

УДК 681.513.6:622.24

DOI: 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-89-98

## СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕМЕНТІВ ГІДРОСИСТЕМИ ПРОМИВАННЯ СВЕРДЛОВИН ДЛЯ ЗАДАЧ АДАПТИВНОГО І РОБАСТНОГО КЕРУВАННЯ

*А. І. Лагойда*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 727167, e-mail: lahoidaandrii@gmail.com*

У статті проаналізовано розвиток сучасних підходів для ефективного розв'язання задач адаптивного та робастного керування з компенсацією збурень промиванням свердловин під час їхнього поглиблення і, відповідно, доведено, що це науково-прикладне питання, потребує належного розроблення, а також впровадження нових математичних моделей елементів гідросистеми, які є ядром системи автоматичного керування. Розглянуто шляхи розв'язання задачі адаптивного та робастного керування з еталонною математичною моделлю лінійними стаціонарними об'єктами по виходу, яка має велике теоретичне та прикладне значення та є предметом дослідження протягом останніх років. Розроблено функціональну структуру інтелектуальної адаптивної системи керування наземними об'єктами технічної гідравлічної системи промивання свердловин, яка поєднує методи адаптивного і робастного керування, де адаптивна частина системи в умовах невизначеності здатна змінювати алгоритми функціонування, структуру і параметри регулятора завдяки наявності додаткових пристроїв та зв'язків, які дозволяють своєчасно пристосовуватися до змінюваних умов роботи, а робастна система гарантує необхідну якість системи, незалежно від похибок та змін параметрів системи, оскільки вона володіє чутливістю, зберігає стійкість, функціонує в широкому діапазоні невизначеності. Для наземних елементів технічної гідравлічної системи промивання свердловин, які розглядаються як об'єкти з зосередженими параметрами, розроблена феноменологічна модель, що побудована на засадах холистичного підходу. Модель сформована в області зображення Лапласа за часом та у безрозмірній формі у вигляді системи диференціальних рівнянь при нульових початкових умовах, що відповідно дозволяє використати дану модель для синтезу функцій передавання обернених регуляторів локальних систем автоматичного регулювання. Запропоновано методи керування елементами технічної гідросистеми промивання свердловини, що ґрунтуються на використанні розробленої моделі і структури інтелектуальної системи з елементами робастного та адаптивного керування.

**Ключові слова:** моделювання, динаміка, адаптивне і робастне керування, технічна гідравлічна система промивання свердловин, холистичний підхід, системний аналіз.

В статье проанализировано развитие современных подходов для эффективного решения задач адаптивного и робастного управления с компенсацией возмущений процессом промывки скважин при их углубления и, соответственно, доказано, что этот научно-прикладное вопрос требует надлежащей разработки, а также внедрения новых математических моделей элементов гидросистемы, которые являются ядром системы автоматического управления. Рассмотрены пути решения задачи адаптивного и робастного управления с эталонной математической моделью линейными стационарными объектами по выходу, которая имеет большое теоретическое и прикладное значение и является предметом исследования в последние годы. Разработана функциональная структура интеллектуальной адаптивной системы управления наземными объектами технической гидравлической системы промывки скважин, объединяющая методы адаптивного и робастного управления, где адаптивная часть системы в условиях неопределенности способна изменять алгоритмы функционирования, структуру и параметры регулятора за счет наличия дополнительных устройств и связей, которые позволяют своевременно приспосабливаться к изменяющимся условиям работы, а робастная система гарантирует необходимое качество системы независимо от погрешностей и изменения параметров системы, поскольку она обладает чувствительностью, сохраняет устойчивость, функционирует в широком диапазоне неопределенности. Для наземных элементов технической гидравлической системы промывки скважин, которые рассматриваются как объекты с сосредоточенными параметрами, разработана феноменологическая модель, построенная на холистическом подходе. Модель сформирована в области изображения Лапласа по времени и в безразмерной форме в виде системы дифференциальных уравнений при нулевых начальных условиях, соответственно позволяет использовать данную модель для синтеза функций

передачи обратных регуляторов локальных систем автоматического регулирования. Предложены методы управления элементами технической гидросистемы промывки скважины, основанной на использовании разработанной модели и структуры интеллектуальной системы с элементами робастного и адаптивного управления.

**Ключевые слова:** моделирование, динамика, адаптивное и робастного управления, техническая гидравлическая система промывки скважин, холистический подход, системный анализ.

The article analyzes the development of modern approaches for the effective solution of the problems of adaptive and robust control with the compensation of perturbations by the process of drilling of wells during their deepening and accordingly proves that this is a scientific and applied issue, needs proper development, as well as the introduction of new mathematical models of elements, which are the core of the automatic control system. The ways of solving the problem of adaptive and robust control with the standard mathematical model of linear stationary objects by output, which are of great theoretical and applied importance and have been the subject of research in recent years, are considered. The functional structure of the intelligent adaptive ground control system of technical facilities of the hydraulic well-flushing system is developed, which integrates methods of adaptive and robust control, where the adaptive part of the system in the conditions of uncertainty can change the algorithms of operation, structure and parameters of the controller due to additional devices the holes that allow you to adapt to changing working conditions in a timely manner, and the robust system guarantees the required system quality regardless of errors and min parameters of the system because it has a sensitivity remains stable, functioning in a wide range of uncertainty. For the terrestrial elements of the technical hydraulic system for flushing wells, which are considered as objects with concentrated parameters, a phenomenological model is developed, which is based on a holistic approach. The model is formed in the field of Laplace image in time and in dimensionless form as a system of differential equations at zero initial conditions, which accordingly allows to use this model to synthesize the transfer functions of the inverters of local automatic control systems. The methods of control of elements of technical hydraulic system of flushing of wells are offered, based on the use of the developed model and structure of the intelligent system with elements of robust and adaptive control.

