

## ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ САМООРГАНІЗУЮЧИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ГОЛОВНИХ ВОДОВІДЛИВНИХ УСТАНОВОК ШАХТ

*Розглянуто методи побудови самоорганізуючих, багатоагентних систем управління електроспоживанням головних водовідливних установок шахт, в яких використані інтелектуальні датчики рівня витрат води, стану насосних агрегатів і електроспоживання. Багатоагентна система управління електроспоживання виконана у вигляді прогнозатора притоку води по кожному із горизонтів шахти і витрат електрики, дозволяє за допомогою інтелектуальної системи управління електроспоживанням ефективно керувати локальними системами автоматики насосних агрегатів по критерію мінімізації питомих електровитрат. Розроблено способи підвищення енергоефективності головних водовідливних установок шляхом включення в систему водовідливу додаткових насосів малої потужності з асинхронним частотно-регульованим приводом та пошуковими екстремальними системами керування.*

*Ключові слова: водовідлив, шахта, насос, оптимізація, самоорганізуюча, система, електроспоживання.*

V.P. KHOROLSKYI, M.I. SHPANKO  
National University of Kryvyi Rih, Ukraine

## PRINCIPLES OF CONSTRUCTION MANAGEMENT SYSTEMS SELF-ORGANIZING POWER CONSUMPTION MAJOR MINE DEWATERING PLANTS

*Abstract - The methods of construction of self-organizing, multi management systems power consumption of the main dewatering plants mines in which the intelligent level sensors cost water pump units and state power consumption are used. Multi-control system power consumption estimator is designed as a water intake for each of the horizons of the mine and the costs of electricity allows an intelligent power consumption management system to manage local systems of automation of pumping units on the criterion of minimizing of specific electric charges. The methods of increasing energy efficiency main pumping installations by including additional drainage system pumps with asynchronous low-power variable-speed drive and search engines extreme control systems.*

*Keywords: drainage, mine, pump optimization, self-organizing, system power consumption.*

### Вступ

Основні тенденції розвитку сучасних систем управління енергоспоживанням шахт і їх енергоємних стаціонарних установок – головних водовідливних установок (ГВУ) з інформаційними технологіями в багатьох випадках пов'язані з мінімізацією енергозатрат і є актуальними практично важливими задачами. Завдяки автоматизованому управлінню технологічними процесами водовідливу шахт при змінному притоку води, можливо заощадити від 8-11% питомих затрат електроенергії.

**Аналіз літературних джерел з даної тематики.** Проблеми управління стаціонарними установками шахт до яких відносяться водовідливні установки з точки зору наукових досліджень і практичної діяльності є актуальними тому, що затрати електроенергії на роботу яких складають 20% від електроспоживання шахти. Питанням підвищення ефективності головних водовідливних установок шахт (ГВУ), методами регулювання подачі насосів присвячені роботи В.М. Чермалиха, Д.І. Родькіна, В.В. Каневського [1], В.Г. Гейера, Г.М. Тимошенко [2], В.М. Попова [3] та інших вчених в яких обґрунтовано енергетичну ефективність регулювання подачі насосних агрегатів зміною частоти обертання робочих коліс.

Реалізація енергоефективного керування шахтними водовідливними установками засобами регульованого електроприводу насосних агрегатів знайшла відображення також в наукових працях [4, 5, 6] в яких детально розглянуті завдання управління водовідливними установками шахт по критерію енергозатрат. В той же час відсутні наукові дослідження щодо побудови самоорганізуючих систем управління стаціонарними установками на основі прогнозування притоку води в зумпфи горизонтів шахти як системи з розподіленими параметрами електроспоживання. Такі системи названі багатоагентними і віднесені до самоорганізуючих систем з прогнозуванням витрат електрики по кожному із горизонтів шахти і дозволяють підвищити енергоефективність роботи ГВУ за рахунок впровадження інтелектуальних систем управління.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Інженерний аналіз схем проектування багаторівневого водовідливу шахти «Гвардійська» та шахти ім.Леніна ПАТ «КРИБВАСЗАЛІЗРУДКОМ» показав, що на горизонтах 1350 м встановлено систему насосів ЦНС 300-180 з електроприводом від асинхронних двигунів потужністю 315 кВт,  $n=1480$  об/хв., які працюють на два стави  $\varnothing 273$  мм довжиною  $L = 150\div 160$  м з проектною потужністю  $V_{дрейк} = 2000 \text{ м}^3$  і викачують воду із зумпфа розташованого в нижній частині шахтного ствола.

