

4. Максимова І.І. Економіко-математична модель формування собівартості видобутку запасів гірничодобувного підприємства / І.І. Максимова // Глобальні та національні проблеми економіки. Миколаївський національний університет імені В.О. Сухомлинського. – 2014. – Вип. 2. – С. 1334 – 1338
5. Валуев А.М. О моделях методах оптимизации в задачах управления процессами горного производства/ А.М. Валуев // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. – Москва 16-19 июня 2014 г. – С. 4264 – 4275
6. Новицкий И.В., Малиенко А.В. Принципы построения математической модели системы оперативно диспетчерского управления угольных шахт / И.В. Новицкий, А.В. Малиенко // Материалы XII-ї міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми використання інформаційних технологій в сфері освіти, науки і промисловості" (Дніпропетровськ, 23-24 листопада 2016г.) – Д.: НГУ. – 2016. – С. 51 – 54
7. Малієнко А.В. Принципи побудови імітаційної моделі визначення ємності накопичувальних бункерів транспортної системи при оперативно диспетчерському управлінні вугільних шахт/ А.В. Малієнко// Материалы XIII міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми використання інформаційних технологій в сфері освіти, науки і промисловості" (Дніпро, 23-24 листопада 2017г.) – Д.: НГУ. – 2017. - С. 113-115.
8. Малиенко А.В. Моделирование оценки надежности системы технического обслуживания оборудования угольных шахт. / А.В. Малієнко // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук. техн. зб. – 2011.– Вип. 86. – С. 96 – 99

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф Мещеряковим Л.І.*

УДК 681.5.033.2

**О.І Швачка, Г.І. Манко, канд-ти техн. наук,**

*(Україна, Дніпро, ДВНЗ "Український державний хіміко-технологічний університет")*

#### **РОЗВИТОК МЕТОДІВ НАЛАТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА З ДОДАТКОВОЮ ДІЄЮ ДИФЕРЕНЦІАТОРУ**

***Анотація.** Розглянуто структуру пропорційного - інтегрально - диференціального регулятора з додатковим впливом диференціатора за пропорційною і диференціальною складовими для управління істотно інерційними об'єктами в умовах дії неконтрольованих збурень досить великої величини і режимах експлуатації близьким до критичних. Запропоновано підхід до розрахунку параметрів регулятора, що поєднує в собі принципи ітеративної настройки за показниками якості та експериментально-статистичні методи аналізу при варіюванні динамічних характеристик об'єкта. На підставі модельного експерименту експлуатації автоматичної системи з класичним ПІД- регулятором налаштованим інструментальними засобами і регуляторів з додатковим впливом диференціатора налаштованих експериментально-статистичним методом показано, що в другому випадку більш ефективна настройка при відпрацюванні збурень і встановленні параметрів процесу.*

***Ключові слова:** ПІД- регулятор, диференціатор, настройка, рівняння регресії, коефіцієнт кореляція, статистика, якість.*

***Аннотация.** Рассмотрена структура пропорционально – интегрально – дифференциального регулятора с дополнительным воздействием дифференциатора по пропорциональной и дифференциальной составляющим для управления существенно инерционными объектами в условиях действия неконтролируемых возмущений достаточно большой величины и режимах эксплуатации близким к критическим. Предложен подход к расчету настроек регулятора, объединяющий в себе принципы итеративной настройки по показателям качества и экспериментально-статистические методы анализа при варьировании динамических характеристик объекта. На основании модельного эксперимента эксплуатации автоматической системы с классическим ПИД- регулятором настроенным инструментальными средствами и регуляторов с дополнительным воздействием дифференциатора настроенных экспериментально-статистическим методом показано, что во втором случае более эффективная настройка при отработке возмущений и установлении параметров процесса.*

***Ключевые слова:** ПИД- регулятор, дифференциатора, настройка, уравнение регрессии, коэффициент корреляции, статистика, качество.*

***Abstract.** The structure is considered in proportion to the integral - differential controller with the additional influence of the differentiator on the proportional and differential components to control substantially in-*

*ertial objects under conditions of uncontrolled disturbances of a sufficiently large size and operating conditions close to critical. An approach to calculating the controller settings is proposed, combining the principles of iterative tuning in terms of quality indicators and experimental-statistical analysis methods when varying the dynamic characteristics of an object. On the basis of a model experiment of operating an automatic system with a classical PID controller adjusted by instrumental means and regulators with an additional effect of a differentiator tuned by an experimental statistical method, it was shown that in the second case, more effective tuning is when processing disturbances and setting process parameters.*

