УДК 621.396.6:622.24.051

МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ЗАДАЧІ КОНТРОЛЮ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ДОЛІТ ПРИ БУРІННІ СВЕРДЛОВИН

© Семенцов Г.Н., Чигур І.І., 1998

Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

Запропоновано математичний опис задачі контролю працездатності шарошкових доліт при бурінні свердловин на нафту і газ. Показано, що в умовах невизначеності контроль працездатності доліт повинен враховувати лінгвістичний опис технологічних ситуацій. Наведені логіко-лінгвістичні моделі у вигляді нечітких правил-продукцій, які доповнюють детермінований математичний опис.

Процес буріння свердловин на нафту і газ є багатозв'язним керованим об'єктом. Входами його служать осьове навантаження P на долото, частота обертання n, витрата Q і якість бурового розчину (керівні впливи) і середовище (порода, що руйнується), а узагальненими виходами є проходка h за рейс долота і вартість метра проходки q.

Останні два показники покладені в основу різних критеріїв оптимальності, з яких найважливішим є критерій вартості метра проходки свердловини q. Завдання керування таким багатозв'язним об'єктом – це мінімізувати q.

На рівні опису керованого об'єкта використано стратифіковане уявлення його за допомогою двох страт [1]. На першій страті керований об'єкт описується як детермінований, на другій – як стохастичний.

На основі прийнятого математичного опису керованого об'єкта синтезована дворівнева система оптимального керування процесом буріння свердловин [4].

На верхньому рівні прийняття рішень, виходячи з детермінованої математичної моделі, визначається оптимальний режим буріння знаходженням мінімуму критерію оптимальності – вартості одного метра проходки свердловини.

Внаслідок цього вищеназваний рівень виробляє керівні впливи, які прогнозуються, – це осьове навантаження на долото P і частота його обертання n.

Завданням нижнього рівня є створення локальних рішень з урахуванням властивостей середовища, що змінюється. Ці рішення є керівним впливом – оптимальний час буріння $t_б$ і зв'язуючий вплив – межею пластів гірських порід.

Завдання мінімізації вартості одного метра проходки q, яке вирішують на нижньому рівні, можна формалізувати так:

$$min\left\{ \left[C_б(t_{сп}+t_б)+d\right]h^{-1} \left| \begin{array}{l} \dfrac{dh}{dt}=v_0\varepsilon^{-1}; \\ \dfrac{d\varepsilon}{dt}=K_\varepsilon; \\ h(0)=0; \\ \varepsilon_0=1 \end{array} \right. \right\}, \qquad (1)$$

де ε – оцінка відносного зношення озброєння долота; $t_{сп}$ – час, що витрачений на допоміжні і спускопідіймальні операції; v_0 – початкова швидкість проходки; K_ε – швидкість відносного зношення озброєння долота; d – вартість долота; $C_б$ – вартість години роботи бурового верстата.

Оскільки впливи, які прогнозуються, і надходять з верхнього рівня, є сталими в часі для кожного рейсу долота, то $K_\varepsilon = const$. Це дає можливість рівняння (1) переписати у такому вигляді:

$$\min_{t_б}\left\{q=\left[C_б(t_{сп}+t_б)+d\right]\left[v_0K_\varepsilon^{-1}\ln(1+K_\varepsilon t_б)\right]^{-1}\right\}, \qquad (2)$$

тобто, основним чинником, що впливає на $t_б$, є швидкість відносного зношення озброєння долота $K_\varepsilon = \dfrac{d\varepsilon}{dt}$. Процес вимірювання K_ε дає випадкову послідовність значень $K_{\varepsilon,n}$.

У [2] задача (2) мінімізації вартості одного метра проходки свердловини розглянута як детермінована, тобто мінімізувалася функція $q(t_б,\overline{K}_\varepsilon)$, де $\overline{K}_\varepsilon = M\{K_\varepsilon\}$, $M\{\}$ – символ математичного сподівання. Можна сподіватися, що при малому розкиді значень K_ε навколо $\overline{K}_\varepsilon$ її розв'язок повинен наближати розв'язок задачі (2).

Але, як показали дослідження, дисперсія значення $K_{\varepsilon,n}$ порівнювана з її математичним сподіванням M. Тому актуальною є постановка і розв'язок альтернативної задачі

$$\min_{t_{\acute{a}}} Mq(t_{\acute{a}},K_\varepsilon) \qquad (3)$$

Тут $q(t_{\acute{a}},K_\varepsilon)$ – функція випадкового аргументу K_ε і часу буріння $t_б$.

