2. **Morkun V., Morkun N. and Tron V.** (2015), "Distributed closed-loop control formation for technological line of iron ore raw materials beneficiation", Metallurgical and Mining Industry, Vol. 7, pp. 16-19.

3. **Поркуян О.В.** Керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв на основі гібридних моделей Гамерштейна: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец 05.13.07. – КТУ, Кривий Ріг, 2009. – 36 с.

4. **Купін А. І.** Узгоджене інтелектуальне керування стадіями технологічного процесу збагачення магнетитових кварцитів в умовах невизначеності: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец 05.13.07. – КТУ, Кривий Ріг, 2009. – 36 с.

5. **Моркун В. С.** Ультразвуковой контроль характеристик измельченных материалов в АСУ ТП обогатительного производства / В. С. Моркун, В. Н. Потапов, Н. В. Моркун, Н. С. Подгородецкий. – Кривой Рог: Изд. центр КТУ, 2007. – 283 с.

6. **Тронь В. В.** Енергоефективне автоматизоване керування процесом збагачення руди з термографічним розпізнаванням її технологічних різновидів : дис. … кандидата техн. наук : 05.13.07 / Тронь Віталій Валерійович. – Кривий Ріг, 2013. – 226 с.

7. **Han-Xiong Li, Chenkun Qi.** (2010), Modeling of distributed parameter systems for applications – A synthesized review from time–space separation, Journal of Process Control, No20, p.p. 891-901.

8. **P. Sooraksa, G. Chen,** (1998), Mathematical modeling and fuzzy control of a flexiblelink robot arm, Mathematical and Computer Modelling, Vol. 27 (6), pp. 73–93.

9. **M.A. Demetriou, F. Fahroo** (2006), Model reference adaptive control of structurally perturbed second-order distributed parameter systems, International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 16, pp. 773-799.

10. **S.O.R. Moheimani, H.R. Pota, I.R. Petersen** (1999), Spatial balanced model reduction for flexible structures, Automatica, 35 269–277.

11. **D.G. Zill, M.R. Cullen** (2001), Differential Equations with Boundary-Value Problems, 5th ed., Brooks/Cole Thomson Learning, Pacific Grove, CA; Australia.

12. **C.A.J. Fletcher** (1984)**,** Computational Galerkin Methods, 1st ed., Springer, New York.

13. **Dale A. Smith**. Identification of nonlinear control models using Volterra-Laguerre series (2010), PhD dissertation, Department of Chemical Engineering, The University of Utah, USA.

14. **Dumont, G. A. and Ye Fu** (1993) Non-linear adaptive control via Laguerre expansion of Volterra kernels. Int. J. of Adaptive Control and Signal Processing, 7, 367-382.

15. **Zheng, Q., Zafiriou, E.,** (1995) Nonlinear system identification for control using Volterra-Laguerre expansion. Presented at American Control Conference.

16. **Dumont, G. A., Ye Fu, and A.L.Elshafei**, (1991) Functions in identification and adaptive control. IFAC Int. Symp., Singapore, 193-198.

17. **Трифонов А. Г.** Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения / А. Г. Трифонов. - [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book 2/index.php.

Рукопись поступила в редакцию 18.04.16

УДК 681.513.54:622.788

Д.О.КЛИМЕНКО, магістрант, Криворізький національний університет

АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ОБКОТИШІВ НА ФАБРИЦІ ОГРУДКУВАННЯ

У статті розглянуто актуальні питання ефективності термічної обробки залізорудних обкотишів на конвеєрних випалювальних машинах. Розглянуто існуючі підходи та методи автоматичного керування процесом термічної обробки обкотишів, на основі розглянутої інформації виділено основні переваги та недоліки представлених систем автоматичного керування. Виявлено, що способи та методи керування процесом термічної обробки обкотишів вивчені не повною мірою та знаходяться на стадії дослідження. На основі аналізу існуючих робіт, а також перспективних методів керування інерційними процесами, що характеризуються нестаціонарністю параметрів в часі, визначено напрямок подальших досліджень – розвиток методів адаптивного прогнозуючого керування процесом термічної обробки обкотишів в умовах коливань гранулометричного складу та порозності шару, зміни параметрів технологічного устаткування. Запропоновано варіант структури системи керування температурним режимом випалювання обкотишів для окремої газоповітряної камери конвеєрної випалювальної машини, де пропонується здійснювати оперативне оцінювання параметрів моделі процесу для подальшої адаптації параметрів прогнозуючого регулятора.