**Keywords:** PID-regulator, differentiator, tuning, regression equation, correlation coefficient, statistics, quality.

### **Вступ**

Інтенсифікація процесів видобутку та збагачення корисних копалин, зростаючі вимоги до екологічної безпеки та якості цільового продукту при мінімальних витратах додаткових ресурсів та енергії потребує створення більш ефективних та надійних автоматичних систем регулювання (АСР). Характерними особливостями багатьох об'єктів гірничо-металургійного комплексу є наявність великої кількості неконтрольованих збурень, велика інерційність, значне запізнювання, а також нелінійність в каналах управління та обмежений діапазон зміни інших параметрів [1].

Одним зі складових факторів комплексної проблеми завдання управління є автоматична підтримка параметрів на заданому рівні з використанням пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) – регуляторів. Такі регулятори не забезпечує необхідної якості регулювання технологічних параметрів в умовах виробництва що розглядаються. А, од же проблема підвищення ефективності АСР на основі зміни структури ПІД- регуляторів, розширення функціональних можливостей, розробки способів їх реалізації та методів розрахунку є складною та незавершеною задачею [2].

### **Аналіз досліджень та публікацій**

Проведені дослідження якості роботи 100 тис. контурів регулювання, що знаходяться в експлуатації не менше п'яти років на 350 підприємствах в різних галузях промислового виробництва, виявили, що на різних підприємствах від 49 до 63% контурів працюють зі "слабкими" (наближеними до розмикання контуру) налаштуваннями. В середньому приблизно третина контурів працює з нормальними налаштуваннями, третина - з "ослабленими", третина - практично розімкнені "слабкими" налаштуваннями. Це ставить задачу вдосконалення методів управління з використанням складніших математичних моделей, що дозволяють оптимізувати управління, а використання ускладнених моделей породжує проблему вдосконалення алгоритмів їх налаштування [3].

Питанням проектування систем управління з ПІД-регуляторами присвячена значна кількість наукових публікацій. Наприклад, у роботі [4] розглянуті питання якості процесу регулювання, теорії та практики налаштування ПІД- регуляторів, включаючи інструментальні та програмні засоби. У продовж теми, автори [5] підкреслюють, можливе зашумлення виміральної інформації різними шумами, в тому числі і тими, що не підкоряються закону розподілу Гауса. Запропонований ними фільтр може бути використаний при обробці даних систем контролю параметрів стану, забезпечуючи підвищення якості АСР при використанні ПІД- регулятору.

Останнім часом значна увага приділяється використанню програмних засобів при проектуванні регуляторів. Ряд авторів, зокрема корифей у галузі розрахунку налаштувань промислових регуляторів В.Я. Ротач, пропонує використовувати середовище Mathcad [6]. Проте в таких роботах або показане розв'язування окремих етапів задачі синтезу системи регулювання, або ж дається переказ положень документації інструментального середовища. Використання методів, що пропонуються, не надто прискорює процес синтезу системи регулювання. Тим більше це стосується регуляторів з нестандартними структурами і ускладненими законами управління.

На сьогоднішній день значна увага приділяється розробці ПІД-регуляторів з додатковою керуючою дією диференціатора [7, 8], що дозволяють покращити якість управління в умовах змінних збурень та підвищують мобільність процесу налаштування регулятору. У структурі таких регуляторів додатково використовують блок диференціювання, на вхід якого подають вихідний сигнал, пропорційний сумі вихідних сигналів однієї або кількох складових класичного ПІД- закону регулювання. Вихідний сигнал додаткового блока диференціювання додають до вихідного керуючого сигналу стандартного ПІД-регулятора і використовують як додаткову керуючу дію.

Таким чином, не викликає сумнівів необхідність удосконалення структури ПІД- регуляторів та розробка алгоритмів для визначення параметрів налаштування вдосконалених регуляторів. На сьогоднішній день запропонована велика кількість методів розрахунку параметрів регуляторів. Але більшість з них вимагають суттєвих витрат часу і не завжди дають задовільний результат, який би забезпечував бажану якість управління. В окремих випадках спроектована систем може виявитись нестійкою.