Введемо позначення

$$q(t_{\acute{a}})=Mq(t_{\acute{a}},K_\varepsilon)=\int q(t_{\acute{a}},K_\varepsilon)dF(K_\varepsilon),$$

де $F(K_\varepsilon)$ – функція розподілу випадкового значення K_ε.

Припустимо, що протягом одного рейсу долота стохастичний процес, що створює послідовність $K_{\varepsilon,j}$, стаціонарний, тоді для оцінки інтеграла $\int q(t_{\acute{a}},K_\varepsilon)dF(K_\varepsilon)$ можна використати послідовність $K_{\varepsilon,j}$ $(j=1,\ 2,\ \ldots)$, яка отримана в процесі буріння за визначений час.

Для такої оцінки застосовують середнє значення функції $\hat{q}(t_{\acute{a}},K_\varepsilon)$, яке обчислюють для всіх значень $K_{\varepsilon,j}$

$$\hat{q}(t_{\acute{a}})=N^{-1}\sum_{j=1}^{N}q(t_{\acute{a}},K_{\varepsilon,j}).$$

Введемо позначення

$$\ddot{A}_0=\left[C_6(t_{cn}+t_{\acute{a}})+d\right]v_0^{-1}.$$

Тоді

$$Mq(t_{\acute{a}},K_\varepsilon)=\ddot{A}_0N^{-1}\sum_{j=1}^{N}K_{\varepsilon,j}\left[\ln(1+K_{\varepsilon,j}t_{\acute{a}})\right]^{-1}+R_N,$$

де R_N- залишок інтегрування.

Припустимо, що $F_N(K_\varepsilon)$ – емпірична функція розподілу вибірки $K_{\varepsilon,j}$, …, $K_{\varepsilon N}$. Функція $F_N(K_\varepsilon)$ має в кожній точці $K_{\varepsilon,j}$ стрибок, що дорівнює N^{-1}.

Оскільки [3]

$$N^{-1}\sum_{j=1}^{N}q(t_{\acute{a}},K_{\varepsilon,j})=\int_0^1 q(t_{\acute{a}},K_\varepsilon)dF_N(K_\varepsilon), \qquad (4)$$

то залишок інтегрування [3] можна записати так:

$$R_N=\int_{-\infty}^{\infty}q(t_{\acute{a}},K_\varepsilon)d\left[F(K_\varepsilon)-F_N(K_\varepsilon)\right].$$

У формулі (4) $[0,\ 1]$ – це інтервал, за межами якого емпірична функція розподілу дорівнює нулю.

Оскільки функція $q(t_{\acute{a}},K_\varepsilon)$ має похідну по змінній K_ε, то оцінку інтегрування можна визначити [3] так:

$$\left|R_N\right|\le K_NN^{-0.5}\int_a^b\left|q'(t_{\acute{a}},K_\varepsilon)\right|dK_\varepsilon, \qquad (5)$$

де $q(t_{\acute{a}},K_\varepsilon)=dq(t_{\acute{a}},K_\varepsilon)/dK_\varepsilon$, $[a,\ b]$ – інтервал, за межами якого різниця $\left|F(K_\varepsilon)-F_N(K_\varepsilon)\right|$ перетворюється в нуль; KN – критерій Колмогорова.

При фіксованому значенні $t_б$ функція $q(t_{\acute{a}},K_\varepsilon)$ є монотонно зростаючою функцією змінної K_ε. Крім того, $K_\varepsilon\ge 0$, тому $q'(t_{\acute{a}},K_\varepsilon)\ge 0$.

Тоді

$$\int_0^{K_{\varepsilon,\Gamma}}\left|q'(t_{\acute{a}},K_\varepsilon)\right|dK_\varepsilon=\int_0^{K_{\varepsilon,\Gamma}}q'(t_{\acute{a}},K_\varepsilon)dK_\varepsilon=q(t_{\acute{a}},K_{\varepsilon,\Gamma})-q(t_{\acute{a}},0). \qquad (6)$$

З врахуванням формули (2) одержимо

$$q(t_{\acute{a}},K_{\varepsilon,\Gamma})-q(t_{\acute{a}},0)=\ddot{A}_0\left\{K_{\varepsilon,\Gamma}\left[\ln(1+K_{\varepsilon,\Gamma}t_{\acute{a}})\right]^{-1}-t_{\acute{a}}^{-1}\right\},$$

де $K_{\varepsilon,\Gamma}$ – найбільше спостережуване значення K_ε.

