

## СИНТЕЗ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОТУЖНОГО ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРИВУ ПЛАСТА

<sup>1</sup>М.М. Дранчук, <sup>1</sup>Т.О. Бербець, <sup>2</sup>В.В. Григораши

<sup>1</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727167, e-mail: kafatp@ukr.net

<sup>2</sup>Науково-дослідний і проектний інститут ПАТ «Укрнафта», 76019, м. Івано-Франківськ, Північний бульвар ім. Пушкіна, 2, тел. (03422) 48335

*Роботу присвячено створенню адаптивної системи керування процесом потужного гідравлічного розриву пласта. На основі аналізу процесу потужного гідророзриву пласта як об'єкта моніторингу і управління розроблено структурну схему технологічного процесу гідророзриву пласта. Визначено основні керуючі і керовані параметри даного процесу. Здійснено ідентифікацію процесу потужного гідророзриву пласта на основі регресійного аналізу експериментальних даних, отриманих під час мінігідравлічного розриву пласта на свердловині 430-Битків НГВУ "Надвірна нафтогаз", визначено еталонну модель об'єкта.*

*Синтезовано адаптивну систему керування на основі еталонної моделі, основним елементом якої є блок адаптації. Наведено алгоритм роботи адаптивної системи керування процесом потужного гідравлічного розриву пласта при використанні алгоритму швидкісного градієнта для інтегрального цільового функціоналу. Перехідні процеси змодельовано за допомогою програмного пакету MatLab.*

*Ключові слова: чистий тиск, перепад тиску на пакері, адаптивний пристрій, критерій якості, регресійний аналіз, еталонна модель.*

*Работа посвящена созданию адаптивной системы управления процессом мощного гидравлического разрыва пласта. По результатам анализа процесса мощного гидроразрыва пласта как объекта мониторинга и управления разработана структурная схема технологического процесса гидроразрыва пласта. Определены основные управляющие и управляемые параметры данного процесса. Осуществлена идентификация процесса мощного гидроразрыва пласта на основе регрессионного анализа экспериментальных данных, полученных при минигидравлическом разрыве пласта на скважине 430-Битков НГДУ "Надворная нефтьгаз", определена эталонная модель объекта.*

*Синтезирована адаптивная система управления на основе эталонной модели, основным элементом которой является блок адаптации. Приведен алгоритм работы адаптивной системы управления процессом мощного гидроразрыва пласта при использовании алгоритма скоростного градиента для интегрального целевого функционала. Переходные процессы смоделированы при помощи программного пакета MatLab.*

*Ключевые слова: чистое давление, перепад давления на пакере, адаптивное устройство, критерий качества, регрессионный анализ, эталонная модель.*

*This work is dedicated to creating an adaptive system for controlling over the process of a powerful hydraulic fracturing. In this paper, basing on the analysis of the process of powerful hydraulic fracturing as a object of monitoring and management the structural arrangement of hydraulic fracturing has been designed. The basic controlling and controlled parameters of the process have been defined. We've carried out the identification of the powerful hydraulic fracturing basing on the regression analysis of experimental data, obtained during the mini-hydraulic fracturing at well 430-Bytkiv NGMM "Nadvirnanafogaz", a standard model of the object has been defined.*

*We've synthesized the adaptive control system basing on a standard model, the main element of which is an adaptation unit. In this paper we've stated the adaptive system operation algorithm of the process of the powerful hydraulic fracturing when using the fast gradient algorithm for integral objective functional. Transit processes have been simulated using the software package Matlab.*

*Keywords: net pressure, pressure drop at packer, adaptive device, quality criterion, regression analysis, standard model.*

**Вступ.** У світовій практиці нафтогазовидобутку потужний гідравлічний розрив пласта (ПГРП) займає чільне місце серед методів інтенсифікації збільшення припливу нафти і газу до свердловин та їх видобутих об'ємів.