**Мета та задачі дослідження**

Метою роботи є розрахунок налаштувань ПД- регулятора з додатковою дією диференціатору по пропорційній та диференціальним складовим при управлінні суттєво інерційними технологічними процесами в умовах дії неконтрольованих обурень достатньо великого значення, а також у режимах експлуатації, що близькі до гранично допустимих.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішення наступних задач:

- аналіз структури регулятора з пропорційним – інтегрально – диференціальним законом регулювання за умови введення диференціатору та сукупних ефектів функціонування.
- розробка загального підходу до налаштування ПД- регулятора з додатковою дією диференціатору по пропорційній та диференціальній складовим з урахуванням динаміки об’єкту;
- проведення експериментально-статистичних досліджень запропонованої структури регулятора з отриманням параметрів налаштування методами регресійного аналізу;
- дослідження структури регулятора з додатковою дією диференціатору у порівнянні з регуляторами-аналогами та класичною структурою в умовах суттєвих обурень.

**Структура ПД- регулятора з додатковою керуючою дією диференціатора**

Стандартний ПД- регулятор виробляє сигнал управління, що є сумою трьох складових: пропорційної, інтегральної та диференціальної. Пропорційна складова залежить від розузгодження між заданням і поточним значенням регульованої величини і відповідає за реакцію на миттєву помилку регулювання. Інтегральна складова містить в собі накопичену помилку, яка дозволяє добитися максимальної швидкості досягнення уставки за відсутності перерегулювання. Диференціальна складова залежить від швидкості зміни параметра, що викликає реакцію регулятора на різку зміну вимірюваного параметра, що виникла, наприклад, в результаті зовнішньої збурюючої дії.

Передатна функція ПД- регулятора представляється у двох формах: стандартній і паралельній. Стандартна форма виглядає так:

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right), \tag{1}$$

де  $K_p$  – коефіцієнт передачі регулятора,  $T_i$  – стала часу інтегральної складової або час ізодрому,  $T_d$  – стала часу диференціальної складової або час передування.

Формула ПФ у паралельній формі має вигляд:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \tag{2}$$

де  $K_p$ ,  $K_i$  та  $K_d$  – коефіцієнти передачі пропорційної, інтегральної та диференціальної складових.

При розгортанні структури від класичної форми ПД- регулятора було відібрано сигнали пропорційної та диференціальної складових, що потрапляють на вхід додаткового диференціатору (рис. 1.1). Цей пристрій отримав назву ПД-ПД- регулятор [8].

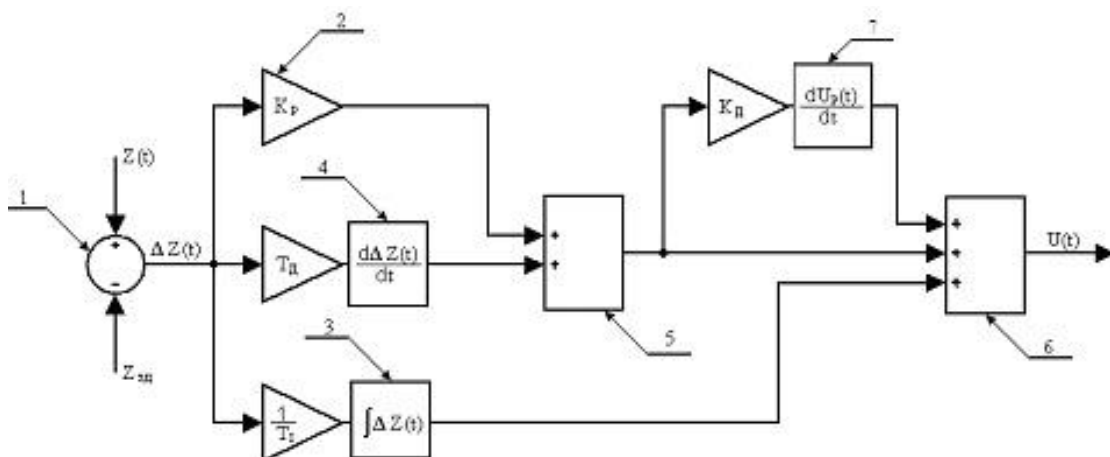


Рис. 1. Структурна схема ПД-ПД- регулятора

Передатна функція цього регулятора має вигляд:

$$W_0(s) = k_p + \frac{1}{T_s s + s} + (T_d + k_p \cdot k_d) \cdot s + T_d \cdot k_d \cdot s^2. \quad (3)$$

На вхід додаткового диференціатора 7 подається вихідний сигнал суматора 5, який підсумовує вихідні сигнали блоку пропорціонального перетворювання 2 та блоку диференціювання 4 стандартного ПІД- регулятора. Додаткова керуюча дія диференціатора 7 додається до основного керуючого сигналу ПІД- регулятора в суматорі 6, вихідний сигнал якого є загальним сигналом цього регулятора.

