

ВИЯВЛЕННЯ ВИПАДКОВОГО МОМЕНТУ ЧАСУ ПОЯВИ ПОМПАЖУ В ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОМУ АГРЕГАТІ ДОТИСКУВАЛЬНОЇ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ ПІДЗЕМНОГО СХОВИЩА ГАЗУ «ОПАРИ»

М.О. Петеш

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (03422) 46067;
e-mail: kafatp@ukr.net

Сформульовано постановку задачі для виявлення випадкового моменту появи помпажу в газоперекачувальному агрегаті, коли розподіл моменту розладження априорі невідомо, що дало змогу вибрати ефективний алгоритм для виявлення початку помпажу, дослідити його чутливість і завадостійкість інформаційно-вимірювального каналу.

Сформулирована постановка задачи для выявления случайного момента появления помпажа в газоперекачивающем агрегате, когда распределение момента разладки априори неизвестно, что позволило выбрать эффективный алгоритм для выявления начала помпажа, исследовать его чувствительность и помехоустойчивость информационно-измерительного канала.

Formulated a task is put for the exposure of casual moment of appearance of pompage in a gas-pumping aggregate, when distributing of moment of discord a priori is unknown, that allowed to choose an effective algorithm pompage began for an exposure, to probe his sensitiveness and antijammingness informatively-instrumentation channel.

Розроблення алгоритмів, призначених для швидкого виявлення передпомпажних явищ в газоперекачувальному агрегаті дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу (ГПА ДКС ПСГ), є актуальним науково-практичним завданням, що пов'язано з необхідністю забезпечення надійного захисту компресорів від помпажу та інтенсивним впровадженням в газотранспортній системі систем автоматичного керування ГПА [1, 2].

Проте аналіз літературних джерел (наприклад, [2÷5] та ін.) свідчить про недостатній об'єм проведених досліджень в контексті використання швидкодіючих алгоритмів для виявлення передпомпажних явищ в компресорах ДКС ПСГ. У літературі [3] розглядається постановка задачі виявлення розладження властивостей випадкових послідовностей, коли необхідно виявити розладження якомога швидше після його появи при заданому рівні хибних тривог, але не вимагається визначати час появи розладження, у такому вигляді: нехай дана послідовність одномірних або багатомірних незалежних випадкових величин x_1, x_2, \dots, x_t , де t означає поточний час. Функція розподілу $F(x)$ цих випадкових величин має такий вигляд

$$F(x) = \begin{cases} F_1(x), & 1 \leq t \leq t_0 - 1 \\ F_2(x), & t_0 \leq t, \end{cases} \quad (1)$$

де t_0 – момент зміни властивостей (розладження) випадкової послідовності;

$$F_1(x) \neq F_2(x).$$

Відомі варіанти постановки задач і критеріїв оптимальності визначаються здебільшого припущеннями про ймовірнісні властивості дискретної випадкової величини t_0 та функцій розподілу $F_1(x)$ і $F_2(x)$.

Розглядаються два варіанти задачі: априорний розподіл моменту розладження відомий і априорний розподіл моменту розладження невідомий.

Для першого варіанту задачі використовуються варіаційна постановка задачі швидкого виявлення, Байєсовська постановка задачі та ін.

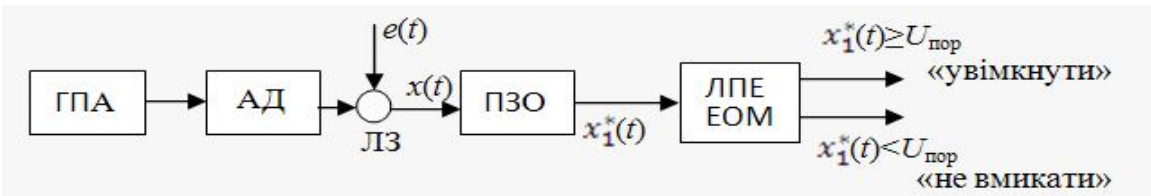
Для другого варіанту задачі, коли розподіл моменту розладження t_0 априорі невідомий, як це має місце стосовно явища помпажу, запропонована наступна постановка задачі:

моменту розладження передуює нескінченно тривале спостереження, під час якого встановлюється стаціонарний режим, який може перериватися хибними тривогами. Спостереження доступний процес, який описується стохастичним рівнянням

$$\begin{aligned} d\eta &= \chi(t-t_0)dt + dw, & (2) \\ E(\Delta w) &= 0; \\ E(\Delta w^2) &= \sigma^2 \Delta t, \\ w(0) &= 0, \\ \chi(x) &= \begin{cases} \tau, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \end{aligned}$$

де: $w(t)$ – стандартний вінерівський процес, $E(\bullet)$ – умовне математичне сподівання, σ, r – задані константи.