Замість точного значення величини (6) можна знайти її асимптотичну оцінку

$$\sup\ddot{A}_0\left\{K_{\varepsilon,\Gamma}\left[\ln(1+K_{\varepsilon,\Gamma}t_{\acute{a}})^{-1}\right]-t_{\acute{a}}^{-1}\right\}=$$
$$=\ddot{A}_0\left(t_{\acute{a}}^{-1}+K_{\varepsilon,\Gamma}-t_{\acute{a}}^{-1}\right)=\ddot{A}_0K_{\varepsilon,\Gamma}.$$

Якщо ввести нормовану оцінку інтегрування $r_N=R_N\ddot{A}_0^{-1}$, то з (5), із врахуванням останнього рівняння, одержимо

$$r_N\le K_NK_{\varepsilon,\Gamma}N^{-0.5}.$$

Це дає можливість розв'язати зворотну задачу, а саме визначити обсяг вибірки, при якому оцінка інтегрування r_N не перевищує заданого значення δ, тобто

$$K_NK_{\varepsilon,\Gamma}N^{-0.5}\le\delta.$$

Звідси

$$N\ge\left(K_NK_{\varepsilon,\Gamma}\delta^{-1}\right)^2. \qquad (7)$$

Задачу визначення оптимальної тривалості буріння $t_{\acute{a}}^*$ сформулюєм як мінімізацію виразу (3), в якому математичне сподівання замінено його оцінкою – середнім значенням

$$\min_{t_{\acute{a}}}N^{-1}\sum_{j=1}^{N}q(K_{\varepsilon,j},t_{\acute{a}})=\min_{t_{\acute{a}}}C_6N^{-1}v_0^{-1}\times$$
$$\times\sum_{j=1}^{N}K_{\varepsilon,j}(t_{\acute{a}}+\tau)\left[\ln(1+K_{\varepsilon,j}t_{\acute{a}})\right]^{-1}. \qquad (8)$$

де $\tau=t_{cn}+dC_6^{-1}$.

Оскільки значення $\hat{q}(t_{\acute{a}},K_\varepsilon)$ і $N^{-1}\sum_{j=1}^{N}K_{\varepsilon,j}(t_{\acute{a}}+\tau)\left[\ln(1+K_{\varepsilon,j}t_{\acute{a}})\right]^{-1}$ відрізняються постійним множником $C_б v_0^{-1}$, то замість (8) розв'язується задача

$$\min_{t_д} N^{-1}\sum_{j=1}^{N} K_{\varepsilon,j}(t_д+\tau)\left[ln(1+K_{\varepsilon,j}t_д)\right]^{-1} \quad (9)$$

за таким алгоритмом:

1) за спостереженими найбільшим значенням $K_{\varepsilon,Г}$ і заданою оцінкою інтегрування δ визначається обсяг вибірки N згідно з формулою (7);

2) визначається послідовність $\{K_{\varepsilon,j}\}$;

3) мінімізацією виразу (9) за змінною $t_д$, визначаємо оптимальний час буріння $t_д^*$.

Цей алгоритм дає можливість розв'язувати задачу управління процесом буріння в умовах існуючої невизначеності визначенням розрахункового часу роботи долота, коли зношення озброєння випереджає зношення його опор.

Розглянемо випадок, коли математична модель процесу буріння свердловини описується системою рівнянь, в якої всі параметри піддаються вимірюванню в масштабі реального часу

$$\begin{aligned} \frac{dh}{dt} &= k_1 P^{\alpha_1} n^{\beta_1}, \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= k_2 P^{\alpha_2} n^{\beta_2}, \\ \frac{dg}{dt} &= k_3 P^{\alpha_3} n^{\beta_3}. \end{aligned} \quad (10)$$

Математична модель (10) описує роботу долота на вибої свердловини в тривимірному просторі станів: h, ε, g для роторного буріння і буріння електробурами. Для турбінного буріння модель (10) потрібно доповнити механічною характеристикою турбобура $n=f(P)$.