На горизонті 1200 м ш. ім.Леніна цього підприємства встановлено групу насосів типу ЦНС 300-180 – 4 шт., з електродвигунами 250 кВт  $n=1480$  об/хв, які працюють на 2 стави  $\varnothing 273$  мм,  $L = 150$  м і проектною потужністю  $V_{дрейк} = 2063 \text{ м}^3$ , а на шахті «Гвардійська» на горизонті 1190 м встановлено 4 насоси типу ЦНС 300-480 з електроприводом 500 кВт з  $n= 1480$  об/хв., які працюють на 2 стави  $\varnothing 315$  мм і довжиною  $L=400$  м.

На горизонті 1050 м шахти ім.Леніна розташована група із 4-х насосів ЦНС 300-600 і електродвигунами 800 кВт з  $n = 1480$  об/хв., які працюють на один став  $\varnothing 273$  мм, довжиною  $L = 675$  м.

На горизонті 792 м шахти «Гвардійська» встановлена група насосів з різними потужностями: один ЦНС 300-420, з електроприводом  $P=500$  кВт і  $n = 1480$  об/хв; один ЦНС 300-420, з електроприводом  $P=630$  кВт та  $n = 1480$  об/хв.; два ЦНС 300-480, з електроприводом  $P=630$  кВт та  $n = 1480$  об/хв.

На горизонті 527 м шахти ім.Леніна встановлено 5 насосів типу ЦНС 300-600, з електроприводом  $P=800$  кВт і  $n=1480$  об/хв., які працюють на два стави  $\varnothing 273$  мм і довжиною  $L = 530$  м.

На горизонті 472 м шахти «Гвардійська» встановлено п'ять насосів ЦНС 300-600 з електроприводом  $P=800$  кВт і  $n=1480$  об/хв., які працюють на два стави  $\varnothing 315$  мм, довжиною  $L = 480$  м.

Загальною рисою цих проектних рішень є зміна структури управління насосними агрегатами, висока енергоємність водовідливу кожного із горизонтів (встановлена потужність складає від  $P=945$  кВт до 4000 кВт) і різна довжина ставів, на які працюють насосні агрегати. При проектуванні системи електроспоживання таких стаціонарних установок, на які припадає до 20% загального споживання електрики підприємства, необхідно:

- аналітично описати робочі характеристики насосних агрегатів;
- розробити алгоритми та математичні моделі оцінки енергоефективності роботи головних водовідливних установок;
- зі застосуванням сучасних систем контролю електроспоживання активної, реактивної потужностей системи аудиту витрат електрики і роботи ГВУ необхідно розробити інтелектуальні системи автоматизованого управління ГВУ шахт та електроспоживання (ІСУЕ);
- спроектувати інформаційну систему робастного керування насосними агрегатами, яка підтримує мінімізацію питомих витрат електрики в періоди обмеження потужності енергосистеми.

На рис. 1 для умов ш. «Гвардійська» розроблена структура самоорганізуючої багатоагентної системи управління електроспоживанням головної водовідливної установки, яка має дворівневу багатоагентну архітектуру. В ній на кожному із горизонтів знаходяться інтелектуальні датчики (ІД) і агенти (А). Під інтелектуальним датчиком будемо розуміти нейромережевий елемент, який контролює і у реальному часі оцінює технологічні, електричні, температурні режими роботи насосних агрегатів (НА), асинхронних двигунів ( $АД_1^1$ ), електричні потужності, струму, напругу електричної мережі, витрати, рівні води, її щільність, гідродинамічний опір; оцінює: ККД НА, напір та вакуум насосів, а також виконують розпізнавання аварійних режимів, оцінку стану заливки насосів та положення заслінки на нагнітальному трубопроводі тощо.

Агенти  $A_1^H, A_2^H, A_3^H, A_4^H, A_5^H$ , які встановлені на кожному із П- інтелектуальних датчиків горизонту  $ІД_i^1$ , де  $i=1, 2, \dots, n$  датчиків, які віднесені до горизонту 1., оцінюють зміни рівня води в зумпфах за період  $t_k$  та контролюють параметри водовідливу й режими роботи насосних агрегатів. Агенти  $A_1^E, A_2^E, A_3^E, A_4^E, A_5^E$  контролюють параметри електроспоживання ГВУ по кожному із горизонтів за допомогою датчиків  $ІД_5^1, ІД_4^2, ІД_3^3, ІД_2^4$  тощо.