Треба знайти таке правило, щоб для заданого середнього часу між хибними тривогами T , тобто при $\chi(t) = 0$, середній час запізнення τ був мінімальним. У роботі [3] подається розв'язання задачі побудови оптимального алгоритму для випадку неперервного часу і моделі розладження (2). Алгоритм мінімізує середнє запізнення $\tau(T)$ при заданому середньому часі T між хибними тривогами. Він вільний від розподілу моменту розладження t_0 . У цьому випадку в



ГПА – газоперекачувальний агрегат, АД – акустичний давач, ЛЗ – оптоволоконна лінія зв’язку, ПЗО – пристрій зв’язку з об’єктом, ЛПЕ – логічний пороговий елемент, $e(t)$ – завади, $U_{пор}$ – порогове значення сигналу

Рисунок 1 – Функціональна схема інформаційно-вимірювального каналу

моделі розладження (2) $r = \sqrt{2}$ і $\sigma = 1$, а сам алгоритм базується на спостереженні випадкового процесу. Недоліками цього алгоритму є неперервний час і наявність розподілу моменту розладження t_0 .

Більш досконалішими є алгоритми кумулятивних сум, які вперше запропонував Page E.S. у 1954 р. [3]. Для алгоритмів такого класу не потрібна інформація, навіть про те, що t_0 – випадкова величина. Оскільки в реальних задачах визначити апріорний розподіл моменту t_0 неможливо, або його не існує, то для виявлення явища помпажу доцільним є використання саме алгоритмів кумулятивних сум [5, 6].

Відомі також деякі алгоритми, які не мають оптимальних властивостей, але широко використовуються: правило Неймана-Пірсона, інтегральні рівняння Фредгольма, методи теорії поновлення і послідовного аналізу, сплеск-перетворення [4], показник хаотичності Херста [7] та ін. Проте, більшість з цих алгоритмів є досить складними для реалізації на ЕОМ і мають велике середнє запізнення, що неприпустимо для завдання захисту компресорів ДКС ПСГ від помпажу.

Отже, метою даної роботи є оцінка чутливості алгоритму кумулятивних сум і виявлення кількості дискретних відліків контрольованого сигналу, яка необхідна і достатня для виявлення передпомпажних явищ в компресорах ДКС ПСГ.

З метою раннього виявлення в реальному часі змін властивостей контрольованого об’єкта (розладнань) за допомогою алгоритму кумулятивних сум розглянемо у загальному вигляді схему прийому і розшифровки акустичних сигналів, що передаються в системі автоматичного контролю помпажу в газоперекачувальному агрегаті ДКС ПСГ. Для цього припустимо, що система автоматичного контролю дає змогу передавати лише дві команди – «увімкнути» і «не вмикати». Приймач такої системи можна представити таким, що складається з двох елементів – пристрою зв’язку з об’єктом і лінійного порогового елемента (ЕОМ) (рис. 1).

За допомогою пристрою зв’язку з об’єктом здійснюється підсилення сигналу $x(t)$, його перетворення з аналогової форми в цифрову форму $x_1^*(t)$, в якій ця інформація вводиться та виводиться з ЕОМ. Якщо, наприклад, сигнал $x_1^*(t)$ перевищує деяке порогове значення $U_{пор}$, то з виходу логічного елемента ЛПЕ видається

команда «увімкнути», якщо ж $x_1^*(t) < U_{пор}$, то видається команда «не вмикати».

Будемо вважати, що приймач системи автоматичного контролю містить безінерційний електронні елементи, тобто в роботі релейного елемента відсутні запізнення і викривлення в лінійному підсилювачі. Крім того, припустимо, що команда «увімкнути» передається прямокутним імпульсом позитивної полярності, а команда «не вмикати» – імпульсом з нульовим рівнем амплітуди. За відсутності імпульсу, що відповідає команді «не вмикати», на вхід приймача будуть впливати лише завади $e(t)$. Останні підсилюються і поступають на вхід релейного елемента. Якщо при цьому у будь-який момент часу рівень сигналу досягає або перевищує порогове значення, то релейний елемент спрацює і видасть хибну команду «увімкнути». Завадостійкість такої системи залежить від порогового рівня логічного елемента і співвідношення між рівнем корисного рівня і рівнем завад.

