УДК 004.896
DOI https://doi.org/10.32782/IT/2021-1-4

Леонід МЕЩЕРЯКОВ
доктор технічних наук, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005, meshcheriakov.l.i@nmu.one
ORCID: *0000-0002-9579-1970*
Scopus Author ID: *57205282540*

Ірина УДОВИК
кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005, udovik.im@gmail.com
ORCID: *0000-0002-5190-841X*
Scopus Author ID: *55998874400*

Назар САМАРЕЦЬ
студент спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» другого (магістерського) рівня вищої освіти, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005

Бібліографічний опис статті: Мещеряков, Л., Удовик, І., Самарець, Н. (2021). Динамічне програмування оптимальних рішень управління з урахуванням внутрішнього стану агенту мультиагентних систем. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 25–34, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2021-1-4

ДИНАМІЧНЕ ПРОГРАМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ УПРАВЛІННЯ З УРАХУВАННЯМ ВНУТРІШНЬОГО СТАНУ АГЕНТУ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ

Стрімкий розвиток інтелектуальних мультиагентних систем вимагає дослідження та аналітичного обґрунтування існування основних складових цих систем, а саме агентів. При цьому одною з основних базових складових агентів являється їх внутрішній стан, який суттєво впливає на формування способів ухвалення визначених рішень. ***Метою роботи*** *є дослідження можливості формування раціональних рішень в мультиагентних системах на основі визначення внутрішнього стану агентів. Реалізація поставленої мети передбачає застосування аналітичного конструювання, що спирається на динамічне програмування і забезпечує саме оптимальне по точності та енерговитратам відповідно заданого критерію формування управляючих рішень.* ***Методологія*** *забезпечення рішення представленого завдання складається в застосуванні відображення внутрішнього стану агентів в змінних стану, що дозволяє мінімізувати ресурси формування вихідних рішень в мультиагентних системах.* ***Наукова новизна****. Складається в застосуванні аналітичного моделювання в змінних стану, записаних в нормальній формі Коши з використанням принципу динамічного програмування Р. Беллмана до представлення внутрішнього стану агентів в мультіагентних системах, що дозволяє здійснити оптимізацію відповідно заданого критерію по точності та енерговитратам вихідних рішень, які формуються в системах.* ***Висновки****. Застосування рівнянь в змінних стану, записаних в нормальной формі Коши, для представлення внутрішнього стану агентів мультиагентної системи представляє можливість більш ефективно відпрацювати формування оптимальних відповідно заданого критерію по точності та енерговитратам закони рішень, що приймаються.*

Ключові слова: *мультиагентні системи, агенти, динамічне програмування, змінні стану, нормальна форма Коши, оптимізація стану.*

Leonid MESHCHERIAKOV
Doctor of Engineering, Professor of Department of Software Engineering, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, meshcheriakov.l.i@nmu.one
ORCID: *0000-0002-9579-1970*
Scopus Author ID: *57205282540*

Iryna UDOVYK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Software Engineering, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, udovik.im@gmail.com
ORCID: *0000-0002-5190-841X*
Scopus Author ID: *55998874400*

Nazar SAMARETS
student of specialty 121 "Software Engineering" of the second (master's) level of higher education, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005

To cite this article: Mesheryacov, L., Udovyk I., Samarets, N. (2021). Dynamichne prohramuvannia optymalnykh rishen upravlinnia z urakhuvanniam vnutrishnoho stanu ahentu multyahentnykh system [Dynamic programming of optimum decisions of management taking into account the inlying state to the agent of the moultiagentnih systems]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 25–34, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2021-1-4

DYNAMIC PROGRAMMING OF OPTIMUM DECISIONS OF MANAGEMENT TAKING INTO ACCOUNT INLYING STATE TO AGENT OF MOULTIAGENTNIH SYSTEMS

The rapid development of intelligent multi-agent systems requires research and analytical justification of the existence of the main components of these systems, namely agents. In this case, one of the main basic components of agents is their internal state, which significantly affects the formation of ways to make certain decisions. ***The aim*** *of the work is to study the possibility of forming rational solutions in multi-agent systems based on determining the internal state of agents. Realization of the set purpose provides application of the analytical designing which is based on dynamic programming and provides the most optimum on accuracy and power consumption according to the set criterion of formation of control decisions.* ***The methodology*** *of providing the solution of the presented problem consists in application of display of an internal condition of agents in state variables that allows to minimize resources of formation of initial decisions in multiagent systems.* ***Scientific novelty.*** *It consists in the application of analytical modeling in state variables written in the normal Cauchy form using the principle of dynamic programming by R. Bellman to represent the internal state of agents in multiagent systems, which allows to optimize the criterion for accuracy and energy consumption of initial solutions formed in systems.* ***Conclusions.*** *The use of equations in state variables written in the normal Cauchy form to represent the internal state of agents of a multiagent system is an opportunity to more effectively work out the formation of optimal according to the specified criterion for accuracy and energy consumption laws of decisions.*

Key words: *multiagent systems, agents, dynamic programming, state variables, normal Cauchy form, state optimization.*

Актуальність проблеми. В результаті досліджень в напрямах паралельних обчислень, розподілених комп'ютерних систем та мережних технологій сформувався новий перспективний напрям штучного інтелекту у вигляді інтелектуальних мультиагентних систем. Такі технологїї базуються на принципі автономності окремих частин програми, які спільно функціонують в існуючій розподіленій системі, та в якій одночасно функціонують множина_взаємозв'язаних процесів. Ці програми визначаються агентами. Відтак програми агенти класифікуються на основні ознак ступіні розвитку внутрішнього уявлення про зовнішній світ та способі ухвалення рішень. Тобто рішення, що формуються, перед усе базуються на основі внутрішнього стану агента. Відповідно актуальною є проблема формування оптимальних рішень, які цілком залежать від реальності розпізнавання оперативного стану об’єктів-агентів, що перспективно визначати через аналітичне конструювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження існуючих джерел виявив приклади застосування мультиагентних систем для планування роботи різних гнучких виробничих систем [4]. Перевагами таких систем є відповідно: формалізація точок прийняття рішень у вигляді агентів; планувальник, що діє в режимі реального часу; мережа агентів, що зв’язана функціональними відношеннями та самостійно координують свої дії.