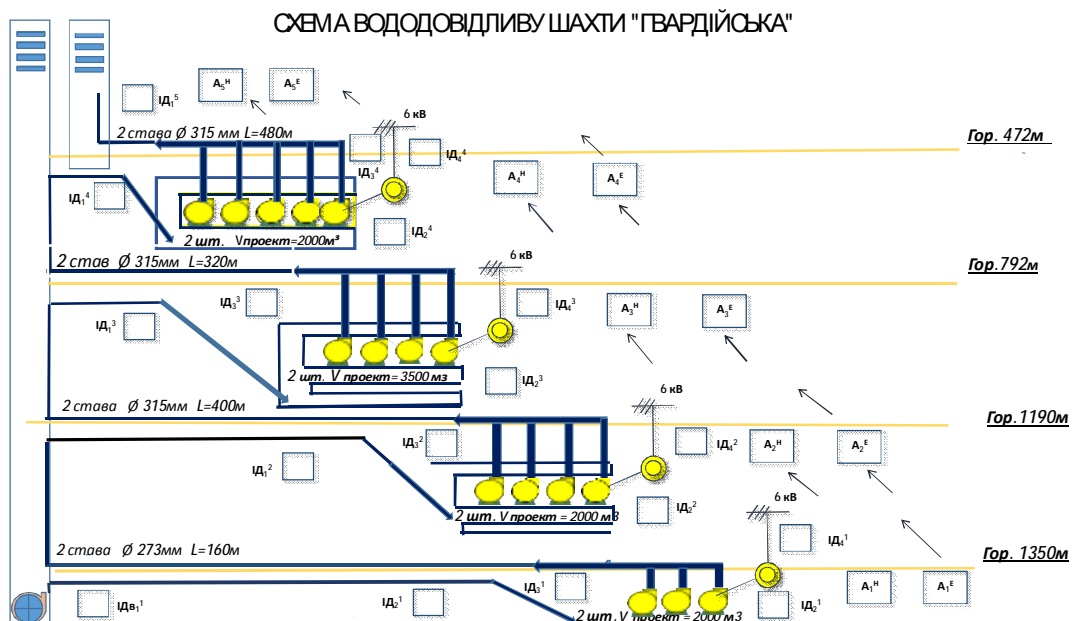


Рис. 1. Самоорганізаційна багатоагентна системи управління електроспоживанням головної водовідливної установки

Основна ідея управління ГВУ шахти є прогнозування витрат (притоку) води на одну годину вперед відповідно затрат електроенергії на її транспортування з горизонту 1350 м на горизонт 1200 м і т.п., оцінки стану виконання цього технологічного процесу за період  $t_k, t_{k-1}, t_{k-2}$ , електроспоживання НА по кожному із

горизонтів з пошуком кращих режимів електроспоживання у реальному масштабі часу. При побудові інтелектуальної системи управління ГВУ нами використані ідеї самоорганізуючої системи прогнозування повеней STAFF (Франція) [7, 8]. У нашому випадку використанні інтелектуальні датчики витрат води (датчики – агенти витрат води), які мають помилки, щодо визначення витрат (рівня) води. Агент, встановлений на датчику оцінює зміни рівня води  $S_i(t)$  ( $i$  – індекс агента  $i$ -го датчика – витрат води), яке вимірюється датчиком. Він відповідає за обчислення ваги  $\omega_i(t_{k-1})$ , з яким величина  $S_i(t_{k-1})$  у момент  $t_{k-1}$  буде врахована у функції прогнозу, який в свою чергу обчислюється агентом верхнього рівня  $A_j$ ,  $j=1, \dots, 4$ , у поточний момент  $t=t_{k-1}$  для прогнозування  $F_j^{progr}(t_k)$  зміни рівня води на годину вперед, тобто на момент часу  $t_k$ :

$$F_j^{progr}(t_k) = \sum_{\forall i: \omega_i > 0} \omega_i(t_{k-1}) S_i(t_{k-1}) \quad (1)$$

У цей же період ІСУЕ водовідливних установок оцінює витрати електрики  $i$  на годину вперед синхронно з прогнозом  $F_j^{progr}$  виконує передбачення на  $t_k$  щодо витрати електроенергії:

$$E_j^{progr}(t_k) = \sum_{\forall i: \omega_i > 0} \omega_i(t_{k-1}) Q_B(t_{k-1}) \quad (2)$$

де  $Q_B$  – витрати води за період  $t_k$  на кожному із горизонтів шахти.