Якщо рівень завад U_3 має постійне середнє значення, то ймовірність появи хибних команд P_x буде тим меншою, чим більше пороговий рівень $U_{пор}$ логічного елемента. Водночас, чим більше $U_{пор}$, тим більше ймовірність відмови в прийманні або ймовірність придушення команди «увімкнути».

Враховуючи те, що завади в каналі зв’язку підпорядковуються закону нормального розподілу, визначимо залежність показників завадостійкості від співвідношення рівнів сигналу і завад.

За таких умов ймовірність створення хибної команди буде дорівнювати ймовірності такої події, що напруга завади за відсутності командного імпульсу перевищить значення $U_{пор}$. Ця ймовірність дорівнює [8]:

$$P_x = P(U_3 \geq U_{пор}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{U_{пор}}^{\infty} e^{-\frac{(U_3 - a)^2}{2\sigma^2}} dU_3, \quad (3)$$

де: σ – середньоквадратичне відхилення завад;
 a – середній рівень завад.

Якщо середній рівень завад дорівнює нулю, тобто $a = \overline{U_3} = 0$, тоді середньоквадратичне відхилення буде відповідати їх ефективному значенню, тобто $\sigma = U_{з.еф.}$. За таких умов після заміни в рівнянні (3)

Таблиця 1 – Значення інтегралу (5) для різних значень β

β	1	1,5	2	2,5	2,718	3	3,5	4	4,417	5,327
$V(\beta)$	0,32	0,133	0,0455	0,0124	0,00755	0,0027	0,000471	0,000061	0,00001	10^{-7}

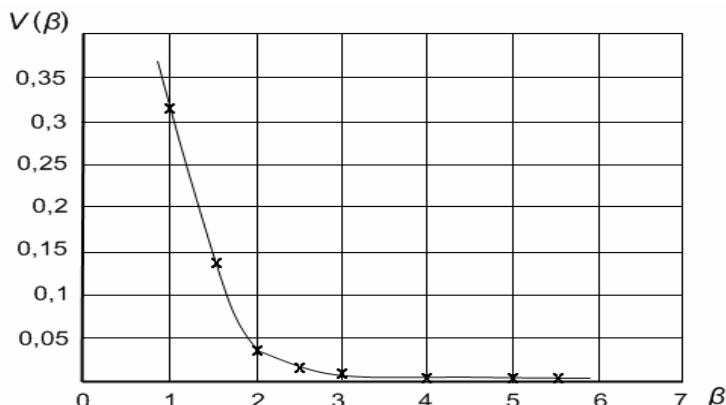


Рисунок 2 – Графік залежності інтегралу ймовірності хибних команд від $\beta = \frac{U_{пор}}{U_{з.еф}} = \frac{U_{пор}}{\sigma}$

$$\frac{U_d}{\sigma} = \frac{U_3}{U_{з.еф}} = z;$$

$$\frac{U_{пор}}{U_{з.еф}} = \beta;$$

$$dU_3 = \sigma dz,$$

отримаємо

$$P_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\beta}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz = V\left(\frac{U_{пор}}{U_{з.еф}}\right) = V(\beta), \quad (4)$$

або

$$P_x = 0,4 \int_{\beta}^{\infty} e^{-0,5z^2} dz = V(\beta). \quad (5)$$

Значення інтегралу ймовірності (5) для різних значень $\beta = \left(\frac{U_{пор}}{U_{з.еф}}\right)$ подано в табл.1.

На рис. 2 зображено графік залежності $V(\beta)$.

Таблиця 1 і графік, зображений на рис. 2, дають змогу за відомим співвідношенням

$$\beta = \frac{U_{пор}}{\sigma} = \frac{U_{пор}}{U_{з.еф}}$$

визначити ймовірність появи хибної команди.

Наприклад, якщо $\beta=3$, то на кожну 1000 команд «не вмикати» буде 2,7 хибних команд «увімкнути», якщо $\beta=1,5$, то кількість хибних команд збільшується до 133.