**Викладення основних результатів дослідження**

Найбільш розповсюдженими в промисловості є моделі об'єктів регулювання першого порядку з запізненням в каналі управління як з самовирівнюванням ( $\alpha = 1$  – інерційний об'єкт), так і без нього ( $\alpha = 0$  – інтегральний об'єкт). Передатна функції моделі об'єкта представлена у вигляді:

$$W_0(s) = \frac{k_0}{T_0 p + \alpha} \cdot e^{-\tau_0 p}, \quad (4)$$

де  $k_0$  - коефіцієнт передачі;  $T_0$  - постійна часу, с;  $\tau_0$  - час повного запізнювання.

Модель об'єкта (при  $\alpha = 1$ ) прийнята як типова (базової) для налаштування та дослідження ПІД-регулятора з додатковою дією диференціатору. Її використання суттєво спрощує вивчення динамічних властивостей АСР та дозволяє виконати дослідження у загальному вигляді.

Проведений аналіз статистичних даних [9] по промислового теплообмінному устаткуванню дозволив встановити наступні межі коливання параметрів настройки об'єкту:

$$k_0 = 0,4 \div 4; T_0 = 4 \div 50 \text{ с}; \tau_0 / T_0 = 0,1 \div 0,8. \quad (5)$$

Як параметри, що безпосередньо впливають на динаміку об'єкта та відображують його інерційність та вплив збурень, прийнято  $\tau_0$  та  $T_0$ , а точніше відношення ( $\tau_0 / T_0$ ). Постійна часу об'єкту незмінна,  $T_0 = 18,64 \text{ с}$  і визначається як базовий показник. Для впливу на час повного запізнювання ( $\tau_0$ ) будемо змінювати чисте (транспортне) запізнювання ( $\tau_q$ ), що є складовою показника що розглядається.

Основна ідея визначення налаштувань запропонованої структури регулятора з додатковою дією диференціатору полягає у проведенні класичного однофакторного експерименту шляхом варіювання параметром ( $\tau_q$ ). За отриманим поточним варіантом стану об'єкту проведено ручне налаштування регулятора у відповідності до правил, що було викладено вище для класичного ПІД- регулятора. Останнім параметром, що підлягає налаштуванню, є коефіцієнт додаткового диференціатору (табл. 1).

Таблиця 1

**Експериментально-статистичні дослідження параметрів налаштувань ПІД-ПІД- регулятора**

Налаштування об'єкту ( $k_0 = 1, T_0 = 18,64 \text{ с}$ )			Налаштування регулятора			
$\tau_q$	$\tau_0$	$\tau_0/T_0$	$k_n$	$T_i$	$T_d$	$K_d$
0,36	1,86	0,1	13,0	0,45	0,4	4
1,29	2,79	0,15	7,0	0,7	1,25	3,3
2,23	3,73	0,2	5,3	1,15	2,0	2,75
3,16	4,66	0,25	4,5	1,7	2,7	2,3
4,09	5,59	0,3	4,0	2,4	3,3	2,0
5,96	7,45	0,4	2,3	5,8	3,3	1,8
7,82	9,32	0,5	2,18	7,1	4,5	1,6
9,68	11,18	0,6	1,9	8,0	6,2	1,5
11,55	13,05	0,7	1,6	10,1	7,25	1,32
13,41	14,91	0,8	1,25	13,5	7,2	0,65

При опрацюванні статистичних даних з метою отримання більш точних розрахунків застосовано метод кусочно-нелінійної апроксимації, тобто виділено два діапазони настроювань: ( $\tau_0/T_0$ )  $\leq 0,3$  та ( $\tau_0/T_0$ )  $> 0,3$  і для кожної групи отримали окремі рівняння регресії (табл. 2).