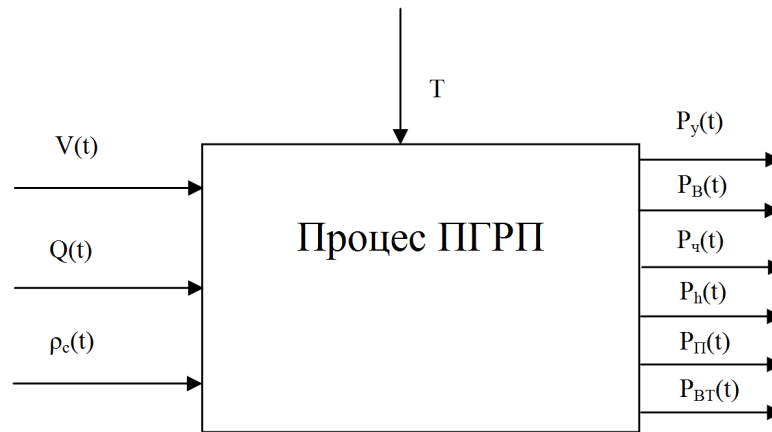
Суть ПГРП полягає у створенні і розвитку тріщин у продуктивному пласті шляхом нагнітання в свердловину рідини при високому тиску з подальшим закріпленням цих тріщин за допомогою закріплювачів. Створення нових тріщин чи розкриття існуючих можливе, якщо тиск у пласті під час нагнітання рідини з поверхні стає більшим від гірничого тиску.

Всі параметри ПГРП – об'єм, витрата і густина заповнюючої рідини, тиск на усті сверд-

ловини, гідростатичний тиск, тиск на вибої свердловини, тиск гідровитрат в насосно-компресорних трубах, перепад тиску на пакері, чистий тиск розриву пласта – виводяться на станцію контролю та управління процесом ЕС-22А СД і реєструються в пам'яті комп'ютера.

Як свідчить практика, успішність і ефективність процесу ПГРП залежить від правильного вибору параметрів управління, що надає існуюча система контролю.

У зв'язку з цим актуальною є задача створення автономної системи керування процесом ПГРП шляхом використання даних системи контролю при підготовці і проведенні процесу ПГРП.



$P_{\text{ч}}(t)$  – чистий тиск розриву пласта;  $P_{\text{h}}(t)$  – гідростатичний тиск;  $\Delta P_{\text{П}}(t)$  – перепад тиску на паркері;  $P_{\text{В}}$  – тиск на вибої свердловини;  $P_{\text{Y}}(t)$  – тиск на усті свердловини;  $\Delta P_{\text{ВТ}}$  – тиск гідровтрата в НКТ;  $V(t)$  – об'єм заповнюваної рідини;  $Q(t)$  – витрати технологічної рідини;  $\rho_c(t)$  – густина рідини розриву;  $T$  – температура на вибої

**Рисунок 1 – Структурна схема технологічного процесу ПГРП як об'єкта моніторингу і управління**

**Постановка завдання.** Мета роботи полягає у створенні адаптивної системи керування процесом підготовки та проведення ПГРП на базі існуючої системи контролю. Досягнення поставленої мети забезпечується шляхом розв'язання таких завдань:

- створення структурної схеми процесу ПГРП як об'єкта моніторингу і управління;
- вибір типу адаптивної системи;
- визначення параметрів еталонної моделі;
- вибір алгоритму для цільового функціоналу.

Методи дослідження: аналіз закордонного і вітчизняного досвіду з контролю і управління процесом ПГРП, імітаційне моделювання системи регулювання для підтвердження ефективності синтезованої системи.

**Результати.** Відомо, що за останні роки у світовій практиці нафтогазовидобутку широко застосовування набула технологія потужного гідророзриву пласта (ПГРП), яка сприяє припливу нафти і газу у пласт, що, у свою чергу, забезпечує їх додатковий видобуток.

Вдосконаленню технологій проведення ПГРП і контролю процесу ПГРП присвячено багато робіт [1, 2, 3]. Аналіз цих робіт дає можливість подати схему технологічного процесу як об'єкт моніторингу і управління (рис. 1).

Враховуючи, що процес ПГРП є нестационарним, розвивається в часі і відбувається в умовах апріорної невизначеності, обумовленої зміною умов, доцільним є застосування адаптивної системи автоматичного управління процесом.