Отже, для системи захисту ГПА від помпажу значення β має бути $\beta \geq 2,0$.

Тепер визначимо ймовірність придушення команди «увімкнути». Враховуючи те, що придушення команди «увімкнути» відбувається, коли сумарна напруга сигналу і завади буде менше $U_{пор}$. логічного елемента, ймовірність такої події дорівнює [8]:

$$P_x = 0,4 \int_{\frac{U_m - U_{пор}}{U_{з.еф}}}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz = V\left(\frac{U_m}{U_{з.еф}} - \beta\right), \quad (6)$$

де U_m – амплітудне значення імпульсу корисного сигналу.

З рівняння (6) видно, що ймовірність придушення команд P_n залежить від співвідношення

сигналу і завади $\frac{U_m}{U_{з.еф}}$ і коефіцієнта β ,

який визначає ймовірність наявних хибних команд. При цьому ймовірність придушення команд P_n збільшується із збільшенням ймовірності появи хибних команд P_x , оскільки β збільшується. Отже, покращення одного показника заводостійкості призводить до погіршення іншого. Це протиріччя для каналу контролю за появою помпажних явищ в ГПА можна усунути таким чином.

Ефективне значення завади у смузі пропускання фільтру запишемо так:

$$U_{з.еф} = \sigma_0 \sqrt{\Delta f}, \quad (7)$$

де σ_0 – питома напруга завади, яка дорівнює

$$\sigma_0 = \frac{U_{з.еф}}{\sqrt{\Delta f}}.$$

Оскільки передавання сигналів здійснюється прямокутними імпульсами амплітудою U_m і тривалістю $T=t_0$, то оптимальна смуга пропускання вхідного фільтру, яка забезпечує повновлення імпульсу, дорівнюватиме

$$\Delta f = \frac{0,7 + 0,8}{T}. \quad (8)$$

Використовуючи співвідношення (7) і (8), знайдемо відношення рівня сигналу до рівня завад

$$\frac{U_m}{U_{з.еф}} = \frac{U_m}{\sigma_0 \Delta f^{1/2}} = \frac{1,19 U_m T^{1/2}}{\sigma_0} \quad (9)$$

Отже, при $U_m = \text{const}$, яке визначається максимальною напругою генератора тактових прямокутних імпульсів, і $\sigma_0 = \text{const}$ (для даного вимірювального каналу), збільшення відношення

$\frac{U_m}{U_{з.еф}}$ можна досягти за рахунок використання тактових імпульсів більшої тривалості T .

Зважаючи на це, обчислюють значення

$\frac{U_m}{U_{з.еф}}$ задаються значенням $\beta = \frac{U_{пор}}{U_{з.еф}}$ і, користуючись рівняннями (5) і (6), знаходять показники завадостійкості системи контролю.

При цьому слід врахувати, що ймовірність придушення команд повинна бути мінімальною.

Цьому сприяє також правильний вибір порогового значення спрацювання алгоритму кумулятивних сум, оскільки ця величина впливає на чутливість алгоритму.

Спостерігаючи за значеннями сигналу L від акустичного давача $\{L_n\}$, $n = 1, 2, 3, \dots$, треба прийняти рішення про початок помпажу, скориставшись рекурентним алгоритмом кумулятивних сум [5, 6]

$$A_n = A_{n-1} \sqrt{1 - n^{-1}} + \frac{l_n - \sigma_{L_i}^2}{\sigma_{L_i}^2 \sqrt{2n}}, \quad (10)$$

де: $l_n = (L_i - \bar{L})^2$;

$\bar{L} = n^{-1} \sum_{i=1}^n L_i$ – оцінка математичного сподівання випадкової величини L_i ;

$\sigma_{L_i}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2$ – дисперсія;

n – число значень L_i , що спостерігаються.

Функція A_n (10) має таку властивість, що до моменту появи помпажу її математичне сподівання приблизно дорівнюватиме нулю, а після початку явища помпажу швидко зростає в часі, випереджуючи за швидкістю сам процес помпажу. Для виявлення явища помпажу треба порівнювати на кожному кроці обчислень величини A_n із заданим порогом A_3 . Коли величина A_n стане більшою, ніж поріг, тобто $A_n \geq A_3$, фіксується початок явища помпажу з певною ймовірністю, яка залежить від вибраного порогового значення A_3 .