Будемо вважати, що якщо вага, приписана деякому датчику за поточний інтервал часу, має від'ємне значення, та його виміри в цей період помилкові, а тому не буде прийматись до уваги. Сумарний прогноз зміни рівня води за деякий інтервал часу  $[t_a, t_k]$  обчислюється як сума прирощень рівня води на цьому інтервалу.

Самоорганізація на рівня агентів – датчиків полягає в уточненні вагів  $\omega_i(t_k)$  і  $\varepsilon_i(t_k)$ , при чому необхідність такого уточнення детектується за допомогою агентів верхнього рівня ІСУЕ. Ця кооперація має за мету визначити, коли і як потрібно уточнювати вагові коефіцієнти, які присутні у формулах (1), (2). Для цього агент використовує результати власного вимірювання, аналогічно результату інших агентів, а також інформацію про помилки передбачення рівня води по кожному із горизонтів шахти, яку будемо одержувати за допомогою зворотного зв'язку. Момент запуску процесу самоорганізації в межах кожної водовідливної установки системи ІСУЕ визначається наступним чином:

1. Кожний агент  $A_j$  верхнього рівня у момент часу  $t_k$  має можливість оцінювати якість свого попереднього (вимірюваного за годину раніш) прогнозування зміни притоку води і зміни рівня у водозбірниках кожного із горизонтів  $F_j^{progr}(t_k)$ , використовуючи зворотний зв'язок у вигляді реального його значення, зафіксованого інтелектуальним датчиком витрат води (ІДВ) на цей період  $t_k$ . При цьому  $E_j^{progr}(t_k)$  дає змогу оцінити ситуацію з електроспоживанням ГВУ шахти і відповідно продуктивність насосних агрегатів. Якщо реальний приток води по кожному із горизонтів в більше запланованих, то виконується корекція вагових коефіцієнтів  $\omega_i(t_{k-1})$ , а одержане нове значення ваги, дозволяє агенту  $A_j$  обчислити новий прогноз витрат (прирощення) рівня води на момент часу  $t_{k+1}$ .

2. Агент  $A_2$  верхнього рівня, який виконує прогноз на той же момент часу  $t_{k+1}$ , порівнює свій прогноз з тим новим прогнозом, який одержаний агентом  $A_1$  для моменту часу  $t_{k+1}$ . Якщо ця різниця по модулю більше заданого порогу, то агент  $A_2$  запускає механізм самоорганізації на множині свої агентів нижнього рівня. В подальшому ці процеси виконуються в циклі агентами  $A_3$  і  $A_4$  внутрішнім перетворювачами інформації в кожному із ІДВ, встановлених на ГВУ.

На рис. 1 цей процес кооперацій між агентами верхнього рівня вказано стрілками. У підсумку всі агенти метарівня можуть бути задіяні в процесі самоорганізації. Пояснимо тепер сутність процесу самоорганізації, який виконується за допомогою самоорганізуючих багатоагентних систем (БАС) в ІСУЕ головних водовідливних установок на множині своїх агентів нижнього рівня. Нехай  $S_i$  є вимірювання  $i$ -го датчику витрат води,  $\omega_i$  – поточна вага, з якою вимірюване значення подається на вхід датчика ІДВ<sub>в</sub> верхнього рівня управління електроспоживанням ГВУ шахти. Відмітимо, що цей ваговий коефіцієнт не може бути від'ємним, а якщо у процесі обчислення значення  $\omega_i$  стає від'ємним, то інформація обнуляється, тобто він стає рівним нулю (див. формулу (1)). У цьому випадку будемо вважати що відповідні виміри по тій чи іншій причині не зовсім адекватні ситуації. Нехай  $\Delta\omega$  є модуль зміни ваги  $\omega_i$ , який у подальшому може бути використаний на кожному кроці для його модифікації. Можливі зміни ваги  $\omega_i$  по модулю за один крок є постійними для усіх сенсорів, а самі зміни можуть бути позитивними або від'ємними, або ця зміна дорівнює нулю.