Адаптивна система автоматичного керування – це система, яка здатна в процесі виконання основного завдання керування за рахунок зміни параметрів і структури регулятора поповнювати нестачу інформації про об'єкт керування і, діючи на зовнішні збурення, поліпшувати якість свого функціонування.

У зв'язку з цим, під час побудови адаптивних систем управління для об'єктів з неповною інформацією виникає необхідність у виконанні низки задач, а саме:

- про параметричні оцінки, тобто про ідентифікацію динамічних характеристик об'єкта управління (ОУ) з сигналами, що реально діють на його входах, і реакцій об'єкта на ці сигнали;
- оцінок внутрішніх і зовнішніх збурюючих впливів;
- обробки та аналізу отриманої інформації від системи ідентифікації;
- прийняття рішення, тобто пошуку стратегії управління шляхом зміни тих або інших характеристик системи.

Адаптивне керування ПГРП здійснюємо за допомогою двох контурів. На нижньому рівні ієрархії розташовуємо основний контур, який виконує координатне управління. Параметричне управління реалізуємо на другому контурі за допомогою адаптивного регулятора (блоку адаптації).

Блок-схему адаптивної системи з еталонною моделлю зображено на рис. 2.

Процес адаптації в такій системі при зміні зовнішніх впливів складається з трьох етапів: визначення похибки розузгодження; розрахунок регулятора; налаштування регулятора.

Процес проведення ПГРП здійснюється в два етапи. На першому етапі міні-ГРП – визначається тиск розриву і проникність пласта, гідровтрата тиску на момент закінчення нагнітання рідини у пласт, тиск закриття тріщин, уточнюються основні технологічні параметри ПГРП. На другому етапі здійснюється ПГРП, під час якого у пласт спершу нагнітається рідина розриву, пульпа (гель з пропаном), а вже потім протискуюча рідина.

Процес адаптації в такій системі при зміні зовнішніх впливів складається з трьох етапів: визначення похибки розузгодження; розрахунок регулятора; налаштування регулятора.



Рисунок 2 – Блок-схема адаптивної системи з еталонною моделлю.

Отже, дані міні-ГРП дають можливість заздалегідь визначити еталонну модель процесу ГРП, згідно з апіорною інформацією про вхідні дії.

Вихідні дані для визначення математичної моделі об'єкта, отримані у ході проведення ПГРП на свердловині 430-Битків НГВУ “Надвірнанафтогаз”, відображено у таблицях 1 і 2.

Еталонну математичну модель об'єкта знаходимо на основі експериментальних даних, наведених у таблицях 1, 2. Параметри моделі визначаємо за допомогою регресійного аналізу [4].

Математичну модель знаходимо за формулою:

$$\frac{dx_i}{dy} = \frac{1}{T_{0i}}(k_{0i}y_i - x_i), \quad (1)$$

де  $x_i, y_i$  - відповідно вхідний і вихідний параметри по  $i$ -тому параметру.

Параметри об'єкта  $k_{0i}, T_{0i}$  визначаємо як

$$k_{0i} = \frac{B_i}{1 - A_i}; \quad T_{0i} = -\frac{\Delta t_i}{\ln A_i}, \quad (2)$$

де коефіцієнти  $B_i$  і  $A_i$  знаходяться методом найменших квадратів за формулами:

$$A_i = \frac{\sum_{n=1}^N x_n x_{n-1} \sum_{n=1}^N y_{n-1}^2 - \sum_{n=1}^N x_{n-1} y_{n-1} \sum_{n=1}^N x_n y_{n-1}}{\sum_{n=1}^N x_{n-1}^2 \sum_{n=1}^N y_{n-1}^2 - (\sum_{n=1}^N x_{n-1} y_{n-1})^2}; \quad (3)$$

$$B_i = \frac{\sum_{n=1}^N x_n y_{n-1} \sum_{n=1}^N x_{n-1}^2 - \sum_{n=1}^N x_{n-1} y_{n-1} \sum_{n=1}^N x_n y_{n-1}}{\sum_{n=1}^N x_{n-1}^2 \sum_{n=1}^N y_{n-1}^2 - (\sum_{n=1}^N x_{n-1} y_{n-1})^2}, \quad (4)$$

де  $N$  – кількість вимірів.