До найбільш значимих практичних результатів застосування мультиагентних систем можливо віднести вирішення задач через формування апарату потреб та можливостей (ПМ-мереж). Цей апарат ПМ-мереж, що розроблений В.А. Виттихом, П.О. Скобелевим, Г.А. Ржевським [4], програмно реалізовано у вигляді технології MAGENTA, яка знайшла відповідне використання в прикладних інтелектуальних системах планування для різних технологічних процесів та об’єктів.

Мультиагентний підхід застосовується і в імітаційному моделювання для формалізації поведінки агентів. Існують підходи і моделі мультиагентного планування ще на активних та пасивних перетворювачах (АПП) Б.І. Клебанова та І.М. Москалева [3], а також підходи що реалізовані в AnyLogic та моделюванні процесів перетворення ресурсів (МППР) [4].

Але в визначених існуючих напрямах застосування мультиагентних систем досі не приділялась увага оперативному внутрішньому стану саме агентів, а очевидно, що це один з основних впливових параметрів, які формують доцільність рішень, що приймаються системою.

Метою статті є дослідження можливості формування оптимальних рішень на основі визначення внутрішнього стану агентів в мультіагентних системах через застосування аналітичного конструювання, що спирається на динамічне програмування.

Виклад основного матеріалу. При об’єктивному ускладненні в майбутньому мультиагентних систем, різкому збільшенні їх розмірності, необхідності враховувати змінності параметрів та існуючи нелінійності, виникає необхідність до опису та програмування систем, що розглядаються, в змінних стану. Причому, поняття стану являється первинним, оскільки немає більш простого поняття, при допомозі якого можливо було б визначити, що таке стан динамічного об’єкту, системи або агенту. Тому ідентифікуючи проміжні параметри станом агенту або системи, поняття стану можливо трактувати як деяку мінімальну сукупність параметрів, які містять всю інформацію про передісторію системи, необхідну для судження про її поведінку в майбутньому, при постійній зміні значення довільного вхідного впливу.

Класично агент сприймається як автономний штучний об'єкт, звичайно комп'ютерна програма, що володіє активною мотивованою поведінкою та здібна до взаємодії з іншими об'єктами в динамічних віртуальних середовищах. Кожний агент може приймати повідомлення, інтерпретувати їх зміст і формувати нові повідомлення, які або передаються в загальну базу, або прямують іншим агентам.

В умовах часткової спостережливості необхідно, щоб агент об’єктивно відстежував зміну середовища в якому існує. Це означає, що агент повинен володіти безліччю внутрішніх станів, зміна яких істотно залежить від історії його сприйняття та чутливості. На рис. 1 приведена базова структура агента, діючого з урахуванням внутрішнього стану. Поточне сприйняття комбінується з колишнім внутрішнім станом, в результаті виконуються дії та відбувається зміна внутрішнього стану.

З математичної точки зору, станом системи можуть бути початкові умови в момент t_0 для рішення системи диференційних рівнянь,

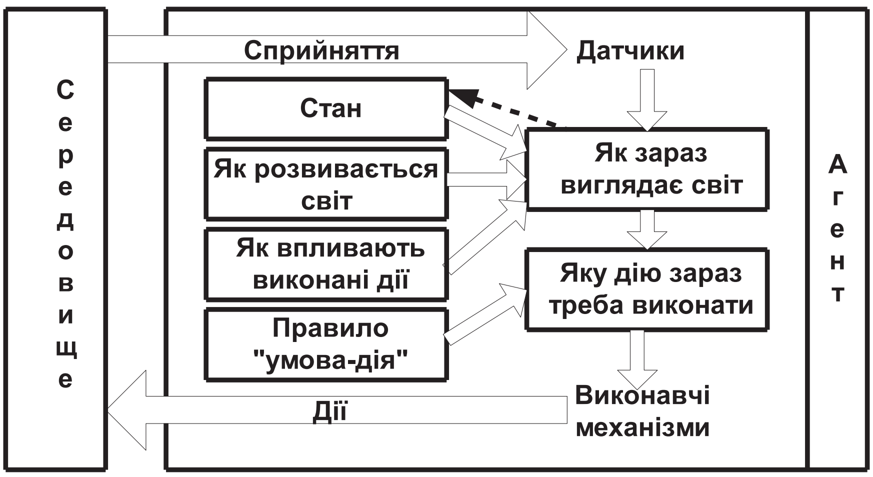

Рис. 1. Структура агента мультиагентної системи, що діє з урахуванням оперативного внутрішнього стану

оскільки різним початковим умовам відповідають різні рішення системи і це можна застосувати при аналітичному конструюванні систем керування технологічної динаміки наприклад барабанного млина з відповідною передавальною функцією.