Розглянемо деякі ситуації щодо роботи ІСУЕ ГВУ в умовах ПАТ «КРИВБАСЗАЛІЗРУДКОМ», коли необхідно модифікувати вагові коефіцієнти  $\omega_i$   $i$ -го датчика.

Ситуація 1. Якщо значення  $\omega_i$  позитивно, а результат  $S_i(t)$ , одержаний інтелектуальним датчиком витрат води (ІДВ) не відповідає сигналу зворотного зв'язку (маємо від'ємну кореляцію з ним), то тоді  $\Delta\omega$  від'ємне.

У цьому випадку  $\omega_i = \omega_i - \Delta\omega$ . Це має місце, наприклад, тоді коли в процесі вимірювання параметри датчика показують збільшення (зменшення) рівня води, а сигнал зворотного зв'язку свідчить про

його зменшення (збільшення). Як за правило, це характерно буває лише у випадку, коли система працює на початковій стадії. Відмітимо, що саме за рахунок виникнення некоректних ситуацій значення вагового коефіцієнту  $\omega_j$  може стати від'ємним.

Ситуація 2. Якщо результат  $S_i(t)$ , зафіксований датчиком нижнього рівня, позитивно корельований зі сигналом зворотного зв'язку, але передбачення, зроблено відповідним ІДВ верхнього рівня раніш (для моменту часу  $t_k$ ), вміщує помилку (сильно відрізняється від дійсного значення  $F_j^{підв}(t_k)$ , одержаного у відповідності зі зворотним зв'язком), то тоді:

$$\omega_j := \omega_j + \text{sign}[F_j^{підв}(t_k)]\Delta\omega, \quad (3)$$

При цьому вагові коефіцієнти усіх датчиків нижнього рівня змінюються однаково.

Ситуація 3. Якщо результат виміру  $S_i(t)$ , зафіксований датчиком ІДВ нижнього горизонту позитивно корелює із сигналом зворотного зв'язку, але значення  $\omega_j$  в поточний момент від'ємне, то в формулі (3) вибирається позитивне значення  $\Delta\omega$ , тобто  $\omega_j := \omega_j + \Delta\omega$ . Експерименти, проведені на шахті «Гвардійська» ПАТ «КРИВБАСЗАЛІЗРУДКОМ», показали, що модель прогнозування витрат води і електроенергії, може бути використана в системі управління головними водовідливними установками з автоматизованими системами електроприводу насосних агрегатів типу ЦНС-300-600, ЦНС-300-420, ЦНС-300-480. На підставі здійснених досліджень щодо енергоефективності систем управління ГВУ та для оптимізації роботи водовідливної установки (з метою забезпечення енергоефективного режиму роботи та мінімізації енергоспоживання) нами вибрані в якості керуючого впливу зміну обертів робочих коліс багатоступеневого центробіжного насосу при використанні у складі ГВУ одноколісних підкачувальних насосів. Останні обладнані низьковольтними асинхронними частотно-регульованими приводами з застосуванням пошукової екстремальної системи управління частотного обертання приводного двигуна підкачуючого насосу.

Для визначення діапазонів регулювання, необхідних для досягнення мінімуму питомих енерговитрат, нами використані залежності [6]:

$$e^* = \frac{N_M(Q(n, \omega))}{N_M(Q(\omega))} \cdot \frac{N_E(Q(\omega))}{N_E(Q(n, \omega))}, \quad (4)$$

де  $e^*$  - залежність відносної величини питомих витрат електроенергії від відносної частоти обертання насосного агрегату.

Розрахунок економії електроенергії при впровадженні АЧРП підкачувального насосу з основним насосним агрегатом оцінювали за формулою [6]:

$$\Delta e = (1 - e_{\text{МІН}}^*) \cdot 100\%, \quad (5)$$

де  $e_{\text{МІН}}^*$  - відносні значення мінімуму питомих енерговитрат.

Екстремальні залежності питомих витрат від частоти обертання електроприводу підкачувального насосу та витрат води що контролюються датчиками ІД<sub>1</sub><sup>1</sup>, ІД<sub>1</sub><sup>2</sup>, ІД<sub>1</sub><sup>3</sup>, ІД<sub>14</sub>, ІД<sub>1</sub><sup>5</sup> і оцінюються самоорганізуючою системою управління електропостачанням дозволяють визначити робочу точку енергоефективного режиму роботи ГВУ в зоні мінімальних питомих енерговитрат, необхідний діапазон регулювання продуктивності насосних агрегатів та їх режимів роботи у поза піковий період часу включення водовідливної установки. При цьому забезпечується повне або часткове звільнення водозбірника від води до початку періоду максимуму навантаження на енергосистему і створюються умови для споживання електроенергії водовідливом в періоди поза пікових зон навантаження на систему електропостачання.