Отримуємо

$$A_1=0,97568; B_1=0,00034;$$

$$A_2=0,498; B_2=0,0017;$$

$$k_{01} = \frac{0,00034}{1 - 0,97568} = 0,01398;$$

$$T_{01} = -\frac{15}{\ln 0,97568} = 609,24c.$$

Передавальна функція об'єкта під час ПГРП за каналом «Тиск на усті – витрата рідини розриву»

$$W_{01}(p) = \frac{0,1398}{609,246p + 1}.$$

Аналогічно визначаються передавальні функції процесу ПГРП за іншими каналами:

– за каналом «вибійний тиск – витрата рідини розриву»

$$k_{02} = 0,0034, \quad T_{02} = 21,516c.$$

$$W_{02}(p) = \frac{0,0034}{21,516p + 1}.$$

– за каналом «чистий тиск – витрата рідини розриву»

$$k_{03} = 0,0049, \quad T_{03} = 239,016c.$$

$$W_{03}(p) = \frac{0,0049}{239,016p + 1}.$$

– за каналом «перепад тиску на пакері – витрата рідини розриву»

$$k_{04} = 0,0055, \quad T_{04} = 49,422c.$$

$$W_{04}(p) = \frac{0,0055}{49,422p + 1}.$$

Запишемо еталонну математичну модель у вигляді диференціальних рівнянь:

Таблиця 1 – Експериментальні дані

Час, с	Тиск на усті Р <sub>у</sub> , МПА	Вибійний тиск Р <sub>в</sub> , МПА	Витрати, м <sup>3</sup> /хв	Час, с	Тиск на усті Р <sub>у</sub> , МПА	Вибійний тиск Р <sub>в</sub> , МПА	Витрати, м <sup>3</sup> /хв
0	14	39	0,8	240	39	54	2,1
15	16	41	1,2	255	37,5	52	2,12
30	19	43	1,12	270	38	52	2,12
45	22	45	1,2	285	39	54	2,0
60	28	51	1,84	300	46	55	2,56
75	40	64	2,0	315	45	52	2,64
90	38	61	2,0	330	44	53	2,64
105	40	62	2,0	345	43,5	53	2,64
120	40	60	2,0	360	43	51,5	2,64
135	42	62	2,08	375	43	51	2,64
150	40	60	2,08	390	42,8	51,5	2,64
165	38	57	2,0	405	43	51	2,64
180	35	55	2,4	420	44	53	2,64
195	35	55	1,84	435	44	53,5	2,72
210	40	56	2,16	465	44	53,5	2,72
225	40	55	2,0	480	44	53,5	2,72

Таблиця 2 – Експериментальні дані

Час, с	Витрати, м <sup>3</sup> /хв	Р <sub>ч</sub> , МПА	ΔР <sub>пар</sub> , МПА	Час, с	Витрати, м <sup>3</sup> /хв	Р <sub>ч</sub> , МПА	ΔР <sub>пар</sub> , МПА
0	2,0	22	40	960	2,34	7,5	42,5
60	2,1	19,5	55	1020	2,39	7,0	41,0
120	2,12	16,25	52	1080	2,40	5,0	40
180	2,14	15	50	1140	2,41	5,8	40,5
240	2,15	11	48,5	1200	2,46	4,0	40
300	2,16	9,5	45,5	1260	2,48	5,15	39
360	2,17	8,0	42	1320	4,9	6,5	38
420	2,18	7,0	40	1380	2,52	7,0	38
480	2,17	6,5	41	1420	2,5	8,4	40
540	2,15	5,0	40	1500	2,52	9,0	40
600	2,14	6,8	41,7	1560	2,57	9,6	40,5
660	2,2	7,0	42	1620	2,58	7,5	41,5
720	2,21	7,5	42,5	1680	2,58	8,0	43,5
780	2,3	7,5	42,5	1740	2,6	9,0	47,5
840	2,32	7,3	43	1800	2,6	10	53
900	2,36	8,0	43	1920	2,6	18,5	54