© Клименко Д.О.. 2016

Ключові слова: огрудкування, конвеєрна випалювальна машина, термічна обробка обкотишів, адаптивне прогнозуюче керування, оперативне оцінювання параметрів

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. На фоні підвищення цін на енергоресурси гірничопромисловий комплекс України зіткнувся з проблемою високої у порівнянні з конкурентами собівартості продукції. Застаріле обладнання та низький рівень впровадження провідних енергоефективних рішень робить вітчизняний гірничопромисловий комплекс дуже вразливим до дії зовнішніх факторів, таких як коливання вартості енергоносіїв, попиту і цін на металургійну продукцію. Так, відомо, що найбільші гірничо-збагачувальні комбінати України, що входять до групи «МЕТІНВЕСТ», закінчили 2015 рік зі збитками [1]. У цих умовах особливо гостро постає завдання впровадження енергозберігаючих технологій. За даними [2], Україна має одні з найкращих можливостей зменшення питомих енерговитрат у гірничо-металургійному виробництві. Якщо розглядати процес огрудкування металургійної сировини на конверних випалювальних машинах, в результаті якого отримуються залізорудні обкотиші, то можливі шляхи зниження енерговитрат полягають у тому числі в удосконаленні методів та способів керування термічної обробкою обкотишів. Але, незважаючи на значну кількість досліджень та розробок, наявні системи автоматичного керування процесом не завжди дозволяють вирішувати завдання зниження енерговитрат, збільшення продуктивності фабрик огрудкування, підвищення якості готової продукції у зв'язку з дією ряду чинників, які вносять небажані збурення в процес. Тому дослідження, спрямовані на вирішення завдання оптимального керування процесом термічної обробки обкотишів є актуальними.

Аналіз досліджень та публікацій. Для збільшення продуктивності, отримання високих показників якості обкотишів, зменшення питомої витрати енергоносіїв необхідно забезпечити бажаний розподіл температур уздовж випалювальної машини шляхом стабілізації температури в кожній газоповітряній камері [2, 5, 6, 11].

Функції забезпечення бажаного розподілу температур на існуючих випалювальних машинах найчастіше виконуються наступними локальними системами автоматичного керування (САК): САК температурою в зонах сушіння 1, 2; САК температурою в газоповітряних камерах зон підігріву та випалювання; САК температурним та газоповітряним режимом у зонах охолодження 1, 2; система автоматичної стабілізації тиску повітря горіння.

Крім того, на деяких випалювальних машинах реалізовано функції забезпечення відповідності між тепловим навантаження та поточною продуктивністю випалювальної машини шляхом регулювання швидкості фільтрації теплоносія в зонах підігріву та випалювання (САК тепловим навантаженням у зоні випалювання).

Зокрема, у роботі [2] описано типову систему регулювання температури та розрідження в зоні сушіння 1, згідно з якою вимірювання температури у вакуум-камерах зони здійснюється термопарами, усереднене значення їх показів порівнюється із заданим, і розраховане відхилення надходить на регулятор, який керує витратою повітря-розріджувача.

Регулятор за допомогою виконавчого механізму керує дроселем таким чином, щоб, змінюючи кількість холодного повітря, яке використовується для розбавлення підігрітого газу із зон випалювання та рекуперації, підтримувати задану температуру теплоносія на вході в шар обкотишів.

Розрідження над шаром, виміряне датчиком тиску, встановленим у ковпаку зони, порівнюється з заданим і підтримується сталим за допомогою регулятора, який через виконавчий механізм керує положенням напрямного апарата [2].

Відомою є система автоматичного керування температурним режимом у зоні випалювання[2], яка підтримує задане значення температури в горні шляхом зміни витрати газу на пальники обох сторін за результатами вимірювання температури за допомогою двох термопар, встановлених у стінках горну з обох боків (рис. 1).

Одночасно здійснюється регулювання співвідношення «газ-повітря» для пальників обох сторін з метою найбільш ефективного спалювання палива [2, 5].