Для визначення чутливості алгоритму кумулятивних сум (10) скористаємося методикою, викладеною у [9], і встановимо зв'язок кількості n дискретних значень акустичного сигналу L з пороговим значенням сигналу β , для якого справедлива нерівність

$$|A_n| \geq \beta \quad (11)$$

Отже, перепишемо вираз (10) у такому вигляді

$$\left| \frac{l_n - \sigma_{L_i}^2}{\sigma_{L_i}^2 (2n)^{1/2}} \right| \geq |A_n| - |A_{n-1}| (1 - n^{-1})^{1/2} \quad (12)$$

Нерівність (12) підсилиться, якщо замість A_n та A_{n-1} підставити конкретні числові значення. Враховуючи, що для захисту компресора ГПА ДКС ПСГ алгоритм кумулятивних сум повинен бути швидкодіючим, вибрали $\beta = 2,0$. Якщо підставити в нерівність (12) $A_n > 2,0$, а $A_{n-1} < 2,0$, тоді можна записати

$$\left| \frac{l_n - \sigma_{L_i}^2}{\sigma_{L_i}^2 (2n)^{1/2}} \right| \geq 2,0 \left| 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{n}} \right| \quad (13)$$

Виконання нерівності (13) є необхідною умовою виконання нерівності (12). Тобто, якщо виконується нерівність (13), тоді нерівність (12) може виконатися, але якщо нерівність (13) не виконується, тоді нерівність (12) вже не буде виконуватися. Із нерівності (13) маємо

$$\left| \frac{l_n}{\sigma_{L_i}^2} - 1 \right| \geq 2,0 \sqrt{2n} \left| 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{n}} \right| \quad (14)$$

Для стаціонарного режиму роботи компресора ГПА, коли явище помпажу відсутнє, приймаємо гіпотезу, що

$$l_1 = l_2 = \dots = l_{n-1}, \quad l_n = m l_1, \quad (15)$$

де m – кількість відліків акустичного сигналу.

Тоді

$$(L_1 - \bar{L})^2 = (L_2 - \bar{L})^2 = \dots = (L_{n-1} - \bar{L})^2 \quad (16)$$

Припустимо, що

$$L_1 = L_2 = L_3 = \dots = L_{n-1} \neq L_n \quad (17)$$

Тоді

$$\bar{L} = \frac{(n-1)L_i + L_n}{n} \quad (18)$$

$$l_1 = (L_1 - \bar{L})^2 = (L_1 - \frac{1}{n} [(n-1)L_i + L_n])^2 \quad (19)$$

$$l_n = (L_n - \frac{n-1}{n} L_i - \frac{1}{n} L_n)^2 = \frac{(n-1)^2}{n^2} (L_n - L_i)^2 \quad (20)$$

Із (15), (19) і (20) визначили, що

$$m = (n-1)^2 \quad (21)$$

Скориставшись нерівністю (14), визначили, що

$$\left| \frac{l_n}{\sigma_{L_i}^2} - 1 \right| = \frac{(n-1)^2}{n^2} - 1 \quad (22)$$

Підставивши вираз (22) у вираз (14), отримаємо

$$\left| (n-1)^2 n^{-1} \right| > 2,0 (2n)^{1/2} \left| 1 - \left(\frac{n-1}{n} \right)^{1/2} \right| \quad (23)$$

Розв'язавши рівняння (23) відносно n , визначили, що мінімальне значення кількості дискретних відліків контрольованої величини L_i , при якому виконується нерівність (23), дорівнює $n = 4$. Тобто, якщо порогове значення сигналу вибрали $\beta = 2$, то виявлення явища помпажу в компресорі ГПА ДКС ПСГ рекурентний алгоритм кумулятивних сум (12) забезпечує на четвертому відліку акустичного сигналу від давача системи автоматичного контролю.

Тепер, користуючись рівнянням (23), розглянемо можливі варіанти сполучень кількості відліків n і порогових значень сигналу β , при яких виконується умова (11). Результати розрахунків наведено в табл.2.