На основі проведених експериментальних досліджень визначено, що диференціальне рівняння, що відповідає передавальній функції W_3 [2], яка описує електромеханічну динаміку системи барабанного млина типу ММС 90*30А матиме наступний вигляд

$$\begin{aligned}&0.683467\cdot 10^{-44}y_3^{(4)}+0.237994\cdot 10^{-49}y_3^{(3)}+0.153236\cdot 10^{-1}y_3^{(2)}+0.267401\cdot 10^{-40}y_3^{(1)}=\\&=0.281485\cdot 10^{-54}U_3^{(4)}+0.232459\cdot 10^{-47}U_3^{(3)}+0.821168\cdot 10^{-6}U_3^{(2)}+0.635931\cdot 10^{-39}U_3^{(1)}\end{aligned} \tag{1}$$

В загальному представленні рівняння (1) визначатиметься як

$$\alpha_{43}y_3^{(4)}+\alpha_{33}y_3^{(3)}+\alpha_{23}y_3^{(2)}+\alpha_{13}y_3^{(1)}=\beta_{43}U_3^{(4)}+\beta_{33}U_3^{(3)}+\beta_{23}U_3^{(2)}+\beta_{13}U_3^{(1)} \tag{2}$$

де,

$$\begin{aligned}&\alpha_{43}=1.0 && \beta_{43}=0.411849\cdot 10^{-10}\\&\alpha_{33}=0.348216\cdot 10^{-5}, && \beta_{33}=0.340117\cdot 10^{-3}\\&\alpha_{23}=0.224204\cdot 10^{43}, && \beta_{23}=0.0120147\cdot 10^{-37},\\&\alpha_{13}=0.391241\cdot 10^{4}, && \beta_{13}=0.930449\cdot 10^{5},\\&\alpha_{03}=0 && \beta_{03}=0\end{aligned}$$

Представлене нормальною системою рівнянь в змінних стану рівняння (2) отримає наступне відображення [9].

$$\begin{aligned}x_1^{(1)}&=x_2+k_{13}U_3=x_2+0.340117\cdot 10^{-3}U_3\\x_2^{(1)}&=x_3+k_{23}U_3=x_3-0.923272\cdot 10^{32}U_3\\x_3^{(1)}&=x_4+k_{33}U_3=x_4-0.762556\cdot 10^{39}U_3\\x_4^{(1)}&=-\alpha_{13}x_1-\alpha_{23}x_2-\alpha_{33}x_3-\alpha_{43}x_4-k_{43}U_3=\\&=-0.391241\cdot 10^{4}x_2-0.224204\cdot 10^{43}x_3-0.348216\cdot 10^{-5}x_4+0.207001\cdot 10^{75}U_3\\y_3&=x_1+k_{03}U_3=x_1+0.411849\cdot 10^{-10}U_3\end{aligned} \tag{3}$$

Система рівнянь (3) зв'язує керовану змінну y_{ki}, що відображає кружний момент на валу привідного електродвигуна барабанного млина, з управляючими впливами U_{ki} кружних моментів у відповідній ланці. Оскільки відомо, що при способі, що використовується, представлені змінні оперативного стану будуть рівні [6; 9; 10]

$$\begin{aligned}x_1&=y_{ki}-k_{03}U_{ki}\\x_2&=y_{ki}^{(1)}-k_{13}U_{ki}-k_{03}U_{ki}^{(1)}\\x_3&=y_{ki}^{(2)}-k_{23}U_{ki}-k_{13}U_{ki}^{(1)}-k_{03}U_{ki}^{(2)}\\x_4&=y_{ki}^{(3)}-k_{33}U_{ki}-k_{23}U_{ki}^{(1)}-k_{13}U_{ki}^{(2)}-k_{03}U_{ki}^{(3)}\end{aligned} \tag{4}$$

то змінна стану x_1 визначиться як компоненту різниці кружних моментів відповідно виходу і входу системи. Співпадаюче фізичне визначення згідно системи рівнянь (4) отримає і решта змінних стану x_2, x_3, x_4.

Добре відомо, що потужність, яка споживається і в постійній і в динамічній складових повністю визначається кружним моментом на валу привідного електродвигуна y_{ki} [2; 5; 6; 10]. А спектральні складові флуктуацій цієї споживаної потужності пропорційні спектральним складовим флуктуацій кружного моменту [8; 10; 11]. І вхідний керуючий кружний момент також визначається або технічними факторами (сила тертя в опорах, сила удару і т.д.), або технологічними факторами (маса заповнення барабану рудою і т.д.) [10; 11]. Інакше кажучи, тут правомочне здійснити заміну $y_{ki}=y_i$ та $U_{ki}=U_i$.

Виходячи з вище сказаного управляючим впливом в даному розгляді є маслопотік в опори барабанного млина, що відображено через змінну U_3, а керованою змінною y_3, є сума алгебраїчних амплітудних рівнів спектральних складових сигналу споживаної потужності, що характеризують величину тертя в цих підшипникових опорах.

Систему (3) можна описати матричним рівнянням вигляду

$$x^{(1)} = A_3 x + B_3 U_3$$
$$y_3 = C_3 x + D_3 U_3 \quad x(0) = x_0 \tag{5}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\alpha_{43} & -\alpha_{33} & -\alpha_{23} & -\alpha_{13} \end{bmatrix}; \; B_3 = \begin{bmatrix} k_{13} \\ k_{23} \\ k_{33} \\ k_{43} \end{bmatrix}; \; x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix};$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \; D_3 = \begin{bmatrix} k_{03} \end{bmatrix};$$

Тут і далі вважається, що елементи матриць не залежать від часу і є постійними величинами.