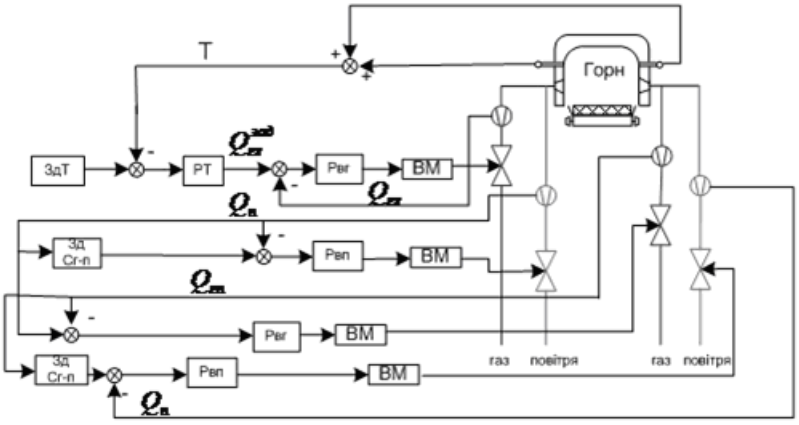

Рис. 1. Система регулювання температурою горна

Істотним недоліком описаних замкнутих систем стабілізації режимних параметрів процесу випалювання є їх значна інерційність, пов'язана з інерційністю об'єкта та існуванням запізнень у каналах керування та контролю. Крім того, під впливом зовнішніх збурень (коливання продуктивності за живленням, якісних характеристик сирих обкотишів, порозності шару) змінюються і внутрішні параметри об'єкта, що не дозволяє досягти високої точності підтримання параметрів температурного та газоповітряного режимів роботи випалювальної машини і, як наслідок, через порушення стабільності процесу призводить до зниження міцності обпалених обкотишів, скорочення терміну служби вогнетривкої футерівки та збільшення питомої витрати енергоносіїв [2].

Хоча існує значна кількість робіт, присвячених питанням розробки систем автоматичного керування процесами термічної обробки обкотишів, фактично відсутні рішення, направлені на автоматичну оптимізацію процесу. Аналіз літературних джерел та обстеження деяких фабрик зґрудкування Кривбасу показує, що при суттєвих змінах вхідних параметрів процесу налаштування на оптимальний за певним критерієм режим роботи випалювальної машини (максимізація продуктивності, мінімізація витрати палива) здійснюється, в основному, в ручному режимі на основі досвіду та інтуіції технологічного персоналу фабрики зґрудкування.

У роботі [7] авторами запропоновано алгоритм мінімізації питомої витрати палива на основі моделі у вигляді системи диференційних рівнянь тепло- й масообміну. Але, як зазначають самі автори, рішення такої системи доводиться виконувати ітераційними методами рішення рівнянь математичної фізики, що потребує великого обсягу обчислень, і час пошуку оптимальних значень керуючих дій може виявитися надто тривалим для застосування в режимі реального часу.

Автори роботи [7] також звертають увагу на перспективність використання для реалізації раціональних режимів термічної обробки обкотишів способу керування за допомогою таблиць рішень, складених на основі накопиченого й узагальненого досвіду ручного керування випалювальною машиною. У роботах [7,8] наведено таблицю рішень для максимізації продуктивності, що включає ситуації, які виникають у процесі керування статичним режимом роботи машини. Ситуація визначається тим, які з певних технологічних параметрів вийшли за границі допустимих меж і над якою вакуум-камерою знаходиться максимум температури на границі «шар – постіль». Кожній ситуації в таблиці відповідає рішення щодо зміни керуючих впливів. Досвід використання запропонованого способу керування свідчить, що для досягнення оптимального режиму роботи випалювальної машини достатньо 2-3 ітерацій [7]. Після реалізації оптимального режиму завдання керування процесом зводиться до стабілізації профілю температур у шарі при зовнішніх збуреннях. Недоліком розглянутого в [7] підходу є необхідність формалізації експертних знань, які в загальному випадку можуть бути суперечливими. Крім того, завдання складання таблиці рішень необхідно вирішувати для кожної конкретної машини окремо.

У роботах [9-11] запропоновано вдосконалити описану в [7] схему оптимізації процесу випалювання за рахунок використання нечітких регуляторів, що реалізують алгоритм нечіткого

логічного висновку та використовують набір правил продукції на основі таблиці рішень, складеної для досягнення певної мети керування (максимізація продуктивності, мінімізація витрати палива). Практичне використання запропонованого в роботах [9-11] підходу на базі методів нечіткого керування обмежується складністю налаштування параметрів функцій приналежності та правил нечіткого регулятора в процесі роботи системи на основі даних про стан об'єкта керування [12].