**Keywords:** modeling, dynamics, adaptive and robust control, technical hydraulic well-flushing system, holistic approach, system analysis.

**Вступ.** Сучасна теорія автоматичного керування використовує декілька підходів до побудови ефективних систем автоматизації складних об'єктів, що функціонують за умов невизначеності. Основними підходами є адаптивне і робастне керування з компенсацією збурень. Від робастної системи вимагається низька чутливість, збереження стійкості, незалежна якість в широкому діапазоні зміни її параметрів та функціонування в умовах невизначеності (наявність шумів, низька точність оперативної інформації, відмови каналів зв'язку, недосяжність для вимірювання; недостатня надійність засобів вимірювання, неточність математичних моделей та ін.).

Адаптивна система повинна бути здатною змінювати алгоритм функціонування, структуру та параметри системи за рахунок використання додаткових пристроїв і зв'язків, що дозволяють своєчасно пристосовуватися до змінюваних умов роботи.

На сьогодні розглядаються нові підходи до двох класичних задач сучасної теорії адаптивного керування: до задачі керування з еталонною моделлю лінійним об'єктом по

виходу та до задачі керування нелінійним об'єктом при порушенні умов узгодженості. Задача адаптивного керування з еталонною моделлю лінійним стаціонарним об'єктом по виходу має велике теоретичне і прикладне значення. Це актуально і для автоматизованого керування процесом промивання свердловин при її поглибленні, оскільки ця науково-прикладна проблема розглядається як один з найбільш ефективних методів підвищення ефективності буріння глибоких свердловин на нафту і газ.

**Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій.** Пошуки шляхів розв'язання задачі адаптивного керування з еталонною моделлю лінійними стаціонарними об'єктами по виходу, яка має велике теоретичне і прикладне значення, є предметом активних досліджень впродовж останніх років [1÷10 та ін.]. Один із підходів до розв'язання цієї задачі передбачає використання ітеративної процедури синтезу, яка відома під назвою «адаптивний обхід інтегратора» [2]. Використання даної процедури дозволяє отримати ряд нових властивостей системи, які

були недосяжними для стандартних методів синтезу, що ґрунтується на принципах безпосередньої компенсації. Однією з них є параметрична робастність, а також можливість використання апріорної інформації про значення окремих параметрів об'єкта керування. Під параметричною робастністю мається на увазі забезпечення стійкості замкненої системи керування без адаптивного налаштування параметрів регулятора [2÷5].

Використання методу адаптивного обходу інтегратора для керування лінійними об'єктами по виходу було запропоновано у роботі [10], а властивості параметричної робастності досліджено у [5]. Адаптивна система керування з еталонною моделлю і параметричним налаштуванням розглянута у роботі [9]. Проте, у регуляторі, описаному у роботах [5,10] властивість параметричної робастності забезпечується лише тоді, коли так званий високочастотний коефіцієнт функції передавання  $b_m = 1$  відомий [2].

Подальших досліджень потребують питання адаптивного керування з еталонною моделлю [9] лінійними об'єктами по виходу, що є складовими технічної гідравлічної системи промивання свердловин (ТГСПС), під час їхнього поглиблення. Це такі системи як процес заповнення ємності з буровим розчином, поршневі бурові насоси, приводи бурових насосів, процес розчинення хімеагентів у буровому розчині та ін.

**Постановка задачі.** Метою статті є системний аналіз і моделювання динаміки елементів технічної гідравлічної системи промивання свердловин для задач адаптивного і робастного керування.

**Виклад основного матеріалу.** Системний аналіз структурних схем гідросистем шляхом декомпозиції їх на окремі елементи дозволяє адекватно моделювати ТГСПС. Властивості цих елементів та характер впливу на потік бурового розчину визначають їх математичний опис.

Задача, що розв'язується – це адаптивне і робастне керування лінійним стаціонарним об'єктом, гіпотетичний зв'язок між керованою величиною  $x(t)$  і керувальною дією  $y(t)$  якого описується диференціальним рівнянням такого виду:

$$a_0 \frac{d^n x(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x(t)}{dt^{n-1}} + a_2 \frac{d^{n-2} x(t)}{dt^{n-2}} + \dots + x(t)a_n = b_0 \frac{d^m y(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} y(t)}{dt^{m-1}} + b_2 \frac{d^{m-2} y(t)}{dt^{m-2}} + \dots + y(t)b_m, \quad (1)$$

де  $y(t)$  – вхідна величина (керувальна дія);

$x(t)$  – вихідна величина (керована величина);

$a_i, b_j$  – невідомі постійні коефіцієнти рівняння.

Це рівняння встановлює зв'язок між вхідною  $y(t)$  і вихідною  $x(t)$  величинами об'єкта керування в усталених і перехідних режимах. Звичайно у реальних системах керування показник  $n > m$ , тобто  $n - m > 1$ . Початкові умови:

$$y(-0) = y'(-0) = y''(-0) = \dots = 0, \quad (2)$$

$$x(-0) = x'(-0) = x''(-0) = \dots = 0.$$

Перетворивши рівняння (1) за Лапласом, отримаємо функцію передавання об'єкта керування:

$$W(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + b_2 s^{m-2} \dots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} \dots + a_n}, \quad (3)$$

де  $s = d/dt$  – оператор диференціювання.