Таблиця 2 – Результати розрахунків кількості відліків n контрольованого параметра L_i для різних значень β

n	β	Виконання умови (11)
3	1,25	$0,33 < 0,557$
	1,5	$0,33 < 0,668$
	2	$0,33 < 0,89$
	2,5	$0,33 < 1,114$
	3	$0,33 < 1,337$
4	1,25	$1,25 > 0,4935$
	1,5	$1,25 > 0,59$
	2	$1,25 > 0,789$
	2,5	$1,25 > 0,987$
	3,0	$1,25 > 1,184$
	3,5	$1,25 < 1,381$
5	1,25	$2,2 > 0,528$
	1,5	$2,2 > 0,634$
	2	$2,2 > 0,876$
	2,5	$2,2 > 1,057$
	3,0	$2,2 > 1,269$
	3,5	$2,2 > 1,48$
6	1,25	$3,16 > 0,718$
	1,5	$3,16 > 0,862$
	2	$3,16 > 1,15$
	2,5	$3,16 > 1,437$
	3,0	$3,16 > 1,725$
	3,5	$3,16 > 2,012$
	4	$3,16 > 2,3$

Аналіз результатів, наведених у табл.2, свідчить: якщо кількість імпульсів $n=3$, то умова (11) не виконується в діапазоні зміни порогових значень $\beta = 1,2; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$. Умова (11) виконується для кількості імпульсів $n=4$ лише в діапазоні $\beta \in (1,25 \div 3,0)$; збільшення β до 3,5; 4,0 призводить до невиконання умови (11). Збільшення кількості до $n=5; n=6$ забезпечує виконання умови (11), коли β змінюється від 1,25 до 4,0.

Висновок

Сформульовано постановку задачі для виявлення явища помпажу в газоперекачувальному агрегаті ДКС ПСГ, коли розподіл моменту

розладження апріорі невідомий, що уможливило вибір ефективного рекурентного алгоритму кумулятивних сум для виявлення початку помпажу.

Досліджено завадостійкість інформаційно-вимірювального каналу контролю помпажу, побудованого на засадах акустики, що дало змогу встановити залежність інтегралу ймовірності хибних команд від співвідношення «сигнал – завади».

Проаналізовано чутливість вибраного рекурентного алгоритму кумулятивних сум, що дало змогу встановити взаємозв'язок кількості відліків контрольованого сигналу із заданим пороговим значенням, що забезпечує ефективний захисту ГПА від помпажу.

Література

- 1 Халявко М.П. Нафтогазовий комплекс України. Напрямки реалізації основних положень енергетичної стратегії до 2030 року / М.П.Халявко // Хімічна промисловість України. – 2007. – № 2. – С.3-10.
- 2 Казакевич В.В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах / В.В.Казакевич. – М.: Машиностроение, 1974. – 264 с.
- 3 Никифоров И.В. Последовательное обнаружение изменения свойств случайных величин (независимые наблюдения, скалярный параметр) / И.В.Никифоров // Измерения, контроль, автоматизация. – 1988. – №2(66). – С.21-29.
- 4 Фреїк Д.М. Аналіз сплеск-перетворень і їх прикладне застосування (огляд) / Д.М.Фреїк, В.І.Голота // Фізика і хімія твердого тіла. – 2005. – Т. 2. – С.181-193.
- 5 Бородкин Л.И. Алгоритм обнаружения моментов изменения параметров управления случайного процесса / Л.И.Бородкин, В.В.Моттль // Автоматика и телемеханика. – 1976. – №6. – С.23-31.
- 6 Семенцов Г.Н. Алгоритм обнаружения момента смены пласта разбуриваемой породы / Г.Н.Семенцов, М.И.Горбийчук, А.А.Шаповал // Известия вузов // Горный журнал. – 1978. – №5. – С.29-34.
- 7 Чапланов О.П. Нейродинамічні прогноуючі моделі в системах керування: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.03 «системи та процеси керування» / О.П.Чапланов. – Харків, 2005. – 19 с.
- 8 Семенцов Г.Н. Телекерування і передача даних / Г.Н.Семенцов, Я.Р.Когуч // Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 1997. – 155 с.
- 9 Когуч Я.Р. Анализ чувствительности алгоритма определения границ пластов горных пород при бурении / Я.Р.Когуч // Проблемы нефтегазового комплекса России, том II. – Уфа: Изд. УГНТУ, 1998. – С.11-15.

Стаття поступила в редакційну колегію
28.05.09

Рекомендована до друку професором
Семенцовим Г.Н.