Перевіримо об'єкт на керованість і складемо матрицю керованості

$$G = \left[B \vdots \;\; AB \vdots \;\; A^2 B \vdots \;\; A^3 B \right]; \tag{6}$$

$$G_3 = \begin{bmatrix} 0{,}340117 \cdot 10^{-3} \vdots & -0{,}923272 \cdot 10^{32} \vdots & -0{,}762556 \cdot 10^{39} \vdots & 0{,}207001 \cdot 10^{75} \\ -0{,}923272 \cdot 10^{32} \vdots & -0{,}762556 \cdot 10^{39} \vdots & 0{,}207001 \cdot 10^{75} \vdots & -0{,}179681 \cdot 10^{82} \\ -0{,}762556 \cdot 10^{39} \vdots & 0{,}207001 \cdot 10^{75} \vdots & -0{,}179681 \cdot 10^{82} \vdots & 0{,}464102 \cdot 10^{117} \\ 0{,}207001 \cdot 10^{75} \vdots & -0{,}179681 \cdot 10^{82} \vdots & 0{,}464102 \cdot 10^{117} \vdots & -0{,}402852 \cdot 10^{127} \end{bmatrix};$$

Оскільки, $\det G = -0{,}214543 \cdot 10^{299} \neq 0$, тобто матриця несінгулярна, і її $rang = 4$, то об'єктом можна керувати.

З метою перевірки принципової можливості відновлення вектора координат, що не виміряються, по вектору координат що виміряються, і для реалізації пристрою спостерігача у вигляді цифрової моделі барабанного млина на управляючому обчислювальному комплексі, необхідно визначити матрицю відновлюваності у вигляді

$$Q_3 = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ CA^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

Оскільки $\det G = 1$, то $rang = 4 = n$.

Отже, взаємозв'язок між змінними, що виміряються і не виміряються, існує і побудувати програмний спостерігач принципово можливо.

Функціональне призначення одновимірної системи управління, що розробляється, полягає в забезпеченні оперативного контролю і управління технічним станом барабанного млина, здійснюваним по найбільш аварійнонебезпечним елементах агрегату. Тому під контролем технічного стану барабанного млина розуміється, по-перше контроль тертя в опорних вузлах по рівню амплітуд технічних частот з визначенням меж виникнення аварійних затирань, і по-друге контроль ступеня зносу елементів футеровки (ліфтерів) з визначенням передобривних станів останніх.

Задачею управління є забезпечення мінімуму тертя в опорних вузлах в робочих режимах, максимуму маслоподачи при виникненні передаварійного стану по затиранню і зупинку барабанного млина при неможливості виводу його з передаварійного стану величиною управляючого впливу або при виникненні передобривних станів футеровки (поява «роздутих» ліфтерів). Амплітудні рівні значень характерних частот на спрацьовування системи максимальної маслоподачи в опори і системи передаварійної зупинки барабанного млина визначалися раніше в роботах [2; 6; 9; 11].

Таким чином, розробляється система оптимальної стабілізації заданого рівня тертя в опорах, що виступає в якості агента. Стеження за мінімальним рівнем технічних частот, які відображають тертя в підшипниках здійснюється екстремум-детектором з видачею завдання на стабілізацію мінімального рівня, а відповідна оцінка досяжності мети управління визначається узагальненим скалярним критерієм оптимальності, що забезпечує оптимальний по точності та енерговитратам закон управління

$$I_3 = \int_0^{\infty} \left[q_3^{'} \left(y_3 - y_{30} \right)^2 + q_3^{''} \left(U_3 - U_{30} \right)^2 \right] dt; \; q_3^{'} > 0 \,. \tag{8}$$

Оскільки структура і параметри об'єкту контролю і управління барабанного млина визначена раніше [2; 5; 7; 10; 11], то задача синтезу системи зводиться до визначення структури і параметрів управляючого пристрою. При цьому головним є знаходження оптимальних управлінь переводу системи з поточного технічного стану $x(t_0)$ в кінцевий заданий екстремум-детектором стан $x(t_k)$ при мінімальному значенні критерію оптимальності.

При значенні $U_k = U_{30}$ (U_{30} – постійна величина управляючого впливу яка забезпечує необхідний рівень стабілізації вихідної змінної y_{30}) перехідні процеси в системі відсутні та $x_{02} = -k_{13}U_{30}$, $x_{03} = -k_{23}U_{30}$, $x_{04} = -k_{33}U_{30}$.

$$x_{01} = -\frac{\left(\alpha_{33}k_{13} + \alpha_{23}k_{23} + \alpha_{13}k_{33} - k_{43}\right)U_{30}}{\alpha_{43}}$$

$$y_{30} = x_{01} + k_{03}U_{30} = \frac{\left(\alpha_{43}k_{03} - \alpha_{33}k_{13} - \alpha_{23}k_{23} - \alpha_{13}k_{33} + k_{43}\right)U_{30}}{\alpha_{43}} \tag{9}$$

Можливо представити $U_3 = U_{30} + \Delta U_3$. Тоді система (3) запишеться у наступному вигляді:

$$\begin{cases} x_1^{(1)} = x_2 + k_{13}(U_{03} + \Delta U_3) & x_1(0) = x_{10} \\ x_{01}^{(1)} = x_{02} + k_{13}U_{03} & x_{01}(0) = \dfrac{(\alpha_{33}k_{13} + \alpha_{23}k_{23} + \alpha_{13}k_{33} - k_{43})U_{30}}{\alpha_{43}} \end{cases}; \tag{10}$$

$$\begin{cases} x_2^{(1)} = x_3 + k_{23}(U_{03} + \Delta U_3) & x_2(0) = x_{20} \\ x_{02}^{(1)} = x_{03} + k_{23}U_{03} & x_{02}(0) = -k_{13}U_{30} \end{cases}; \tag{11}$$

$$\begin{cases} x_3^{(1)} = x_4 + k_{33}(U_{03} + \Delta U_3) & x_3(0) = x_{30} \\ x_{03}^{(1)} = x_{04} + k_{13}U_{03} & x_{03}(0) = -k_{23}U_{30} \end{cases}; \tag{12}$$

$$\begin{cases} x_4^{(1)} = -\alpha_{43}x_1 - \alpha_{33}x_2 - \alpha_{23}x_3 - \alpha_{13}x_4 + k_{43}(U_{03} + \Delta U_3) & x_4(0) = x_{40} \\ x_{04}^{(1)} = -\alpha_{43}x_{01} - \alpha_{33}x_{02} - \alpha_{23}x_{03} - \alpha_{13}x_{04} + k_{43}U_{03} & x_{04}(0) = -k_{33}U_{30} \end{cases}. \tag{13}$$