Розглянемо диференціальні рівняння і функції передавання об'єктів керування, що є складовими технічної гідравлічної системи промивання свердловин під час їхнього поглиблення. Це такі процеси як розчинення хімеагентів при створенні бурового розчину, обертальний рух тіла (двигун, відцентровий насос), поступальний рух тіла (поршневий буровий насос), резервуар, в який надходить буровий розчин та ін. Спільним для цих об'єктів є те, що всі вони одноємнісні (табл. 1).

Виходитимемо з того, що будь-який одноємнісний об'єкт керування типу SI-SO характеризується двома узагальнюючими координатами  $u_{вх}$  та  $x_{вих}$ . Вхідна величина  $u_{вх}$  – це величина енергетичного або матеріального потоку  $M$ , що надходить на вхід об'єкта керування. Вихідна величина  $x_{вих}$  – це стан об'єкта керування  $h$ . Вони пов'язані між собою рівнянням балансу енергії або речовини, що накопичується в об'єкті керування, яке є основним рівнянням одноємнісного об'єкта [12]

$$F \frac{dh}{dt} = M, \quad (4)$$

де  $F$  – постійна величина, яка характеризує акумулюючу властивість об'єкта;

$h$  – показник стану об'єкта;

$M$  – кількість енергії або речовини, яка надходить в об'єкт за одиницю часу

$$M = M_n - M_c, \quad (5)$$

де  $M_n$ ,  $M_c$  – відповідно приплив і стікання енергії або речовини.

Якщо одна із величин, що входять до рівняння (5) є збурювальною дією або навантаженням, тоді друга величина використовується як керувальна дія.

Отже, 
$$F \frac{dh}{dt} = M_n - M_c. \quad (6)$$

Якщо об'єктом керування є резервуар, в який надходить рідина, то координата  $h$  є рівнем рідини, показник  $M$  – різницею між припливом і стоком рідини за одиницю часу, а площа поверхні рідини  $F$  – коефіцієнтом ємності. Цей коефіцієнт визначає швидкість зміни показника  $h$  при постійному значенні показника  $M$ . Якщо  $M = 0$ , то  $M_n = M_c$  і  $h = \text{const}$ . Згідно з рівнянням (4) при будь-якому  $M_n$  і  $M_c$  величина  $h$  буде зростати або зменшуватися залежно від знаку  $M$ .

Чим більшим є коефіцієнт ємності  $F$ , тим повільніше проходить зміна величини  $h$  при одній і тій ж різниці між припливом і стоком. Коефіцієнт ємності  $F$  може бути постійним або змінним. Для резервуару у вигляді циліндра  $F = \text{const}$  при будь-якому значенні  $h$ . Якщо резервуар має форму конуса, то  $F$  буде залежити від поточного значення  $h$ , а рівняння (4) стане нелінійним. В об'єктах з  $F = \text{const}$  кожному значенню показника  $h = h_0$  відповідає визначена

кількість енергії або речовини, яка описується ємністю об'єкта  $V_0 = F \cdot h_0$ .

Зазначимо, що крім основного рівняння (4) одноємнісні об'єкти підпорядковуються закону, згідно з яким відбувається обмін енергії і речовини між об'єктом керування і зовнішнім середовищем. Цей закон може бути виражений у вигляді двох нелінійних залежностей

$$M_n = f_n(h), \quad M_c = f_c(h), \quad (7)$$

які при аналізі динаміки об'єкта необхідно лінеаризувати. Очевидно, що поведінка об'єкта в часі залежить від співвідношення похідних  $f'_n(h)$  та  $f'_c(h)$  у точці, яка відповідає режиму, що розглядається. Якщо у резервуарі з буровим розчином при рівні  $h_0$  різниця похідних

$$\left\{ \frac{\partial M_c}{\partial h} - \frac{\partial M_n}{\partial h} \right\}_{h=h_0} > 0, \quad (8)$$

то різниця між припливом і стоком, яка виникла випадково, буде зменшуватися при збільшенні  $h$ , оскільки такий об'єкт має властивість самовирівнювання. Через деякий час різниця (8) буде дорівнювати 0, а рівень стане постійним  $h = \text{const}$ . Якщо різниця (8) буде менша нуля, то із збільшенням  $h$  буде збільшуватися різниця між припливом і стоком, що викличе подальше зростання рівня.

Враховуючи умови балансу енергії або речовини (4) і закони обміну енергії і речовини між об'єктом і зовнішнім середовищем (7) складемо загальне диференціальне рівняння для резервуара з рідиною як одноємнісного об'єкта. Припустимо, що до подачі зовнішнього впливу об'єкт перебуває у статичному режимі, тобто

$$M_n = M_c; \quad h = h_0. \quad (9)$$

Таблиця 1 - Сукупність класів одноємнісних об'єктів технічної гідравлічної системи промивання свердловин

Клас об'єкта	Процес	Вхідна величина ( $M$ )	Вихідна величина ( $h$ )	Коефіцієнт ємності ( $F$ )
A	Розчинення	Надходження сухої речовини за одиницю часу, $кг/с$	Концентрація речовини, $кг/м^3$	Ємність апарата, $м^3$
B	Обертальний рух тіла	Момент, $Нм$	Кутова швидкість, $рад/с$	Момент інерції, $кгм^2$
C	Поступальний рух тіла	Зусилля, $Н$	Лінійна швидкість, $м/с$	Маса, $кг$
D	Заповнення резервуару	Приплив рідини, $м^3/с$	Рівень рідини, $м$	Площа поверхні рідини, $м^2$