Таблиця 2

Рівняння регресії параметрів налаштувань ПІД-ПІД- регулятора

Характеристика залежності	Коефіцієнт регресії
$(\tau_0/T_0) \leq 0,3$	
$k_p(\tau_0/T_0) = \frac{-5,0949 - 36,8114 \cdot (\tau_0/T_0)}{1 - 16,7543 \cdot (\tau_0/T_0)}$	$R^2 = 0,9999$
$T_i(\tau_0/T_0) = 0,32 - 1,6286 \cdot (\tau_0/T_0) + 28,5714 \cdot (\tau_0/T_0)^2$	$R^2 = 0,999$
$T_d(\tau_0/T_0) = -1,52 + 20,7857 \cdot (\tau_0/T_0) - 15,7143 \cdot (\tau_0/T_0)^2$	$R^2 = 0,9999$
$k_d(\tau_0/T_0) = 5,77 - 20,2857 \cdot (\tau_0/T_0) + 25,7143 \cdot (\tau_0/T_0)^2$	$R^2 = 0,9999$
$(\tau_0/T_0) > 0,3$	
$k_p(\tau_0/T_0) = 0,4953 + 11,0226 \cdot (\tau_0/T_0) - 19,9286 \cdot (\tau_0/T_0)^2 + 9,1667 \cdot (\tau_0/T_0)^3$	$R^2 = 0,999$
$T_i(\tau_0/T_0) = -16,7357 + 120,297 \cdot (\tau_0/T_0) - 216,428 \cdot (\tau_0/T_0)^2 + 141,666 \cdot (\tau_0/T_0)^3$	$R^2 = 0,999$
$T_d(\tau_0/T_0) = 17,79 - 101,917 \cdot (\tau_0/T_0)^2 - 133,333 \cdot (\tau_0/T_0)^3$	$R^2 = 0,999$
$k_d(\tau_0/T_0) = 10,0619 - 45,2655 \cdot (\tau_0/T_0) + 81,2143 \cdot (\tau_0/T_0)^2 - 49,1667 \cdot (\tau_0/T_0)^3$	$R^2 = 0,999$

Контроль якості процесу регулювання виконано по показникам: час регулювання, перерегулювання. Ступінь досягнення мети регулювання характеризується порівнянням показників якості досліджуваної структури регулятора зі структурою ПІД- регулятора з додатковим керуючим впливом диференціатору по пропорційній складовій (так званий ПІД-ПІ- регулятор), для якого параметри налаштування отримано раніше [9] та який в поточний час проходить промислову апробацію. Отримані данні підлягають статистичному аналізу з подальшим отриманням рівняння регресії параметрів налаштування регулятора від динамічних характеристик об'єкту.

На підставі модельного експерименту (рис. 2) експлуатації автоматичної системи з класичним ПІД-регулятором налаштованим інструментальними засобами і регуляторів з додатковим впливом диференціатора налаштованих експериментально-статистичним методом показано, що в другому випадку більш ефективна настройка при відпрацюванні збурень і встановленні параметрів процесу.

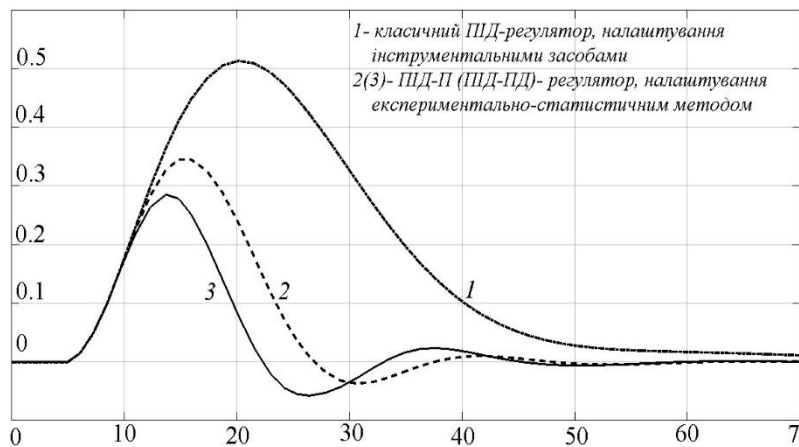


Рис. 2. Порівняльний аналіз якості регулювання

**Висновки**

1. В умовах значної інерційності, запізнювання та при наявності нелінійностей об'єкту, що знаходиться під дією змінних збурень покращити якість керування можливо за рахунок введення дода-ткового диференціювання по пропорційній та дифе-ренційних складових (ПІД-ПІД) для ліквідації мит-тєвого значення помилки в перехідних режимах.

2. Налаштування регулятора запропонованої структури проведено з залученням інструменту регресійного аналізу та імітаційного моделювання при виконанні ітеративної настройки у відповідності на обмеження по якості процесу та зниження кожної майбутньої позитивної амплітуди коливань.