При відніманні з перших рівнянь системи (10), (11), (12) і (13) других рівнянь отримуємо

$$\begin{aligned} &\alpha_1^{(1)} = \alpha_2 + k_{13}\Delta U_3, && \alpha_1(0) = x_{10} + k_{03}U_{30}, \\ &\alpha_2^{(1)} = \alpha_3 + k_{23}\Delta U_3 && \\ &\alpha_3^{(1)} = \alpha_4 + k_{33}\Delta U_3, && \alpha_3(0) = x_{30} + k_{23}U_{30}, \\ &\alpha_4^{(1)} = -\alpha_{43}\alpha_1 - \alpha_{33}\alpha_2 - \alpha_{23}\alpha_3 - \alpha_{13}\alpha_4 + k_{43}\Delta U_3, && \alpha_4(0) = x_{40} + k_{33}U_{30}, \end{aligned} \tag{14}$$

де $\alpha_i = x_i - x_{0i}$, $(i = \overline{1,4})$.

Підставивши значення y_3 і y_{30} у функціонал (8) маємо

$$I_3 = \int_0^\infty \left[q_3^{'}\left(\alpha_1 + k_{03}\Delta U_3\right)^2 + q_3^{''}\Delta U_3^{\,2} \right] dt;\ \ q_3^{'} > 0;\ (15)$$

$$I_3 = \int_0^\infty \left[q_3^{'}\alpha_1^2 + 2q_3^{'}\alpha_1 k_{03}\Delta U_3 + q_3^{'}k_{03}^2\Delta U_3^2 + q_3^{''}\Delta U_3^{\,2} \right] dt;\ \ q_3^{''} > 0.$$

Використовуючи метод динамічного програмування можливо представити функціональне рівняння Р. Беллмана у вигляді:

$$\begin{gathered} q_3^{'}\alpha_1^2 + 2q_3^{'}\alpha_1 k_{03}\Delta U_3 + (q_3^{'}k_{03}^2 + q_3^{''})\Delta U_3^2 + (\alpha_2 + k_{13}\Delta U_3)\frac{dS}{d\alpha_1} + \\ +(\alpha_3 + k_{23}\Delta U_3)\frac{dS}{d\alpha_2} + (\alpha_4 + k_{33}\Delta U_3)\frac{dS}{d\alpha_3} + (-\alpha_{43}\alpha_1 - \alpha_{33}\alpha_2 - \alpha_{23}\alpha_3 - \alpha_{13}\alpha_4 + k_{43}\Delta U_3)\frac{dS}{d\alpha_4} = 0; \end{gathered} \tag{16}$$

$$2(q_3^{'}k_{03}^2 + q_3^{''})\Delta U_3 + k_{13}\frac{dS}{d\alpha_1} + k_{23}\frac{dS}{d\alpha_2} + k_{33}\frac{dS}{d\alpha_3} + k_{43}\frac{dS}{d\alpha_4} = 0 \tag{17}$$

З рівняння (17) одержуємо у вигляді

$$\Delta U_3 = \frac{1}{2(q_3^{'}k_{03}^2 + q_3^{''})}\left(k_{13}\frac{dS}{d\alpha_1} + k_{23}\frac{dS}{d\alpha_2} + k_{33}\frac{dS}{d\alpha_3} + k_{43}\frac{dS}{d\alpha_4}\right). \tag{18}$$

Підставляючи (18) в (16) маємо

$$\begin{gathered}
q_3^{'}\alpha_1^2 - \frac{q_3^{'}k_{03}\alpha_1}{(q_3^{'}k_{03}^2 + q_3^{''})}\left(k_{13}\frac{dS}{d\alpha_1} + k_{23}\frac{dS}{d\alpha_2} + k_{33}\frac{dS}{d\alpha_3} + k_{43}\frac{dS}{d\alpha_4}\right) - \\
-\frac{1}{4(q_3^{'}k_{03}^2 + q_3^{''})}\left(k_{13}\frac{dS}{d\alpha_1} + k_{23}\frac{dS}{d\alpha_2} + k_{33}\frac{dS}{d\alpha_3} + k_{43}\frac{dS}{d\alpha_4}\right)^2 + \\
+\left[\alpha_2 - \frac{k_{13}}{2(q_3^{'}k_{03}^2 + q_3^{''})}\left(k_{13}\frac{dS}{d\alpha_1} + k_{23}\frac{dS}{d\alpha_2} + k_{33}\frac{dS}{d\alpha_3} + k_{43}\frac{dS}{d\alpha_4}\right)\right]\frac{dS}{d\alpha_1} + \\
+\left[\alpha_3 - \frac{k_{23}}{2(q_3^{'}k_{03}^2 + q_3^{''})}\left(k_{13}\frac{dS}{d\alpha_1} + k_{23}\frac{dS}{d\alpha_2} + k_{33}\frac{dS}{d\alpha_3} + k_{43}\frac{dS}{d\alpha_4}\right)\right]\frac{dS}{d\alpha_2} + \\
+\left[\alpha_4 - \frac{k_{33}}{2(q_3^{'}k_{03}^2 + q_3^{''})}\left(k_{13}\frac{dS}{d\alpha_1} + k_{23}\frac{dS}{d\alpha_2} + k_{33}\frac{dS}{d\alpha_3} + k_{43}\frac{dS}{d\alpha_4}\right)\right]\frac{dS}{d\alpha_3} + \\
+\left[\left(-\alpha_{43}\alpha_1 - \alpha_{33}\alpha_2 - \alpha_{23}\alpha_3 - \alpha_{13}\alpha_4\right) - \frac{k_{43}}{2(q_3^{'}k_{03}^2 + q_3^{''})}\left(k_{13}\frac{dS}{d\alpha_1} + k_{23}\frac{dS}{d\alpha_2} + k_{33}\frac{dS}{d\alpha_3} + k_{43}\frac{dS}{d\alpha_4}\right)\right]\frac{dS}{d\alpha_4} = 0
\end{gathered} \tag{19}$$