Після ступінчатої зміни припливу рідини на величину  $\Delta M_n$  згідно рівняння (6) відбувається зміна рівня рідини на величину:

$$\Delta h = h - h_0. \quad (10)$$

Зміна рівню призводить до збільшення або зменшення припливу або стоку. Щоб знайти нові значення припливу і стоку, необхідно залежності (7) розкласти в ряд Тейлора поблизу точки усталеного режиму і, відкинувши члени ряду вище першого порядку малості, отримати такі наближені залежності:

$$\left. \begin{aligned} M_n &= f_n(h) \rightarrow M_n = M_{n0} + \Delta M_n + \\ &+ \left( \frac{\partial M_n}{\partial h} \right)_{h=h_0} \Delta h + \dots \\ M_c &= f_c(h) \rightarrow M_c = M_{c0} + \\ &+ \left( \frac{\partial M_c}{\partial h} \right)_{h=h_0} \Delta h + \dots, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де  $\Delta M_n$  – стрибкоподібна зміна притоку.

Враховуємо, що  $h = h_0 + \Delta h$  та  $M_n = M_c$ , і підставимо значення  $M$  і  $h$  у рівняння (6):

$$F \frac{d(h_0 + \Delta h)}{dt} = M_{n0} + \Delta M_n + \left( \frac{\partial M_n}{\partial h} \right)_{h=h_0} \Delta h - M_{c0} + \left( \frac{\partial M_c}{\partial h} \right)_{h=h_0} \Delta h. \quad (12)$$

Це рівняння можна спростити, враховуючи, у початковому стані приплив дорівнював стоку. Можна врахувати ще той факт, що похідна від  $h_0 = \text{const}$  дорівнює 0. Можемо тепер переписати рівняння (12):

$$F \frac{d(\Delta h)}{dt} = \Delta M_n + \left( \frac{\partial M_n}{\partial h} \right)_{h=h_0} \Delta h - \left( \frac{\partial M_c}{\partial h} \right)_{h=h_0} \Delta h. \quad (13)$$

Перенесемо складові  $h$  наліво:

$$F \frac{d(\Delta h)}{dt} + \left[ \left( \frac{\partial M_c}{\partial h} \right)_{h=h_0} - \left( \frac{\partial M_n}{\partial h} \right)_{h=h_0} \right] \Delta h = \Delta M_n. \quad (14)$$

Останнє рівняння (14) пов'язує  $\Delta M$  з  $\Delta h$ , але дійсне воно лише для малих відхилень притоку  $M_n$  і рівня  $h$  від значень  $M_0$  і  $h_0$ .

Для переходу до рівнянь у відносних одиницях використовуємо базові значення статичного режиму –  $M_0$ ,  $h_0$ . У цьому випадку:

$$\frac{\Delta h}{h_0} = x, \quad \frac{\Delta M_n}{M_0} = y; \quad \Delta h = h_0 x; \quad \Delta M_n = M_0 y. \quad (15)$$

Тепер можна підставити ці значення (15) у рівняння (14):

$$F \frac{h_0 dx}{dt} + \left[ \left( \frac{\partial M_c}{\partial h} \right)_{h=h_0} - \left( \frac{\partial M_n}{\partial h} \right)_{h=h_0} \right] h_0 x = M_0 y. \quad (16)$$

Розділимо праву і ліву частину рівняння (16) на  $M_0$ :

$$\frac{F h_0}{M_0} \frac{dx}{dt} + \frac{h_0}{M_0} \left[ \left( \frac{\partial M_c}{\partial h} \right)_{h=h_0} - \left( \frac{\partial M_n}{\partial h} \right)_{h=h_0} \right] x = y. \quad (17)$$

Коефіцієнт, що стоїть перед  $x$  є коефіцієнтом самовирівнювання  $\delta$ :

$$\delta = \frac{h_0}{M_0} \left[ \left( \frac{\partial M_c}{\partial h} \right)_{h=h_0} - \left( \frac{\partial M_n}{\partial h} \right)_{h=h_0} \right]. \quad (18)$$

Якщо поділити ліву і праву частини рівняння (17) на  $\delta$ , то рівняння (17) можна привести до стандартної форми:

$$T_{\text{OK}} \frac{dx}{dt} \pm x = K_{\text{OK}} y, \quad (19)$$

де  $T_{\text{OK}} = \frac{F h_0}{M_0 |\delta|}$  – стала часу об'єкта керування;

$K_{\text{OK}} = \frac{1}{|\delta|}$  – безрозмірний коефіцієнт

передавання об'єкта керування.

Якщо  $\frac{dx}{dt} = 0$ , то диференціальне рівняння (19) перетворюється у рівняння  $x = K_{\text{OK}} y$ , яке описує статичні властивості об'єкта керування. Диференціальне рівняння (17), що отримане на засадах холистичного підходу, описує динамічні властивості різних об'єктів керування.