З аналізу фізичної сутності технологічного процесу буріння сформульовані початкові

$$h(0)=0,\ g(0)=0,\ \varepsilon(0)=1 \text{ при } t=0 \quad (11)$$

і кінцеві умови

$$\begin{aligned} &h(t_д)\ge 0;\ 1\le \varepsilon(t_д)\le (1+m)^2; \\ &0\le g(t_д)\le 1;\ t=t_д; \\ &g(t_д)=1\xi; \end{aligned} \quad (12)$$

де ξ – коефіцієнт "безпеки", який компенсує деяку невизначеність у визначенні числових значень величин k_3, α_3, β_3; і обмеження на керівні впливи

$$\begin{aligned} &P_{min}\le P\le P_{max};\ n_{min}\le n\le n_{max}, \\ &Q=const;\ v_{сп}\le (v_{сп})_{max};\ M_Д\le (M_Д)_{max}, \end{aligned} \quad (13)$$

де $v_{сп}$ – швидкість спускопідіймальних операцій; $M_Д$ – момент на долоті.

Тут можливі два випадки. Перший випадок: переважаючим є зношення долота за озброєнням. Тоді з перших двох рівнянь математичної моделі (10) з врахуванням того, що в процесі буріння $P=const$, $n=const$, одержимо прогнозне значення проходки на долото

$$h = kP^{\alpha} n^{\beta} ln(1+k_2 P^{\alpha_2} n^{\beta_2} t_д), \quad (14)$$

де $\alpha=\alpha_1-\alpha_2;\ \beta=\beta_1-\beta_2, k=k_1/k_2$.

З другого рівняння системи (10) з врахуванням того, що буріння закінчується, коли $\varepsilon=(1+m)^2$, визначимо тривалість буріння

$$t_{д(озб)} = \frac{(1+m)^2-1}{k_2 P^{\alpha_2} n^{\beta_2}}. \quad (15)$$

Другий випадок: переважаючим є зношення опор долота. У цьому випадку час буріння визначається з третього рівняння математичної моделі (10)

$$t_{д(оп)} = \frac{\xi}{k_3 P^{\alpha_3} n^{\beta_3}}. \quad (16)$$

Розглянуті випадки дають можливість визначити прогнозоване значення часу буріння $t_б$ з врахуванням спрацювання долота. Але, оскільки працездатність шарошкових доліт нестабільна, то розрахунковий час буріння відрізняється від фактичного часу буріння до повного, але безпечного зношення долота. Тому особливо актуальним є завдання автоматичного контролю працездатності доліт у процесі буріння з урахуванням лінгвістичного опису ситуацій, що виникають у процесі буріння.

Порівняльний аналіз критеріїв спрацювання доліт дав змогу встановити переваги та недоліки кожного з них і визначити, що найінформативнішим критерієм спрацювання доліт є співвідношення

$$K_m^* = \frac{M_Д n}{Pv}, \quad (17)$$

або

$$K_m = a\left(\frac{M}{v}\right)\Big|P=const, N=const. \quad (18)$$

Показник K_m^* має стійку лінійну залежність на стадії нормальної експлуатації долота і експоненціальну – на стадії катастрофічного зношення. Ця властивість використана для створення алгоритму контролю спрацювання доліт.

Механічна швидкість проходки v_t обчислюється як відношення проходки до фіксованого приросту часу Δt

$$v_t = \frac{h_{n+1}-h_n}{\Delta t}. \quad (19)$$

Після підстановки (19) в (18) одержимо

$$K_m^* = aM\Delta t(h_{n+1} - h_n)^{-1}. \qquad (20)$$

Момент підйому долота визначається, виходячи із співвідношення

$$K_m^* > (K_m^*)_ç,$$

де $(K_m^*)_ç$ – задане значення.

У зв'язку з тим, що для розрахунку K_m^* використовується інформація про зміну в часі таких випадкових значень як механічна швидкість проходки v_t і момент на роторі M, то дійсне значення показника K_m^* спостерігається на фоні значних завад. Тому безпосереднє використання умови $K_m^* > (K_m^*)_ç$ може призвести до передчасного підйому долота із свердловини.