$$\begin{cases} 609,24 \frac{dx_1(t)}{dt} + x_1(t) = 0,01398u(t); \\ 21,516 \frac{dx_2(t)}{dt} + x_2(t) = 0,0034u(t); \\ 239,016 \frac{dx_3(t)}{dt} + x_3(t) = 0,0049u(t); \\ 49,422 \frac{dx_4(t)}{dt} + x_4(t) = 0,055u(t). \end{cases} \quad (5)$$

Еталонну математичну модель ПГРП можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax_e(t) + Bu(t) + F\omega(t); \\ x(t_0) &= x_0; t = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

де A, B, F – задані матриці чисел;  
 $x_e(t)$  – вектор стану об’єкта управління;  
 $u(t)$  – вектор керуючих дій;  
 $\omega(t)$  – випадкові процеси в каналах управління.

Рівняння автоматичних регуляторів такі:

$$U_j(t) = k_p^j \Delta y_j + \frac{k_p^j}{T_i^j} \int_0^t \Delta y_j dt, \quad (7)$$

де  $k_p^j, T_i^j$  – параметри налаштування регулятора.

У випадку зміни властивостей об'єкта під час роботи розраховані налаштування регулятора не забезпечують у подальшому необхідної якості процесу, тому виникає необхідність у пристосуванні системи до нових умов роботи. Блок порівняння постійно порівнює координати стану об'єкта і еталонної моделі. Якщо  $\varepsilon = x_e - x \neq 0$ , то сигнал надходить на блок адаптації, задача якого полягає в знаходженні алгоритму адаптації

$$r(t) = F[x(t)_0, u(t)_0] \quad (8)$$

такого, при якому для будь-якого  $\xi = \Theta$  (набір невідомих параметрів об'єкта управління) в системі досягалась мета управління.

$$I = \int_{t_0}^t (y_0^j - g_n^i)^T p (y_0^j - g_n^i) dt \rightarrow \min_{T_i^j, k_p^j} \quad (9)$$

де  $y_0^j, g_n^i$  – керовані параметри на виході об'єкта та еталонної моделі відповідно,

$T_i^j, k_p^j$  – параметри налаштування регуляторів:

$$k_p = \begin{bmatrix} k_p^1 \\ k_p^2 \\ k_p^3 \\ k_p^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,63 \\ 3,1 \\ 0,88 \\ 3,7 \end{bmatrix}; \quad T_i = \begin{bmatrix} T_i^1 \\ T_i^2 \\ T_i^3 \\ T_i^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 164 \\ 113 \\ 157 \\ 163 \end{bmatrix}$$

Щоб забезпечити задану якість регулювання, блок адаптації автоматично змінює налаштування регулятора

За шукані параметри приймаємо налаштування регуляторів  $T_i, k_p$ , що формують управляючу дію  $u(t)$ .

Перейдемо до синтезу алгоритму адаптації, в класі алгоритмів швидкісного градієнта. Запишемо інтегральний квадратичний функціонал:

$$I = \int_{t_0}^t e^T H e dt, \quad (10)$$

де  $e = e(t) = x(t) - x_e(t)$  вектор помилки,

$H$  – додатньо визначена  $n \times n$  матриця, що вибирається за заданою матрицею Гурвиця  $A_M$  з рівняння Ляпунова  $HA_M + A_M^T H = -R$ , де за  $R$  береться будь-яка симетрична додатньо визначена матриця.

Задамо градієнт  $\omega(x, u, t)$  за вхідними змінними, що в даному випадку визначається як:

$$\nabla_U \omega(x, u, t) = B^T H e. \quad (11)$$

Алгоритм зміни  $u(t)$  задамо диференціальним рівнянням:

$$\frac{du}{dt} = -\Gamma \nabla_U \omega(x, u, t), \quad (12)$$

де  $\Gamma = \Gamma^T > 0$  – симетрична додатньо визначена матриця, наприклад,

$$\Gamma = \text{diag}\{\gamma_1, \dots, \gamma_m\}, \gamma_i > 0. \quad (13)$$

Алгоритм називається алгоритмом швидкісного градієнта для інтегрального цільового функціоналу, оскільки в ньому зміна  $u(t)$  відбувається пропорційно до градієнта швидкості зміни  $I$ .