Результати імітаційного моделювання підтвердили зниження питомих витрат електрики електроприводом насосів ЦНС 300-600 з АЧРП підкачувального насосу на 8-11%.

### Висновки

Розглянутий підхід забезпечує побудову самоорганізуючої системи управління електроспоживанням водовідливних установок шахт в яких за допомогою інтелектуальних датчиків притоку води, системи прогнозування витрат води та електроенергії, насосні агрегати працюють з підкачувальними насосами з екстремальними системами управління перетворювачами частоти та дозволяють одержати зниження на 8-11% питомих витрат електроенергії від проектних.

### Література

1. Чермалых В.М., Системы электропривода и автоматики рудничных стационарных машин и установок/ В.М. Чермалых, Д.И. Родькин, В.В. Каневский //Недра 1976 Москва, 399 с.
2. Гейгер В.Г. Шахтные вентиляторные и водоотливные установки: учебник для вузов / В.Г.Гейгер, Г.М.Тимошенко // - М.:Недра. 1978-270 с.
3. Попов В.М. Рудничные водоотливные установки /В.М. Попов//– 2-е изд. Перераб. и доп. – М.: Недра, 1983 -304с.
4. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием /Г.Г. Соколовский//– М.: «АКАДЕМА», 2006, с.27-32.
5. Христо П.Е. Оптимизация энергопотребления центробежной машиной в нестационарных

---

режимах в ограниченной области изменения переменных // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит., №12 (131).2014. с.2-14.

6. Сташинов Ю.П. Технические и энергетические аспекты применения регулируемого привода на главных водоотливных установках шахт / Ю.П. Сташинов, Д.А. Боченков, В.В. Волков // Горное оборудование и электромеханика, - 2008. -№11.- с. 22-25.

7. George J.-P., Edmonds B., Glizes P. Making Self-Organizing Adaptive Multi-Agent System Work – towards engineering of emergent multi system // Methodologies and Software Engineering for Agent Systems. Chapter 8. Kluwer, 2004. P. 319-338.

8. George J.-P., Glizes M.-P., Glizes P. Real-time Simulation for Flood forecast^ An Adaptive Multi-Agent Systems / University of Wales, Aberystwyth, UK, 2003. P. 7-11.

#### References

1. Chermalykh V.M, electric systems and automation mine stationary machines and plants / V.M.Chermalykh, D.I.Rodkin, V.V.Kanevsky // 1976 Nedra, Moscow, 399 p.

2. Geiger V.G.Shahtnye fan and drainage installation: a textbook for high schools / V.G.Geyger, G.M.Timoshenko // - M.: Nedra. 1978-270 with.

3. Popov V.M. Miner dewatering installation /V.M. Popov // - 2nd ed. Revised. and add. - M. : Nedra, 1983 -304p.

4. Sokolovsky GG AC drives with frequency regulation /G.G. Sokolovsky // - M. : «ACADEMA», 2006, p.27-32.

5. Hristo P.E. Optimization of energy consumption of centrifugal machine in transient conditions in a limited range of variables // Energy saving. Energy. Energy audit., №12 (131) .2014. p.2-14.

6. Stashina Y.P. Technical and energy aspects of the controlled drive on the main mine drainage installations / Y.P. Stashina, D.A. Bochenkov, V.V. Wolves // Mining Machinery and Electrical Engineering, - 2008. -№11.- p. 22-25.

7. George J.-P., Edmonds B., Glizes P. Making Self-Organizing Adaptive Multi-Agent System Work – towards engineering of emergent multi system // Methodologies and Software Engineering for Agent Systems. Chapter 8. Kluwer, 2004. P. 319-338.

8. George J.-P., Glizes M.-P., Glizes P. Real-time Simulation for Flood forecast^ An Adaptive Multi-Agent Systems / University of Wales, Aberystwyth, UK, 2003. P. 7-11.

Рецензія/Peer review : 9.5.2015 р. Надрукована/Printed :15.5.2015 р.

Рецензент: д.т.н. Жуков С.О.