Для визначення рішення по управлінню ΔU_3 необхідно знайти функцію S, яка визначається у вигляді [10; 11]

$$S = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4] \cdot \begin{bmatrix} A_{11} & \frac{A_{12}}{2} & \frac{A_{13}}{2} & \frac{A_{14}}{2} \\ \frac{A_{12}}{2} & A_{22} & \frac{A_{23}}{2} & \frac{A_{24}}{2} \\ \frac{A_{13}}{2} & \frac{A_{23}}{2} & A_{33} & \frac{A_{34}}{2} \\ \frac{A_{14}}{2} & \frac{A_{24}}{2} & \frac{A_{34}}{2} & A_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{bmatrix}. \tag{20}$$

З виразу (20) знаходимо

$$\begin{gathered}
\frac{dS}{d\alpha_1} = 2A_{11}\alpha_1 + A_{12}\alpha_2 + A_{13}\alpha_3 + A_{14}\alpha_4; \quad \frac{dS}{d\alpha_3} = A_{13}\alpha_1 + A_{23}\alpha_2 + 2A_{33}\alpha_3 + A_{34}\alpha_4; \\
\frac{dS}{d\alpha_2} = A_{12}\alpha_1 + 2A_{22}\alpha_2 + A_{23}\alpha_3 + A_{24}\alpha_4; \quad \frac{dS}{d\alpha_4} = A_{14}\alpha_1 + A_{24}\alpha_2 + A_{34}\alpha_3 + 2A_{44}\alpha_4.
\end{gathered} \tag{21}$$

Підставляючи вираз (21) в (18) одержуємо

$$\begin{gathered}
\Delta U_3 = -\frac{1}{2(q_3^{'}k_{03}^2 + q_3^{''})}\Big[k_{13}\left(2A_{11}\alpha_1 + A_{12}\alpha_2 + A_{13}\alpha_3 + A_{14}\alpha_4\right) + \\
+k_{23}\left(A_{12}\alpha_1 + 2A_{22}\alpha_2 + A_{23}\alpha_3 + A_{24}\alpha_4\right) + k_{33}\left(A_{13}\alpha_1 + A_{23}\alpha_2 + 2A_{33}\alpha_3 + A_{34}\alpha_4\right) + \\
+k_{43}\left(A_{14}\alpha_1 + A_{24}\alpha_2 + A_{34}\alpha_3 + 2A_{44}\alpha_4\right)\Big]
\end{gathered} \tag{22}$$

А після підстановки (21) в (19) та згрупувавши члени з α_1, α_2, α_3, α_4, $\alpha_1\alpha_2$, $\alpha_1\alpha_3$, $\alpha_1\alpha_4$, $\alpha_2\alpha_3$, $\alpha_1\alpha_2$, $\alpha_3\alpha_4$ і прирівнявши нулю коефіцієнти при них можна отримати системи нелінійних рівнянь вигляду представленого в джерелах [6; 8; 10; 11].

Для забезпечення позитивної визначеності квадратичної форми S згідно умов Сильвестра вводяться обмеження

$$\varphi_i(A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{14}, A_{22}, A_{23}, A_{24}, A_{33}, A_{34}, A_{44}) > 0 \tag{23}$$

де $\varphi_1 = A_{11} > 0$

$\varphi_2 = 4A_{11}A_{22} - A_{12}^2 > 0$

$\varphi_3 = 8A_{11}A_{22}A_{33} - 2A_{11}A_{23}^2 - 2A_{22}A_{13}^2 - 2A_{33}A_{12}^2 + 2A_{12}A_{13}A_{23} > 0$

$\varphi_4 = 16A_{11}A_{22}A_{33}A_{44} - A_{12}^2A_{34}^2 - A_{13}^2A_{24}^2 - A_{14}^2A_{23}^2 - 4A_{11}A_{22}A_{34}^2 - 4A_{11}A_{33}A_{24}^2 -$
$-4A_{11}A_{44}A_{23}^2 - 4A_{22}A_{33}A_{14}^2 - 4A_{33}A_{44}A_{12}^2 - 4A_{22}A_{44}A_{13}^2 + 4A_{12}A_{13}A_{23}A_{44} + 4A_{12}A_{14}A_{24}A_{33} +$
$+2A_{12}A_{13}A_{24}A_{34} + 2A_{12}A_{14}A_{23}A_{34} + 2A_{13}A_{14}A_{23}A_{24} + 4A_{13}A_{14}A_{22}A_{34} > 0$

Знаходження невідомих коефіцієнтів A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{14}, A_{22}, A_{23}, A_{24}, A_{33}, A_{34}, A_{44} забезпечується визначенням їх значень, що досягають мінімуму штрафної функції

$$\begin{gathered} F_k(A_{ij}) = \sum_{i=1}^{n=10} f_i^2(A_{11},A_{12},A_{13},A_{14},A_{22},A_{23},A_{24},A_{33},A_{34},A_{44}) + \\ +R_k\sum_{i=1}^{n=10}\varphi_i^+(A_{11},A_{12},A_{13},A_{14},A_{22},A_{23},A_{24},A_{33},A_{34},A_{44}) \end{gathered} \tag{24}$$