На основі проведеного аналізу літературних джерел та особливостей технологічного процесу з точки зору завдань автоматизації можна зробити висновок, що множина можливих стаціонарних режимів роботи випалювальної машини може бути подана у вигляді таких технологічних і економічних вимог керування [3]

$$Q = Q_{зад} = const,\ \ \overline{\varphi}_{\min} \le \overline{\varphi} \le \overline{\varphi}_{\max},\ \ G_n = \min; \tag{1}$$

$$Q = \max,\ \ \overline{\varphi}_{\min} \le \overline{\varphi} \le \overline{\varphi}_{\max}; \tag{2}$$

$$Q = \text{var},\ \ \overline{\varphi}_{\min} \le \overline{\varphi} \le \overline{\varphi}_{\max}, \tag{3}$$

де Q - продуктивність випалювальної машини; $\overline{\varphi}$, $\overline{\varphi}_{\min}$, $\overline{\varphi}_{\max}$ - поточні та гранично-допустимі значення показників якості готових обкотишів; G_n – витрата енергоносіїв [3].

У нестаціонарних режимах основною технологічною вимогою можна вважати відсутність коливань у перехідних процесах (особливо параметрів газоповітряного режиму процесу випалювання), оскільки виникнення таких коливань призводить до тривалих порушень режиму роботи всієї машини [2, 11]. Для усунення можливих порушень необхідно здійснювати ефективну компенсацію діючих на процес збурень.

В умовах дії неконтрольованих збурень, під впливом яких змінюються параметри об'єкта, для досягнення екстремальних значень критеріїв якості функціонування випалювальних машин доцільно використовувати автоматизовані системи, в яких здійснюється адаптація моделі та алгоритму керування до змін параметрів об'єкта та зовнішніх впливів. В останні роки для вирішення подібних завдань широко застосовуються сучасні методи теорії автоматичного керування, зокрема інтелектуальні методи та технології (штучні нейронні мережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми), методи синергетичного та робастного керування, керування з використанням прогнозуючих моделей (Model Predictive Control, MPC). Враховуючи особливості процесу термічної обробки залізорудних обкотишів (інерційність, нелінійність, нестаціонарність параметрів) та наявний позитивний досвід застосування методів MPC для керування схожими об'єктами, можна розглядати їх як альтернативу використанню класичних параметричних ПІ- та ПІД-регуляторів для стабілізації параметрів температурного режиму випалювання обкотишів. Так, у роботах [13] підтверджена ефективність застосування методів теорії керування на основі прогнозуючих моделей для вдосконалення систем автоматичного керування процесом термічної обробки обкотишів. У схемі нелінійного MPC-керування автор пропонує застосовувати модель процесу на базі системи ANFIS, що дозволяє періодично здійснювати адаптацію параметрів моделі в умовах дії на об'єкт параметричних та координатних збурень. Але такий підхід має і певні недоліки, пов'язані з необхідністю вирішення завдання нелінійного програмування, що призводить до суттєвого зростання обчислювального навантаження на засоби керування і потенційно може призводити до неприпустимого збільшення періоду дискретизації при формуванні сигналів керування об'єктом. Аналіз досвіду застосування методів керування з прогнозуючими моделями для автоматизації процесів керування інерційними об'єктами, що функціонують в умовах дії координатних та параметричних збурень [13] показує, що можливим рішенням при керуванні процесами термічної обробки обкотишів може бути застосування в схемі MPC спрощеної лінеаризованої моделі об'єкту з постійним оновленням коефіцієнтів моделі за рахунок використання процедур оперативного оцінювання параметрів. Один з можливих варіантів структури системи керування температурним режимом випалювання обкотишів для окремої газоповітряної камери конвеєрної випалювальної машини при використанні описаного підходу зображено на рис. 2.