Дійсно, якщо  $\delta > 0$ , то однозмінний об'єкт керування має властивість самовирівнювання і за своїми динамічними властивостями еквівалентний інерційній ланці першого порядку з функцією передавання:

$$W(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{K_{\text{OK}}}{T_{\text{OK}} s + 1}. \quad (20)$$

Якщо  $\delta = 0$ , то самовирівнювання в об'єкті керування відсутнє і такий об'єкт еквівалентний ідеальній інерційній ланці, що описується рівнянням:

$$\frac{F h_0}{M_0} \frac{dx}{dt} = y. \quad (21)$$

Якщо  $\delta < 0$ , то в рівнянні (19) перед змінною  $x$  буде “-”, що відповідає додатному кореню зростаючої перехідної функції:

$$W(s) = \frac{K_{\text{ок}}}{T_{\text{ок}}s - 1}. \quad (22)$$

Припустимо, що бажана поведінка регульованої змінної  $x$  задається еталонною моделлю:

$$x^* = \frac{K^*}{A^*(s)} x_{\text{зд}}, \quad (23)$$

де  $x^*$  - еталонний вихід;

$x_{\text{зд}}$  - сигнал завдання (обмеження, кусково неперервна функція часу);

$A^*(s)$  - нормований поліном Гурвіца степені  $n \geq 1$ ;

$K^* > 0$  - постійний коефіцієнт передавання.

Оскільки для багатьох задач оптимального і адаптивного керування зручно використовувати математичні моделі у нормальній формі, тобто у вигляді системи  $n$  диференціальних рівнянь першого порядку, розглянемо це питання на прикладі двигуна насосної установки як об'єкта керування класу  $B$ . Поведінку двигуна згідно з основним рівнянням динаміки одноємнісного об'єкта (4), (6) характеризує таке рівняння руху [15]:

$$I = \frac{d^2\alpha}{dt^2} = M_{\text{д}} - M_0, \quad (24)$$

де  $I$  - момент інерції приводу, приведений до валу двигуна;

$\alpha$  - кут повороту валу двигуна;

$M_{\text{д}}$ ,  $M_0$  - момент, який створює двигун і момент статичного опору насоса.

Введем позначення:

$$b = \frac{1}{I}; \quad u = M_{\text{д}}; \quad x_1 = \alpha; \quad x_2 = \dot{\alpha}; \quad F = M_0/I,$$

де  $u$  - керувальна дія;

$F$  - збурення.

Тоді рівняння (24) можна записати у формі Коші:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= 0 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 + 0 \cdot U + 0 \cdot F, \\ \dot{x}_2 &= 0 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + b \cdot U + (-1) \cdot F, \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

або у векторній формі

$$\dot{X} = AX + BU + CF, \quad (26)$$

$$\text{де } X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}.$$

У наведеному прикладі керувальною дією є момент двигуна  $M_{\text{д}}$ , хоча у дійсності керувальною дією є напруга збудження або

напруга на якорі двигуна постійного струму. Тому у більш складній моделі об'єкта керування слід додати ще модель взаємозв'язку моменту двигуна  $M_{\text{д}}$  з конкретною керувальною дією.

Якщо врахувати, що двигун постійного струму має незалежне збудження, то тоді об'єкт керування можна описати так:

$$\left. \begin{aligned} U &= K_{\varepsilon} \dot{\alpha} + RM_{\text{д}}/K_{\varepsilon} + LM_{\text{д}}/K_{\varepsilon}, \\ M_{\text{д}} - M_0 &= \ddot{\alpha}/I, \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

де  $U$  - напруга живлення;

$K_{\varepsilon} = K_m$  - конструктивні константи при сталомі значенні потоку збудження двигуна;

$R$ ,  $L$  - активний й індуктивний опори обмотки двигуна.

Якщо ввести позначення

$$x_1 = \alpha; \quad x_2 = \dot{\alpha}; \quad x_3 = M_{\text{д}}; \quad F = M_0/I,$$

то отримаємо такі рівняння у нормальній формі Коші:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= 0 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 + 0 \cdot U + 0 \cdot F, \\ \dot{x}_2 &= 0 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + \left(\frac{1}{I}\right)x_3 + 0 \cdot u + (-1) \cdot F, \\ \dot{x}_3 &= 0 \cdot x_1 + (-K_{\varepsilon}K_m/L)x_2 + (-R/L)x_3 + \\ &+ (K_m/L)U + 0 \cdot F, \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

або

$$\dot{X} = AX + BU + CF, \quad (29)$$

$$\text{де } X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/I \\ 0 & -K_{\varepsilon}K_m/L & -R/L \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_m/L \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

У наведених прикладах фазовими координатами двигуна насоса як об'єкта керування є:  $\alpha$  - кут повороту валу двигуна,  $\dot{\alpha}$  - кутова швидкість обертання валу двигуна та  $M_{\text{д}}$  - момент, який створює двигун.

Можна було б ввести й інші фазові координати. Наприклад, замість моменту двигуна  $M_{\text{д}}$  - струм його якоря. При цьому у математичній моделі помінялось би деякі коефіцієнти при фазових координатах. У моделі (25) керувальною дією є  $M_{\text{д}}$ , а

збурювальною дією –  $F = M_0 / I$ . У більш складному прикладі (28)  $M_d$  виступає вже в ролі фазової координати, а керувальною дією є напруга  $U$ . Вона обмежена зверху  $U_{\max}$ , а знизу – нулем:  $0 \leq U \leq U_{\max}$ . Якщо розглядати регулювання потоком збудження, то в математичній моделі того ж самого двигуна з'явиться ще одна керувальна дія – напруга збудження. Проте, збурювальною дією у всіх випадках є  $F = M_0 / I$ .

Припустимо, що в об'єкта керування досяжною для вимірювання є лише вихідна змінна  $x$ , але не її похідні.

Отже, необхідно знайти такий закон керування, щоб при будь-яких початкових умовах усі сигнали в замкненій системі керування були обмеженими функціями часу і додатково виконувалася умова:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - x^*(t)) = 0, \quad (30)$$

де  $x(t) - x^*(t) = \varepsilon(t)$  – похибка стеження.