Для впевненого визначення моменту піднімання долота запропонований алгоритм, побудований з використанням функції G_n. Функція G_n обчислюється за допомогою рекурентного алгоритму кумулятивних сум

$$G_n = \sqrt{1 - n^{-1}}G_{n-1} + \frac{g_n^{(K_m)} - \sigma_v^2}{\sigma_v^2\sqrt{2n}}, \qquad (21)$$

де $g_n^{(K_m)} = \left(\widehat{K}_{m,n}^* - \widehat{K}_m^{*(1)}\right)^2$, $K_m^{*(1)}$ – середнє арифметичне значення $\widetilde{K}_{m,n}^*$ до катастрофічного зношення (наприклад, заклинювання опор).

Значення $K_m^{*(1)}$ і σ_v^2 можна обчислити, використовуючи такі ітеративні процедури:

$$\widehat{K}_{M,K}^{*(1)} = \widehat{K}_{M,K-1}^{*(1)} - \frac{1}{K}\left(\widehat{K}_{M,K-1}^{*(1)} - \widetilde{K}_{M,K}^*\right)\; K = 1,2,3,\ldots \qquad (22)$$

$$\sigma_{v,K}^2 = \sigma_{v,K-1}^2 - \frac{1}{K-1}\left[\sigma_{v,K-1}^2 - \left(\widetilde{K}_{M,K}^* - \widetilde{K}_{M,K}^*\right)^2\right], \qquad (23)$$

$$K = 1,2,3,\ldots$$

Оцінкою моменту катастрофічного зношення долота служить значення $n_0\Delta t$, для якого виконується нерівність $G_n \geq \Delta$, де Δ – порогове значення функції G_n.

У режимі нормальної експлуатації долота функція G_n має математичне сподівання, яке дорівнює нулю. Після переходу долота в режим катастрофічного зношення функція G_n в середньому монотонно збільшується в часі. Коли $G_n \geq \Delta$ фіксується початок катастрофічного зношення долота і подається команда на його піднімання для заміни.

Оскільки випадкові значення G_n до початку катастрофічного зношення долота розподілені нормально з математичним сподіванням 0 і дисперсією 1, то з ймовірністю 0,987 всі значення G_n будуть попадати в інтервал [-2,5; +2,5]. Це означає, що при $\Delta = \pm 2{,}5$ ймовірність правильного рішення про заміну спрацьованого долота дорівнює 0,987.

На основі використання одержаного правила запропонований такий алгоритм виявлення моменту катастрофічного зношення долота:

1. За допомогою методів, викладених вище, визначити послідовність $\left\{\widetilde{K}_{M,n}^*\right\}$.

2. Використовуючи перші n_m значень послідовності $\left\{\widetilde{K}_{M,n_M}^*\right\}$ визначити статистичні оцінки параметрів випадкового значення $K_{M,n}^*$ за формулами (22) і (23).

3. Обчислити з рівняння (22) послідовність $\{G_n\}$.

4. Якщо виконується умова, то зафіксувати момент катастрофічного спрацювання долота, інакше перейти до кроку 3.

5. Зробити скид і перейти до кроку 1.

Розроблені алгоритми контролю спрацювання доліт дають можливість здійснювати технологію буріння свердловин в оптимальному режимі, коли властивості гірських порід практично не змінюються. Але під час буріння долото може перейти межу гірських порід з іншими фізико-механічними властивостями. Тоді при постійних параметрах режиму буріння змінюються значення механічної швидкості буріння v_t і моменту на роторі M залежно від того, в які породи перейшло долото. Ця нечітка ситуація повинна бути ідентифікована і використана для контролю спрацювання доліт за допомогою логічних правил-продукцій у вигляді

Р=ЯКЩО $A_1,\ldots, A_K$ ТО $B_1,\ldots, B_M$ ІНАКШЕ С, (24)

де A_K – перелік умов, B_M; С – перелік дій.

Здійснена постановка задачі, прийняття ефективних рішень в умовах невизначеності. У результаті отриманий формалізм представлення логіко-лінгвістичної моделі у вигляді

Р=ЯКЩО А=К, ТО В=М, (25)

де А і В – лінгвістичні змінні; К і М – відповідні їм терми.

Складемо набір логічних правил-продукцій для визначення зношення озброєння долота, зношення опор долота, межі пластів і зон з аномальними пластовими тисками (АПТ) в процесі буріння. Для контролю працездатності долота доцільно також використати GZ-алгоритм кумулятивних сум, який дає змогу в умовах перешкод прийняти рішення про перехід долотом меж пластів гірських порід [5].