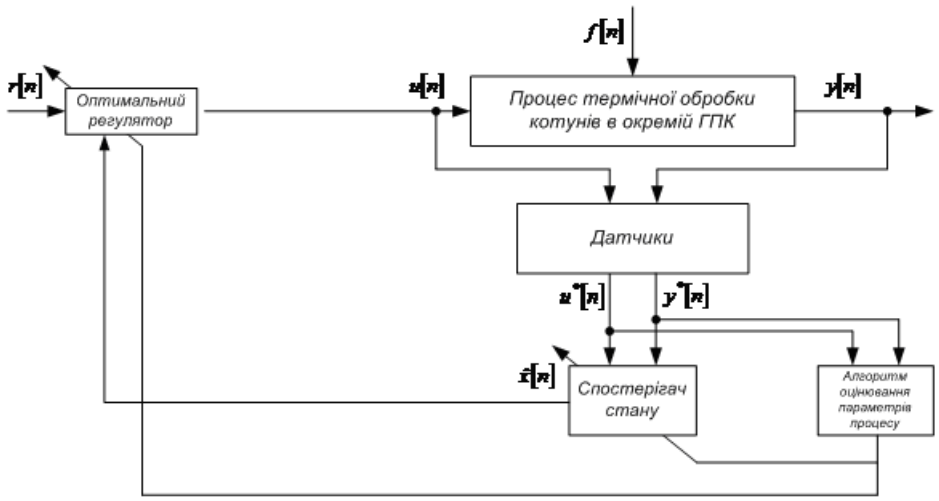

Рис. 2. Структурна схема системи адаптивного прогнозуючого керування процесом термічної обробки обкотишів з оперативним оцінюванням параметрів процесу

На основі виміряних значень керуючих дій (витрат газу та повітря з обох сторін машини) та вихідної величини (температури у газоповітряній камері) алгоритм оцінювання визначає поточні значення параметрів моделі процесу. Це забезпечує адаптацію параметрів спостерігача стану, що використовується для відновлення неконтрольованих змінних стану системи. У відповідності з принципами MPC-керування, оптимальний регулятор розраховує програму змінення керуючої дії, що мінімізує обраний функціонал якості керування на інтервалі прогнозування. Розраховане програмне керування видається у якості сигналу завдання контурам регулювання витрати газу та повітря на інтервал керування (зазвичай менший, ніж інтервал прогнозування), після чого відповідні дії повторюються спочатку.

Висновки на напрямки подальших досліджень. Численні дослідження, спрямовані на розробку способів та методів керування процесом термічної обробки залізорудних обкотишів на конвеєрній випалювальній машині, спрямованих на інтенсифікацію процесу (збільшення продуктивності, зниження питомих енерговитрат) без зниження якості кінцевої продукції, не призвели до створення ефективних систем автоматичного керування. Причини полягають у характерних особливостях процесу, що ускладнюють формалізацію завдань оптимізації процесу за різними критеріями та в умовах зміни параметрів технологічного устаткування, викликаних коливаннями гранулометричного складу та порозності шару на візках випалювальної машини. Виконаний аналіз літературних джерел показав, що можливим шляхом подолання зазначених недоліків може бути застосування сучасних методів адаптивного прогнозуючого керування. Показано, що Методологія вдосконалення систем керування процесом термічної обробки обкотишів на КВМ повинна ґрунтуватися на поєднанні алгоритмів керування з прогнозуючими моделями та алгоритмів оперативного оцінювання параметрів для адаптації параметрів моделі процесу та параметрів прогнозуючого регулятора. Запропоновано варіант структури системи керування температурним режимом випалювання обкотишів для окремої газоповітряної камери конвеєрної випалювальної машини, що реалізує описаний підхід. Напрямками подальших досліджень є порівняння ефективності різних методів оперативного оцінювання параметрів об'єкту для умов процесу термічно обробки обкотишів для моделей різних класів.

Список літератури

1. Carvalho A. Challenges & opportunities for the steel industry in moving towards green growth //OECD Green Growth Workshop, Seoul, 4 March 2010, 16 p.

2. Гончаров Ю.Г. Автоматизация процессов окускования железных руд / **Ю.Г. Гончаров, А.В. Дримбо, А.Д. Ищенко.** – М. : Металлургия, 1983. – 190 с.

3. Юсфин Ю.С. Обжиг железорудных окатышей / **Ю.С. Юсфин, Т.Н. Базил**евич. – М. : Металлургия, 1973. – 272 с.

4. Полищук А. П. Исследование и разработка систем автоматического контроля и регулирования процесса обжига железорудных окатышей на конвейерной машине : дис. … канд. техн. наук : 05.13.07 / **Александр Павлович Полищу**к. – Днепропетровск, 1970. – 124 с.

5. Ксендзовский В.Р. Автоматизация процесса производства окатышей / В.Р. Ксендзовский. – М. : Металлургия, 1971. – 216 с.

6. Автоматизация фабрик окускования железных руд и концентратов / **Н.В. Федоровский, В.В. Даньшин, В.И. Губанов, Р.И. Сигуа**. – М. : Металлургия, 1986. – 200 с.