Така постановка задачі адаптивного керування з еталонною моделлю теоретично розглядалася [2,11] для деяких спеціальних випадків, коли були невідомі параметри еталонної моделі, параметри об'єктів керування, був невимірюваний сигнал завдання та ін. Проте, ця проблема не розглядалася для нелінійних динамічних об'єктів, що є невідтворюваними, функціонують за умов апріорної та поточної невизначеності щодо структури і параметрів, розвиваються у часі і перебувають під впливом різного типу завад.

Після визначення математичної моделі і перевірки її на адекватність об'єкту керування необхідно обрати тип регулятора для одержання якісних перехідних процесів. Такі регулятори відомі [13], розроблені також методи їх синтезу.

Одержані моделі (17) допускають автоматичну ідентифікацію об'єкта керування, тобто вхідна дія разом із вихідною можуть бути використані для ідентифікації об'єкта керування у режимі on-line, реалізуючи ідею дуальності керувальної та вихідної дій [2]. Це створило передумови для застосування регулятора на основі оберненого оператора. Для знаходження функції передавання оберненого регулятора необхідно знайти оператор обернення  $W_{\text{ок}}^{-1}(s)$  [2,13]. Завдяки алгебраїчній формі зображень операторів Лапласа, формально зробити це досить просто. Наприклад, для

досліджуваних об'єктів керування, що мають функції передавання  $W(s) = \frac{K_{\text{ок}}}{T_{\text{ок}}s + 1}$ ,

обернений оператор дорівнюватиме

$$W_{\text{ок}}^{-1}(s) = \frac{T_{\text{ок}}s + 1}{K_{\text{ок}}} = \frac{T_{\text{ок}}}{K_{\text{ок}}}s + \frac{1}{K_{\text{ок}}}. \quad (31)$$

Йому відповідає функція передавання ПД-регулятора:

$$R(s) = K + T_d s = K \left( 1 + \frac{T_d}{K} s \right). \quad (32)$$

де  $K = \frac{1}{K_{\text{ок}}}$ ,  $T_d = \frac{T_{\text{ок}}}{K_{\text{ок}}}$ .

Отже, обернений регулятор повинен містити пристрій, що виконує операцію диференціювання. Проте, відповідні пристрої, навіть для наближеного диференціювання, дуже чутливі до збурень. Зазначимо, що похідні можна обчислювати у ряді випадків без використання диференціюючих пристроїв, але для цього необхідно мати математичну модель об'єкта керування з відомою структурою та параметрами. Отже, синтез оберненого регулятора можливий лише при наявності достатньо точної інформації про структуру та параметри об'єкта керування. Розв'язанню задачі синтезу оберненого регулятора сприяє перехід від безперервних моделей об'єкта керування до дискретних [13], а також використання концепції дуального управління, яка є узагальненою ідеєю адаптивного керування в умовах невизначеності [2]. Слід зазначити, що використання оберненого регулятора супроводжується появою запізнення на один інтервал дискретності. Проте, це притаманно усім дискретним системам і методи врахування цього фактору давно відомі [6,7,11 та ін.]. Окрім цього, об'єкти ТГСПС, що розглядаються, мають великі сталі часу, які досягають декількох десятків секунд.

Процес адаптації повинен задовольняти вимогам стійкості, точності і швидкодії. Отже, задачами є:

1) визначення оптимальних параметрів керуючого пристрою, що забезпечують максимальну точність і швидкодію;

2) синтез структури системи, яка задовольняє заданим вимогам або оптимальної адаптивної системи.

Коефіцієнти математичної моделі об'єкта керування, а отже і параметри оберненого регулятора запропоновано [14] одержувати на основі аналізу кореляційних функцій технологічних процесів у режимі реального часу. Одержані дані є основою для синтезу початкового варіанту структури та коефіцієнтів оберненого регулятора, оскільки вони співпадають з параметрами функції передавання

об'єкта керування. Оскільки одержати точні параметри об'єкта керування неможливо, параметри регулятора необхідно налагоджувати до одержання мінімальної похибки керування, застосовуючи інтелектуальні інформаційні технології.

Функціональна структура інтелектуальної системи керування ТГСПС наведена на рис. 1.