де R_k – параметр штрафу, а $\varphi_i^+(\cdot) = \begin{cases} \varphi_i(\cdot) & \text{при } \varphi_i^+(\cdot) > 0 \\ 0 & \varphi_i^+(\cdot) \le 0 \end{cases}$

В результаті обчислені значення коефіцієнтів відповідно рівні

$A_{11}^{'} = 0.1278\cdot10^{-56}$, $A_{22}^{'} = -0.2479\cdot10^{-48}$, $A_{33}^{'} = -0.1039\cdot10^{5}$,
$A_{12}^{'} = 0.1757\cdot10^{8}$, $A_{23}^{'} = 0.2302\cdot10^{-68}$, $A_{34}^{'} = -0.1441\cdot10^{16}$,
$A_{13}^{'} = 5.313$, $A_{24}^{'} = -0.7133$, $A_{44}^{'} = 0.4261\cdot10^{-71}$,
$A_{14}^{'} = 0.2524\cdot10^{9}$.

Використовуючи знайдені коефіцієнти у виразі (24) можна отримати

$$\Delta U_3 = -0.2612352\cdot10^{83}\alpha_1 + 0.738262\cdot10^{74}\alpha_2 + 0.1491442\cdot10^{90}\alpha_3 - 0.549421\cdot10^{54}\alpha_4 \tag{25}$$

Прийнявши (25) перетворимо вираз (14)

$$\begin{aligned} \alpha_1^{(1)} &= -0.8885046\cdot10^{79}\alpha_1 - 0.2510978\cdot10^{68}\alpha_2 - 0.5072640\cdot10^{86}\alpha_3 + 0.1868674\cdot10^{51}\alpha_4 \\ \alpha_2^{(1)} &= 0.2411909\cdot10^{115}\alpha_1 + 0.681653\cdot10^{108}\alpha_2 + 0.2754009\cdot10^{122}\alpha_3 + 0.101453\cdot10^{87}\alpha_4 \\ \alpha_3^{(1)} &= 0.1992063\cdot10^{122}\alpha_1 + 0.5629072\cdot10^{113}\alpha_2 + 0.1137306\cdot10^{129}\alpha_3 + 0.4189642\cdot10^{93}\alpha_4 \\ \alpha_4^{(1)} &= 0.5407942\cdot10^{157}\alpha_1 - 0.1528226\cdot10^{149}\alpha_2 - 0.6174591\cdot10^{162}\alpha_3 - 0.2274615\cdot10^{129}\alpha_4 \end{aligned} \tag{26}$$

$$y_3 = 0.1075893\cdot10^{73}\alpha_1 - 0.3040557\cdot10^{64}\alpha_2 - 0.614248\cdot10^{79}\alpha_3 - 0.2262784\cdot10^{44}\alpha_4 \tag{27}$$

Виражаємо змінні стану α_1, α_2, α_3 і α_4 через вихідну величину рішення y_3, для чого тричі диференціюємо рівняння виходу (27) і об'єднуємо отримані рівняння в систему

$$\begin{aligned} y_3 &= 0.1075893\cdot10^{73}\alpha_1 - 0.3040557\cdot10^{64}\alpha_2 - 0.614248\cdot10^{79}\alpha_3 - 0.2262784\cdot10^{44}\alpha_4 \\ y_3^{(1)} &= -0.3115837\cdot10^{165}\alpha_1 - 0.1691507\cdot10^{201}\alpha_2 - 0.6983454\cdot10^{207}\alpha_3 - 0.3792071\cdot10^{241}\alpha_4 \\ y_3^{(2)} &= -0.361358\cdot10^{293}\alpha_1 - 0.1961695\cdot10^{329}\alpha_2 - 0.8099037\cdot10^{335}\alpha_3 - 0.1293854\cdot10^{370}\alpha_4 \\ y_4^{(1)} &= -0.4350463\cdot10^{421}\alpha_1 - 0.2361672\cdot10^{457}\alpha_2 - 0.97506\cdot10^{463}\alpha_3 - 0.3443553\cdot10^{498}\alpha_4 \end{aligned} \tag{28}$$

Рішення системи (28) дозволяє знайти вирази змінних стану в наступному вигляді

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 8.18182\cdot10^{-457}y_3^{(3)} - 1.85455\cdot10^{-328}y_3^{(2)} + 1.0364\cdot10^{-200}y_3^{(1)} - 1.00000\cdot10^{-75}y_3 \\ \alpha_2 &= 4.3181\cdot10^{-457}y_3^{(3)} + 2.0682\cdot10^{-328}y_3^{(2)} + 3.04546\cdot10^{-200}y_3^{(1)} - 1.04546\cdot10^{-108}y_3 \\ \alpha_3 &= 8.8182\cdot10^{-464}y_3^{(3)} - 2.5545\cdot10^{-335}y_3^{(2)} + 0.27636\cdot10^{-206}y_3^{(1)} - 0.98336\cdot10^{-113}y_3 \\ \alpha_4 &= -2.2728\cdot10^{-498}y_3^{(3)} - 6.8182\cdot10^{-370}y_3^{(2)} + 4.5456\cdot10^{-242}y_3^{(1)} - 0.4546\cdot10^{-149}y_3 \end{aligned} \tag{29}$$

Підставивши з виразу (29) значення змінних стану α_1, α_2, α_3, α_4 і ΔU_3 в (25) знаходимо в результаті значення оптимального управління U_3 з урахуванням агентного відображення змінних стану

$$U_3 = -0.26123 \cdot 10^{11} y_3 + 0.1414301 \cdot 10^{-117} y_3^{(1)} + 0.1034979 \cdot 10^{-245}$$
$$y_3^{(2)} - 0.822187 \cdot 10^{-374} y_3^{(3)} - 0.1377004 \cdot 10^{122} U_{30}$$

Висновки. Існуючі структури мультиагентних систем мають обмеження на визначення внутрішнього стану саме агентів, що функціонують в системі. Доцільне застосування рівнянь в змінних стану, записаних в нормальній формі Коші, для представлення внутрішнього стану агентів мультиагентної системи представляє можливість більш ефективно відпрацювати формування оптимальних відповідно заданому критерію по точності та енерговитратам закони рішень, що приймаються.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Аксенов К.А. Теория и практика средств поддержки принятия решений: монография. Germany, Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co.KG, 2011. 341 с.