Алгоритм швидкісного градієнта в кінцевій формі має вигляд:

$$u(t) = u_0 - \Gamma \nabla_U \omega(x(t), u(t), t), \quad (14)$$

де  $u_0$  – початкові налаштування регулятора або

$$u(t) = -\Gamma B^T H e.$$

Моделювання системи управління виконується в програмному середовищі MatLab (рис. 3).

Найважливішим фактором успішності процедури ГРП є якість рідини розриву і пропанту, для закріплення тріщин у розкритому стані. Аналіз результатів застосування ГРП на різних родовищах свідчить, що кількість вдало проведених операцій гідравлічного розриву становить 80%. У решті випадків причиною не підвищення (а іноді і зниження дебіту) свердловини є неякісне формування «клин» тріщини, зумовлене надмірно малим або надмірно великим вмістом пропанту у робочій рідині. За малого вмісту пропанта існує ймовірність того, що тріщина повністю не заповниться, а за великого з'являється можливість утворення піщаної пробки. Якісно сформований клин означає успіх всієї вартісної операції.

Значний вплив на процес гідророзриву пласта має вибійна температура. Відомі рецептури технологічних рідин термонестабільні за підвищених температур (понад 70°C) – у них різко знижуються густина і в'язкість, внаслідок чого розклинюючий матеріал нерівномірно подається і розподіляється по стовбуру свердловини, а, значить, і по довжині утвореної тріщини.

Найефективнішим вирішенням цієї проблеми є отримання інформації про зміни температури безпосередньо з вибою свердловини вибійними давачами, що на даний час є дуже проблематичним. Але відомо, що вибійна температура процесу ГРП залежить від вибійного тиску, а зміна температури рідини гідророзриву, в свою чергу, впливає на її густину. Тому важливе значення має контролювання і регулювання густини пропантованої суміші у процесі закачування її у свердловину.

Процес ПГРП проводиться при закачуванні у свердловину різних технологічних рідин: ньютонівських – рідина розриву пласта, пропанту – закріплювача тріщин, пульпи.

При проектуванні адаптивної системи керування процесом ПГРП через відсутність промислових даних про зміну густини (в'язкості) рідини розриву пласта, закріплювача не було враховано зміну цих параметрів на ефективність процесу. Вибійний тиск є допоміжним параметром, що тісно пов'язаний з динамікою процесу, тому адаптивну систему слід доповнити внутрішнім контуром коректування густини суміші.