7. Математическое обеспечение АСУ ТП производства железорудных окатышей на конвейерных машинах / **А.П. Буткарев, Г.М. Майзель, Е.В. Некрасова** [и др.] // Сталь. – 1995. – № 4. – С. 67–75.

8. Глинков Г.М. АСУ ТП в черной металлургии : учебник для вузов / **Г.М. Глинков, В.А. Маковский**. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1999. – 310 с.

9. Повышение эффективности АСУ горно-металлургического производства на основе интеллектуализации управления : монография / **Ю.И. Еременко, Л.М. Боева, Л.А. Кузнецов, В.Б. Крахт**. – Старый Оскол : ООО «ТНТ», 2005. – 408 с.

10. Еременко Ю.И. О применении нечеткого логического контроллера в управлении процессом обжига окисленных окатышей / Ю.И. Еременко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 9. – С. 39–43.

11. Рубан С.А. Использование нечетких регуляторов для автоматизации технологического процесса обжига на конвейерных обжиговых машинах / С.А. Рубан, В.И. Лобов // Разработка рудных месторождений. – 2007. – № 91. – С. 188–193.

12. Поркуян О.В. Керування нелінійними динамічними об’єктами збагачувальних виробництв на основі гібридних моделей Гамерштейна : дис. … д-ра техн. наук : 05.13.07 / Ольга Вікторівна Поркуян. – Кривий Ріг, 2009. – 379 с.

13. Рубан С.А. Автоматизація процесу керування термічною обробкою залізорудних обкотишів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / **С. А. Рубан** ; Криворіз. техн. ун-т. - Кривий Ріг, 2011. — 20 с.

Рукопис подано до редакції 04.04.16

УДК 681.513.6:621.69

К.А. ОХОТА, магістрант, Криворізький національний університет

АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОДУКТИВНІСТЮ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ ПОДАЧІ ВОДИ НА ЗБАГАЧУВАЛЬНУ ФАБРИКУ

У статті розглянуто актуальні питання ефективності процесу подачі води на збагачувальну фабрику. Коротко описаний технологічний процес подачі води в трубопровід. Обґрунтовано питання продуктивності адаптивної системи керування насосною станцією подачі води, та вимоги до неї, проведена аналогія між існуючими системами. Розглянуто приклади САР насосних станцій, визначено їх переваги та недоліки, проаналізовано якість та продуктивність автоматизованих систем насосних станцій. Розроблено та проаналізовано систему керування насосною станцією на базі нечіткої логіки, приведено її переваги та недоліки. Описано спосіб керування, виведені формули адаптації.

Таким чином, вказано напрямок подальших досліджень – розвиток автоматичних систем керування продуктивністю насосної станції, вирахувавши об’єм води необхідний кожній секції.

Ключові слова: адаптивний, система керування, продуктивність, надійність, стабілізація

Проблема та її зв’язок з науковими та практичними завданнями. Для ліквідації скидання стічних вод у водойми, а також з метою економії флотаційних реагентів для всіх підприємств проектуються замкнуті системи водопостачання. Пульпа (хвости збагачувальних фабрик, або промислові стічні води) за допомогою насосів по трубопроводах перекачується в хвостосховища, де вся суспензія осідає. Освітлена в ставках-відстійниках вода надходить в насосні станції оборотної води, звідки її подають на збагачувальні фабрики для повторного використання [2].

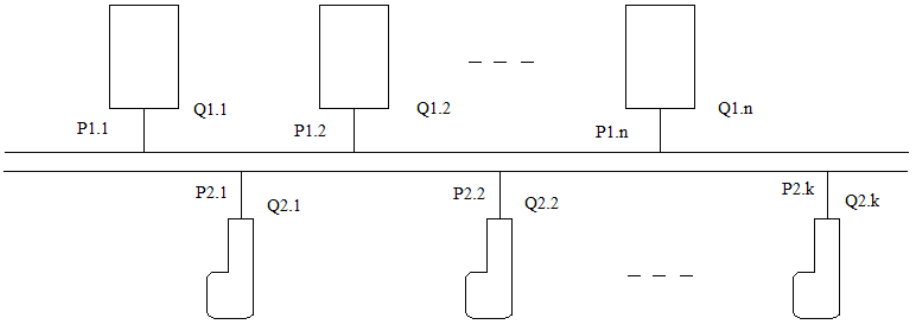

Рис. 1. Схема насосної станції на збагачувальній станції

де Q - витрати води, P - тиск, n - станції, k - насоси.

© Охота К.А., 2016