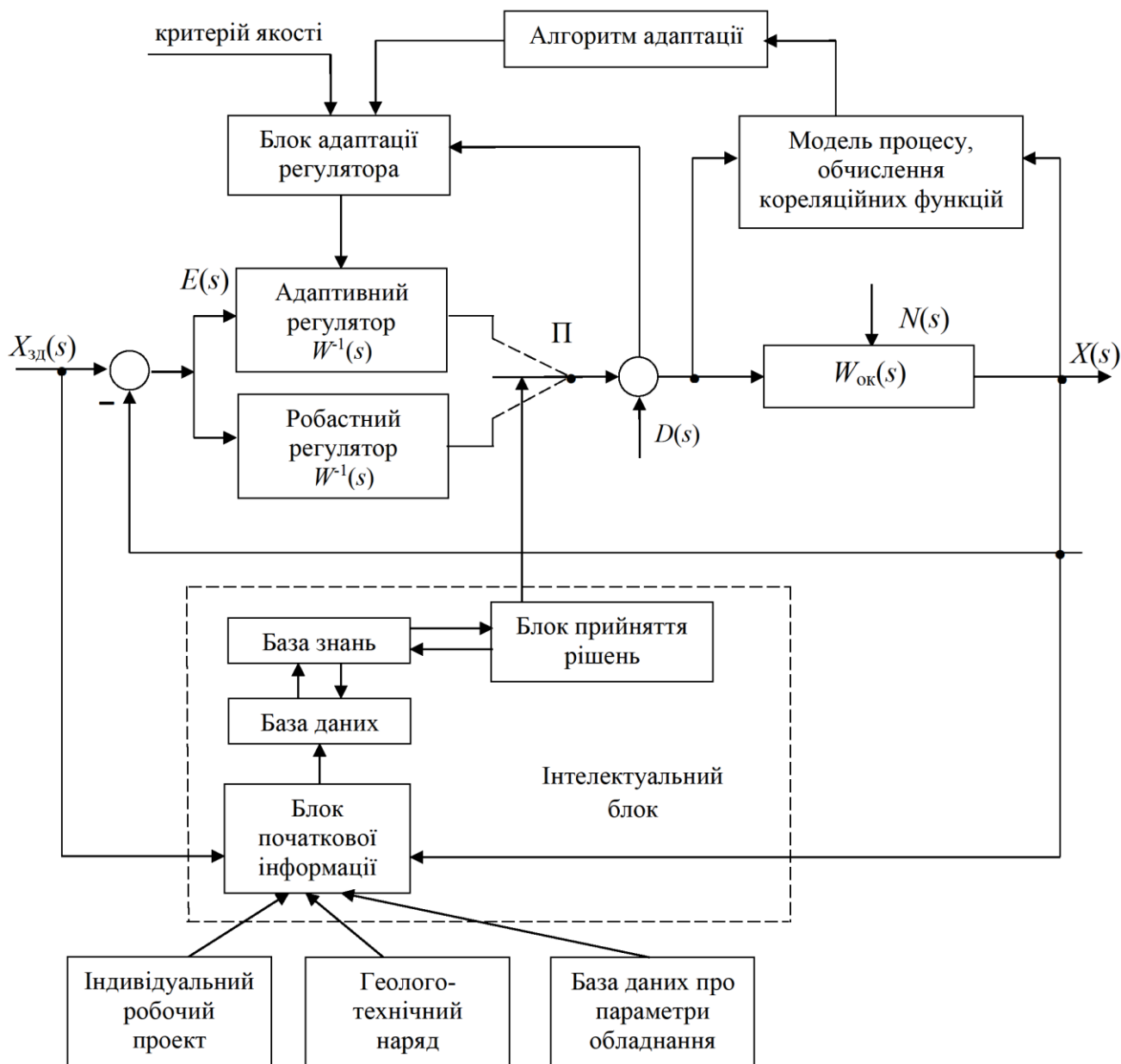


Рисунок 1 - Структура інтелектуальної адаптивної системи керування наземними об'єктами ТГС ПС



Структура об'єднує методи адаптивного і робастного керування. Адаптивна частина системи в умовах невизначеності здатна змінювати алгоритми функціонування, структуру і параметри регулятора за рахунок додаткових пристроїв і зв'язків, що дозволяють своєчасно пристосовуватися до змінюваних умов роботи.

Робастна система гарантує необхідну якість системи незалежно від похибок та змін параметрів системи. Вона володіє чутливістю, зберігає стійкість, функціонує в широкому діапазоні невизначеності.

Між адаптивною і робастною підсистемами існує однозначний взаємозв'язок, оскільки вони орієнтовані на змінювані умови роботи. Поєднання цих двох методів керування в одній системі дозволяє одночасно використовувати переваги як адаптивних, так і робастних систем.

На першому етапі роботи такої системи вмикається адаптивний регулятор. Він на основі зміни чи появи нового типу додаткових завад  $D(s)$  за допомогою блоку адаптації регулятора знаходить певні рішення, а також змінює початкові параметри адаптивного регулятора  $W^{-1}(s)$  та пристосовується до нових умов режиму роботи системи.

Інтелектуальний блок обробляє початкову інформацію (індивідуальний робочий проект, геолого-технічний наряд, база даних про параметри обладнання) за допомогою бази даних, бази знань та блоку прийняття рішень, а також приймає рішення, на основі якого перемикач П переключає систему з адаптивного на робастний.

**Висновок.** Для наземних елементів технічної гідравлічної системи промивання свердловин, які розглядаються як об'єкти з зосередженими параметрами, розроблена феноменологічна математична модель, що побудована на засадах холистичного підходу. Модель сформована в області зображення Лапласа за часом у безрозмірній формі у вигляді системи диференціальних рівнянь при нульових початкових умовах. Це дозволяє використати її для синтезу функцій передавання обернених регуляторів локальних систем автоматичного регулювання.

Запропоновано методи регулювання й адаптивного керування елементами технічної гідравлічної системи промивання свердловин,

що ґрунтуються на використанні розробленої моделі і структури інтелектуальної системи керування з комбінуванням методів робастного й адаптивного керування.