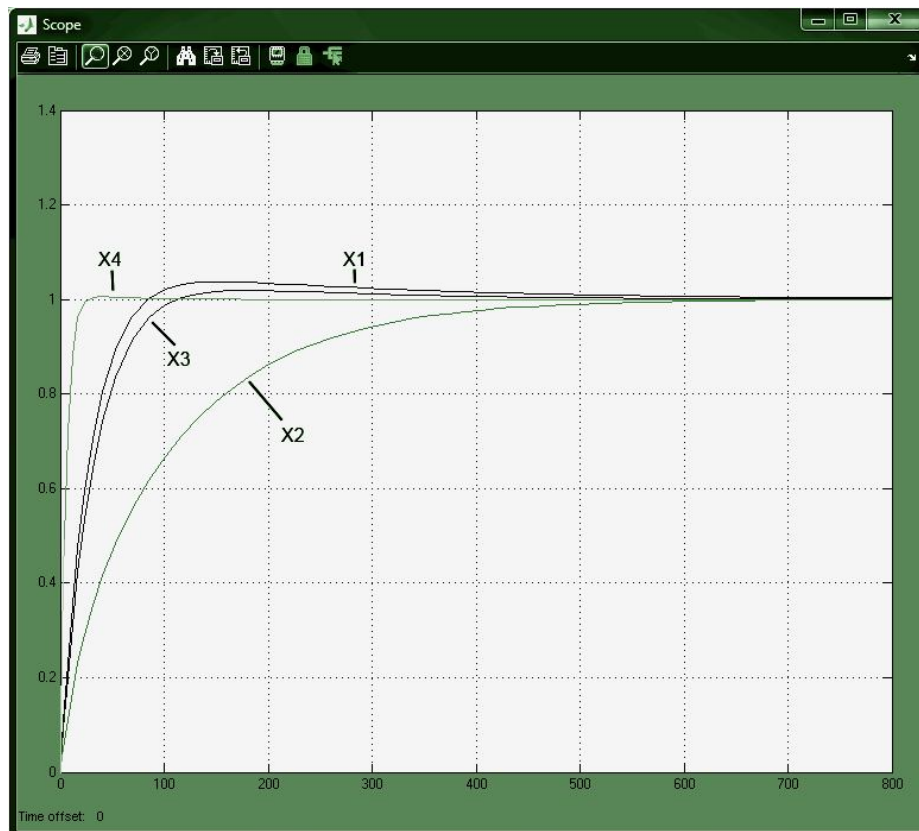


Рисунок 3 – Перехідні процеси в адаптивній системі з еталонною моделлю процесу ПГРП

### Висновки

Проведено аналіз процесу ПГРП як об'єкта моніторингу і управління. Визначено параметри еталонної моделі на основі регресійного аналізу експериментальних даних, отриманих під час міні-ГРП у свердловині 430-Битків НГВУ «Надвірнанафтогаз». Еталонну модель об'єкта визначено за каналами: «Вибійний тиск – витрата рідини розриву», «Чистий тиск – витрата рідини розриву», «Перепад тиску на пакері – витрата рідини розриву», «Тиск на усті – витрата рідини розриву».

На основі проведених досліджень розроблено алгоритм роботи адаптивної системи процесу ПГРП із еталонною моделлю при використанні алгоритму швидкісного градієнта для інтегрального цільового функціоналу.

Враховуючи, що процес ГРП є нестационарним, розвивається в часі і протікає в умовах невизначеності, з метою підвищення ефективності управління цим процесом у продовження наведених досліджень [5] доречно буде спроектувати адаптивну систему управління на базі фази-логіки. Для цього необхідно розробити базу знань та здійснити математичну формалізацію експертних знань, покладених в основу моделі.

### Література

1 Григораш В. В. Методи і засоби контролю за підготовкою та проведенням потужного гідророзриву пласта: автореферат / В. В. Григораш. – Івано-Франківськ, 2008. – 20 с.

2 Григораш В. В. Стан та проблеми контролю за підготовкою та проведенням потужного гідророзриву пласта / В. В. Григораш, Ю. Д. Качмар, М. М. Дранчук, І. С. Кісіль, Р. Т. Бондар // Методи та прилади контролю та якості. – 2007. – №18. – С. 85-89.

3 Fundamentals of engineering Supplied-Reference Handbook / [Prepared by National Council of Examiners for Engineering and Surveying]. – Fifth edition., – 2001. – 176 p.

4 Иванов А.З. Статистические методы в инженерных исследованиях первого порядка для регрессивных экспериментов / А.З. Иванов, Г.К. Круг, Г.Ф. Филаретов. – М: МЭИ, 1978. – 296 с.

5 Дранчук М.М. Удосконалена система автоматизованого контролю та керування процесом гідравлічного розриву пласта / М.М. Дранчук, А.С.Кузимків, В.В.Григораш, Т.О.Бербець – Materialy XIII Mendzynarodowej naukowo-praktyczney konferencji “Aktualne problemy nowoczesnych nauk” (2012, Przemysl) // Nauka i studia. – 2012. – С. 69-79.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
10.06.13

Рекомендована до друку  
професором **Чеховським С.А.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Петришиним І.С.**  
(ДП «Івано-Франківськстандартметрологія»,  
м. Івано-Франківськ)