3. Регулятори з додатковим диференціатором дозволяють отримати біль розгорнуто інформацію по процесу управління, знизити похибку, збільшити швидкодію. Справедливість запропонованих рішень підтверджено в модельному експерименті з регулятором налаштованим інструментальними засобами.

Список литературы

1. Подгородецкий А.В. Настройка ПИД-регулятора инерционных объектов горно-металлургического комплекса / А.В. Подгородецкий, А.И. Швачка // Гірничая електромеханіка та автоматика. 2017 – Вип. 99. – С. 65 – 70.
2. Юревич Е.И. Теория автоматического управления / Е.И. Юревич. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 560 с.
3. Dovhopolyi Ya. Development of the program for self-tuning a propoortal-integral-differential controller with an additional controlling action / Ya. Dovhopolyi, G. Manko, V. Trishkin, A. Shvachka // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information technology. Industry control systems. – 2017. – Vol.6/2(90). – pp. 61-66.
4. Денисенко В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации // Современные технологии автоматизации. 2008. №1. С. 86–99.
5. Oliynyk O. Examining the Kalman filter in the field of noise and interference with the non-Gaussian distribution / O. Oliynyk, Y. Taranenko, D. Losikhin, A. Shvachka // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information technology. Industry control systems. 4/4 ( 94 ) 2018. pp. 36-42.
6. Ротач В. Я. Алгоритмы и программы расчетов настройки ПИ и ПИД- регуляторов по переходным характеристикам системы / В. Я. Ротач, В. Ф. Кузищин, С. В. Петров // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 12. – С. 12–16.
7. Пат. 95197 Україна, МПК (2006.01) G05B 11/36. Пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор з додатковою керуючою дією / Блонський С. Д., Петрова Н.С., Шуть О.Ф. (Україна); заявник та патентовласник держ. вищ навч. заклад „Укр. держ. хім.-технол. ун-т”. – № а 2010 07914; заявл. 24.06.2010 ; опубл. 11.07.2011, Бюл. № 13.
8. Пат. 101992 Україна, МПК (2006.01) G05B 11/36. Пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор з додатковою керуючою дією / Петрова Н.С., Блонський С. Д. (Україна); заявник та патентовласник держ. вищ навч. заклад „Укр. держ. хім.-технол. ун-т”. – № а 2011 06467; заявл. 23.05.2011; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 10.
9. Довгополий Я.О. Аналіз корисних структурних схем ПИД-регуляторів з додатковою керуючою дією / Я.О. Довгополий, О.В. Лещенко, С.Д. Блонський // Вопросы химии и химической технологии. – 2012. – № 3. – С. 191-194.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф Мещеряковим Л.І.*

УДК 519.2(075)

**В. П. Козлов, С. Д. Приходченко, кандидаты техн. наук, И. А. Гненный**  
(Украина, Днепр, Национальный технический университет “Днепропетровская политехника”)

## БАЙЕСОВСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ В ГАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**Анотація.** Показано, що байєсовські методи є засобами аналізу даних, які при малих обсягах вибірки дозволяють оцінити параметри статистичної моделі більш повно і точно в порівнянні з класичними статистичними методами.

**Ключові слова:** байєсівський підхід, статистична модель, апіорні параметри, багатовимірний нормальний розподіл.

**Аннотация.** Показано, что байесовские методы являются средствами анализа данных, которые при малых объемах выборки позволяют оценить параметры статистической модели более полно и точно по сравнению с классическими статистическими методами.

**Ключевые слова:** байесовский подход, статистическая модель, априорные параметры, многомерное нормальное распределение.

**Annotation.** It is shown that Bayesian methods are data analysis tools, which for small sample sizes allow us to evaluate parameters of statistical models more fully and more accurately in comparison with classical statistical methods.

**Keywords:** Bayesian approach, statistical model, a priori parameters, multidimensional normal distribution.

**Введение.** Байесовские методы являются более прогрессивными средствами анализа данных по сравнению с традиционными статистическими подходами [1]. Рассмотрим это на примере статистической оценки доли перспективных газовых скважин в регионе от общего их количества.

**Постановка задачи.** Практический интерес представляет знание количества газовых скважин в регионе, пригодных для промышленного использования (с дебитом более 1 тысячи кубометров газа в сутки), по отношению к общему их количеству. На основе байесовского подхода оценить долю перспективных газовых скважин в регионе от общего их количества. Показать, что байесовские методы являются средствами анализа данных, которые при малых объемах выборки позволяют оценить параметры статистической модели более полно и точно по сравнению с классическими статистическими методами.