#### Список використаних джерел

1. Serrani A., Isidori A., Marconi L. Semiglobal nonlinear output regulation with adaptive internal model. *IEEE Trans. Automatic control*. 2001. Vol 46, № 8. P. 1178-1194.
2. Никифоров В.О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. СПб: Наука, 2003. 282 с.
3. Гриценко Н.Г. Возможности комбинирования робастного та адаптивного управління; між нар.наук-техн.конф. «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами», 26-27 листопад 2009. Київ: НУХТ, 2009. С.27-28.
4. Yao B., Tomizuka M. Adaptive robust control of SISO nonlinear systems in a semi-strict feedback form. *Automatica*, 1997. Vol. 33. № 5. P. 893-900.
5. Kritic M., Kannellakopoulos I., Kokotovic P.V. Passivity and parametric robustness of a new class of adaptive systems. *Automatica*, 1994. Vol. 30. P.1703-1716.
6. Шпилева О.Я. Адаптивные системы с эталонными моделями. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 240 с.
7. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб: Наука, 2000. 549 с.
8. Збруцкий А.В., Прач А.А., Симоненко С. Адаптивная система управления заданной точности при произвольных возмущениях / Scientific publication Automatics-2008 the 15<sup>th</sup> international conference on Automatic control. Odessa, 23-26 september 2008. С. 214-218.
9. Семенов Г.Н., Рогов В.М. Адаптивная система керування з еталонною моделлю і параметричним налаштуванням; V Всеукр.наук-техн.конф. молодых ученых, аспирантов та студентов «Автоматизация, контроль та управління: поиск идей та решений», м. Покровськ: ДНУ, 21-22 травня 2018. С.34-37.
10. Kritic M., Kannellakopoulos I., Kokotovic P.V. Nonlinear design of adaptive controllers for linear systems. *IEEE Trans on Automatic control*.

1994. Vol. 39, № 4. P. 738-751.

11. Артюшок В.П., Соловьев И.Г. Прямое адаптивное управление с настраиваемым эталоном. *Автоматика и телемеханика*. 1992, № 10. С. 105-112.

12. Семенцов Г.Н. Теорія автоматичного керування: підручн. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 1994. 610 с.

13. Семенцов Г.Н. Автоматизація неперервних технологічних процесів. Регулятори: навч.посібн. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. 201 с.

14. Лагойда А., Майкович Є.П., Зварич Г.Г., Лагойда Л.І. Моделі автокореляційних функцій ергодичних випадкових процесів у системі керування бурінням свердловин. *Modern engineering and innovative technologies*. 2019, № 10(1). С. 43-52.

15. Прихно В.И. Оптимальное и адаптивное управление электроприводами: учеб.пособ. Л.:ЛПИ, 1988. 92 с

### References

1. Serrani A., Isidori A., Marconi L. Semiglobal nonlinear output regulation with adaptive internal model. *IEEE Trans. Automatic control*. 2001. Vol 46, No 8. P. 1178-1194. [in Russian]

2. Nikiforov V.O. Adaptivnoe i robstnoe upravlenie s kompensatsiyey vozmuscheniy. SPb: Nauka, 2003. 282 p. [in Russian]

3. Hrytsenko N.H. Mozhlyvosti kombinuvannya robstnoho ta adaptivnoho upravlinnia; mizh nar.nauk-tekhn.konf. «Suchasni metody, informatsiine, prohramne ta tekhnichne zabezpechennia system upravlinnia orhanizatsiino-tekhnolohichnymy kompleksamy», 26-27 lystopad 2009. Kyiv: NUKhT, 2009. P. 27-28. [in Ukrainian]

4. Yao B., Tomizuka M. Adaptive robust control of SISO nonlinear systems in a semi-strict feedlack form. *Automatica*, 1997. Vol. 33. No 5. P. 893-900.

5. Kristic M., Kannellakopoulos I., Kokotovic P.V. Passivity and parametric robustness of a new choss of adaptive systems. *Automatica*. 1994. Vol. 30. P.1703-1716.

6. Shpilevaya O.Ya. Adaptivnyie sistemyi s etalonnyimi modelyami. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2007. 240p. [in Russian]

7. Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. Nelineynoe i adaptivnoe upravlenie slozhnyimi dinamicheskimi sistemami. SPb: Nauka, 2000. 549 p. [in Russian]

8. Zbrutskiy A.V., Prach A.A., Simonenko S. Adaptivnaya sistema upravleniya zadannoy tochnosti pri proizvolnyih vozmuscheniyah / Scientific publication Automatics-2008 the 15th international conference on Automatic control. Odessa, 23-26 september 2008. P. 214-218. [in Russian]

9. Sementsov H.N., Rehei V.M. Adaptivna systema keruvannia z etalonnoiu modelliu i parametrychnym nalashtuvanniam; V Vseukr.nauk-tekhn.konf. molodykh vchenykh, aspirantiv ta studentiv «Avtomatyzatsiia, kontrol ta upravlinnia: poshuk idei ta rishen», m. Pokrovsk: DNU, 21-22 travnia 2018. P.34-37. [in Ukrainian]

10. Kritic M., Kannellakopoulos I., Kokotovic P.V. Nonlinear design of adaptive controllers for linear systems. *IEEE Trens on Automatic control*. 1994. Vol. 39, No 4. P. 738-751.

11. Artyushok V.P., Solovev I.G. Pryamoe adaptivnoe upravlenie s nastraivaemyim etalonom. *Avtomatika i telemehanika*. 1992, No 10. P. 105-112.

12. Sementsov H.N. Teoriia avtomatychnoho keruvannia: pidruchn. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 1994. 610 p. [in Ukrainian]

13. Sementsov H.N. Avtomatyzatsiia neperervnykh tekhnolohichnykh protsesiv. Rehulatory: navch.posibn. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 2016. 201 . [in Ukrainian]

14. Lahoida A., Maikovych Ye.P., Zvarych H.H., Lahoida L.I. Modeli avtokoreliatsiinykh funktsii erhodychnykh vypadkovykh protsesiv u systemi keruvannia burinniam sverдловyn. *Modern engineering and innovative technologies*. 2019, № 10(1). P. 43-52. [in Ukrainian]

15. Prihno V.I. Optimalnoe i adaptivnoe upravlenie elektroprivodami: ucheb.posob. L.:LPI, 1988. 92 p.