Позначення: В – велике, П – постійне, М – мале, v – швидкість буріння, $M_д$ – момент на долоті, GZ – GZ-алгоритм визначення меж пластів гірських порід.

P_1=ЯКЩО v є В І $M_д$ є В І GZ є М ТО "зношення опор долота і перехід у пласт з меншою твердістю порід";

P_2=ЯКЩО v є В І $M_д$ є П І GZ є М ТО "зношення опор долота і перехід у пласт з меншою твердістю порід";

P_3=ЯКЩО v є В І $M_д$ є М І GZ є М ТО "перехід у пласт з меншою твердістю порід, зона АПТ";

P_4=ЯКЩО v є П І $M_д$ є В І GZ є В ТО "перехід у пласт з більшою твердістю порід";

P_5=ЯКЩО v є П І $M_д$ є В І GZ є П ТО "зношення опор долота";

P_6=ЯКЩО v є П І $M_д$ є В І GZ є М ТО "зношення опор долота, перехід у пласт з меншою твердістю порід";

P_7=ЯКЩО v є П І $M_д$ є М І GZ є М ТО "перехід у пласт з меншою твердістю порід";

P_8=ЯКЩО v є М І $M_д$ є В І GZ є В ТО "перехід у пласт з більшою твердістю порід";

P_9=ЯКЩО v є М І $M_д$ є В І GZ є П ТО "зношення озброєння і опор долота";

P_{10}=ЯКЩО v є М І $M_д$ є В І GZ є М ТО "зношення озброєння і опор долота, перехід у пласт з меншою твердістю порід";

P_{11}=ЯКЩО v є М І $M_д$ є П І GZ є В ТО "зношення озброєння долота, перехід у пласт з більшою твердістю порід";

P_{12}=ЯКЩО v є М І $M_д$ є П І GZ є П ТО "зношення озброєння долота";

P_{13}=ЯКЩО v є М І $M_д$ є П І GZ є М ТО "зношення озброєння долота, перехід у пласт з меншою твердістю порід";

P_{14}=ЯКЩО v є М І $M_д$ є М І GZ є П ТО "зношення озброєння долота";

P_{15}=ЯКЩО v є М І $M_д$ є М І GZ є М ТО "зношення озброєння долота, перехід у пласт з меншою твердістю порід".

Необхідно зауважити, що правила-продукції P_1, P_2, P_6, P_{10}, P_{11}, P_{13}, P_{15} не дають однозначної відповіді на питання про зношення озброєння і опор долота в процесі буріння у зв'язку з порушенням стаціонарності режиму буріння, спричиненого зміною пластів гірських порід. Висновок про працездатність долота можна зробити після переходу долотом меж пластів гірських порід і відновленням стаціонарності режиму буріння.

Подальше удосконалення логічних правил-продукцій за рахунок нових правил зумовлює підвищення якості контролю спрацювання доліт в умовах невизначеності.

Запропонований у даній статті математичний опис задачі контролю спрацювання доліт дає можливість розробити алгоритм розв'язку задач на комп'ютері в масштабі реального часу і забезпечити виконання мети керування – бурити свердловину з мінімальною вартістю метра проходки.

Розроблені теоретичні методи і підходи можна застосувати для теоретичного обгрунтування і вдосконалення методів контролю спрацювання доліт інших типів: алмазних, ИСМ, лопатевих і різних породоруйнівних інструментів.

1. Семенцов Г.Н., Горбийчук М.И., Тельышева Т.О. Определение момента подъема долота в условиях неопределенности // Изв. вузов. Горный журн. 1995. № 8. С.102-104. 2. Семенцов Г.Н., Горбийчук М.И., Тельышева Т.О. Оперативное оптимальное управление процессом углубления скважин // Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности. 1981. № 7. С.20-22. 3. Афиори А., Эйзен С. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ / Пер. с англ. М., 1982. 4. Семенцов Г.Н. Адаптивное управление процессом бурения нефтяных и газовых скважин // Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений. Львов, Вып.28. 1992. 5. Горбійчук М.І., Когуч Я.Р. Рекурентні алгоритми кумулятивних сум для визначення розладок в адаптивних автоматичних системах // Тез. наук.-техн. конф. 3-я Українська конференція з автоматичного керування "Автоматика-96". Севастополь, 1996. Т.2. С.162-163.