механико-гидравлическому приводу, и дает возможность построения подчиненной системы управления скоростью вращения паровой турбины.

Осуществлены синтез и структурная реализация алгоритмов управления скоростью вращения паровой турбины и воздуходувки с использованием наблюдающего устройства, которые обеспечивают динамическую ошибку регулирования скорости не более 3% при изменении нагрузки  $\pm 10\%$  от номинальной.

В отличие от известных моделей трубопроводного транспорта, основанных на дифференциальных уравнениях газодинамики в частных производных, разработано математическое описание тракта холодного дутья значительной протяженности обыкновенными дифференциальными уравнениями, позволяющее установить динамические взаимосвязи между изменениями расхода и давления на входе и выходе газотранспортной сети.

С использованием модифицированного принципа симметрии для решения задачи аналитического конструирования регуляторов построена система подчиненного управления давлением и расходом холодного дутья на выходе газотранспортной сети.

Выполнены экспериментальные исследования построенной системы управления давлением на выходе газотранспортной сети во время технологического процесса переключения воздухонагревателей. Полученные результаты свидетельствуют о нецелесообразности стабилизации давления, поскольку это приводит к двукратному увеличению расхода на входе в доменную печь, что может нарушить ход доменной плавки.

Предложено применение опережающей во времени подачи задания на увеличение расхода дутья на выходе ГТС по сравнению с моментом открытия шиберов на заполнение нагретого воздухонагревателя повышает стабильность расхода дутья, подаваемого в доменную печь, что способствует улучшению качества протекания доменной плавки.

Проведено моделирование работы автоматизированной системы управления элементами газотранспортной сети выработки холодного дутья, с использованием упреждающего управления. Результаты моделирования показали снижение динамического падения расхода дутья до 3,5% от номинального по сравнению с 11% без изменения способа управления.

Полученные алгоритмы управления электромеханическим позиционером устройства подачи пара в паросборник турбины внедрены в проектную практику ООО НИП «ДІА» (г.Днепродзержинск).

Ключевые слова: система управления, выработка дутья, доменное производство, электромеханический преобразователь, паровая турбина, воздуходувка, газотранспортная сеть, воздухонагреватель, аналитическое конструирование регуляторов.

### ABSTRACT

***Krupnyk A.A. The automated process control and generation of cold blast in blast-furnace ironmaking.*** – As manuscript.

The thesis is presented for Ph.D degree by specialty 05.13.07 - Automation of control processes. - State Higher Educational Institution "National Mining University". -Dnepropetrovsk, 2016.

This thesis research is devoted to the solution of scientific task – the energy efficiency improvement of blast-furnace process by searching new mechanisms and interconnections of the process of development and transportation of cold blast for its automation, which allows minimizing atmospheric emissions of compressed oxygen-enriched air through snort valves.

For the purposes of the problem of analytical construction of regulators the system of subordinated pressure control and cold blast flow at the outlet of the gas transmission network was built based on a modified method of symmetry.

New control algorithms of elements in a system of cold blast development were developed during the process connection / disconnection of air heaters for reduction of the operation time of snort valves.

Keywords: system management, development of the blast, blast furnaces, the electromechanical transducer, steam turbine, blower, gas transport network, heater, engineering controls.