2. Мещеряков Л.І. Методи і моделі ідентифікації та управління гірничими технологічними комплексами: Монографія. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2009. 263 с.

3. Москалев И.М. Системы анализа и оптимизации процессов преобразования ресурсов : дис. канд. техн. наук. Екатеринбург, 2006. С. 138–150.

4. Скобелев П.О. Мультиагентные технологии для управления ресурсами в реальном времени // Механика, управление и информатика (Таруса, 2-4 марта 2011 г.). Таруса, 2011. URL: http://www.iki.rssi.ru/seminar/2011030204/presentation/20110303_03.pdf (дата обращения 02.06.2013).

5. Мещеряков Л.І. Формування структури підсистеми діагностування гірничих електромеханічних комплексів / Л.І. Мещеряков, С.І. Випанасенко, Н.С. Дрешпак, А.І. Ширін. *Збірник наукових праць НГУ. Дніпро*, 2018. № 53. С. 213–223.

6. Мещеряков Л.І. Розпізнавання технологічних станів барабанних млинів на основі нейронних мереж адаптивного резонансу / Л.І. Мещеряков, О.М. Галушко, О.І. Сироткіна, О.Т. Демидов. *Збірник наукових праць НГУ.* Дніпро, 2019. № 57. С. 129–139.

7. Дудля М.А. Мещеряков Л.І. Діагностика та проектування бурових машин і механізмів. Навчальний посібник. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2004. 267 с.

8. Meshcheriakov, L. (2015). Identification of stabilizing modes for the parameters of drilling tools. / L. Meshcheriakov, L. Tokar, K. Ziborov. Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems, Taylor & Francis Group, London, 2015. 135–142

9. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы / Электронная книга. Москва, 2003. 278 с.

10. Мещеряков Л.И. Исследование воздействия технологических нагрузок на локально устойчивые состояния барабанных мельниц / Л.И. Мещеряков, М.А. Дудля, В.А. Бородай, Д.В. Хархардина. *Збірник наукових праць НГУ.* Днепропетровск, 2011. № 53. С. 28–36.

11. Мещеряков Л.И., Программное обеспечение идентификации состояний барабанных мельниц / Л.И. Мещеряков, Ясир Юзеф Хуссейн Аль Хатиб, А.И. Зубарев. Сб. науч. трудов НГАУ. Днепропетровск, 2010. № 34. Т.1. С. 267–274.

REFERENCES:

1. Acsenov C.A. Teoriya I practice of sredstv poddergci prinyatiya resheniy: monografiya. Germany, Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co.KG, 2011. 341 c.

2. Mesheryacov L.I. Methods and models of authentication and management by the mountain technological complexes: Monograph. The D.: National mountain university, 2009. 263 s.

3. Moscalev I.M. Sistemы analiza I optimizatsii protsessov preobrazovaniya resoursov: dis. cand. tehn. sciences. Ecaterinbourg, 2006. p. 138–150.

4. Scobelev P.O. Moultiagentnые tehnologii for by the oupravleniya resources in realnom vremeni // Mehanica, oupravlenie I informatica (Tarousa, 2-4 marta 2011 g.). Tarousa, 2011. URL: http://www.iki.rssi.ru/seminar/2011030204/presentation/20110303_03.pdf (date obrasheniya 02.06.2013).

5. Mesheryacov L.I. Forming of structure of subsystem of diagnostics of mountain electromechanics complexes / L.I. Mesheryacov, S.I. Vipanasenco, N.S. Dreshpac, A.I. Shirin. Collection of scientific labours NGOu. Dnepr, 2018. № 53. P. 213–223.

6. Mesheryacov L.I. Recognition of technological states of drum mills on the basis of neuron networks of adaptive resonance / L.I. Mesheryacov, O.M. Galoushco, O.I. Sirotcina, O.T. Demidov. Collection of scientific labours NGOu. Dnepr, 2019. № 57. P. 129–139.

7. Doudlya M.A. Diagnostics and planning of boring machines and machineries / M.A Doudlya., L.I. Mesheryacov. Aid train. Dnepropetrovsk: National mountain university, 2004. 267 p.

8. Meshcheriakov, L. (2015). Identification stabilizing modes for parameters drilling tools. / L. Meshcheriakov, L. Tokar, K. Ziborov. Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems, Taylor & Francis Group, London, 2015. 135–142

9. Alecsandrov A.G. Optimalnye I adaptivnye sistemy / The Эlectronnaya book., 2003. 278 s.

10. Mesheryacov L.I. Issledovanie vozdeystviya tehnologichescih nagrouzoc on locally oustoychivые sostoyaniya barabannын melnits / L.I. Mesheryacov, M.A. Doudlya, V.A. Boroday, D.V. Harhardina. *Collection of scientific labours NGOu*, Dnepropetrovsc, 2011. № 53. P. 28–36.

11. Mesheryacov L.I., Programmnoe obespechenie identificatsii sostoyaniy barabannын melnits / L.I. Mesheryacov, Yasir Yozef Housceyn Al Hatib, A.I. Zoubarev. Sb. naouch. troudov NGAOu. Dnepropetrovsk, 2010. № 34. T. 1. S. 267–274.