

Фізико-технічні проблеми видобування енергоносіїв

УДК 681.5: 622.24

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ВИКРИВЛЕННЯ СВЕРДЛОВИНИ № 3 НОВОМИХАЙЛІВСЬКОЇ СВІТИ

М.В. Шавранський, О.В. Кучмистенко, В.І. Олійник

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 504521;
e-mail: a t p @ n u n g . e d u . u a

Наведено теоретичний опис побудови різних математичних моделей і їх ідентифікації згідно з експериментальними даними. На основі експериментальних даних свердловини №3 Новомихайлівської світи побудовано реальні моделі викривлення свердловини, а саме: кореляційна, спектральна, та вісім параметричних, а також проведена їх ідентифікація. За числовими оцінками середньоквадратичного розузгодження керуючих рішень визначено оптимальну модель вигляду $arx\ 321$. За розробленими моделями побудовано різні характеристики: перехідні, імпульсні, частотні і спектральні в програмному середовищі Matlab.

Ключові слова: викривлення, модель, характеристика, ідентифікація, свердловина, система керування, буріння, параметри.

Приведено теоретическое описание построения различных математических моделей и их идентификации согласно экспериментальных данных. По результатам экспериментальных данных скважины №3 Новомихайловской свиты построены реальные модели искривления скважины, а именно: корреляционная, спектральная и восемь параметрических, а также проведена их идентификация. По числовым оценкам среднеквадратичного рассогласования управляющих решений определена оптимальная модель вида $arx\ 321$. По разработанным моделям построены различные характеристики: переходные, импульсные, частотные и спектральные в программной среде Matlab.

Ключевые слова: искривление, модель, характеристика, идентификация, скважина, система управления, бурение, параметры.

Theoretical description of developing different mathematical models and their identification in accordance with the experimental data was provided. On the basis of the experimental data from the well No. 3 of Novomykhailivska suite actual models of the well deviation were developed and, in particular, they include: correlation, spectral, and eight parametric models. Their identification was also conducted. According to the numerical estimations of the root-mean-square error of the managing decisions, the optimum $arx\ 321$ type model was identified. Different characteristics were made on the basis of the developed models: transitional, impulse, frequency and spectral in the Matlab software environment.

Keywords: deviation, model, characteristic, identification, well, control system, drilling, parameters.

Постановка задачі. У процесі буріння всі свердловини з різних причин тією чи іншою мірою відхиляються від початкового напрямку. Цей процес називається викривленням. Ненавмисне викривлення називається природним, а викривлення свердловин за допомогою різних технологічних і технічних прийомів – штучним.

Викривлення свердловин зазвичай супроводжується ускладненнями, до яких належать: інтенсивніше зношування бурильних труб, підвищена витрата потужності, виникнення усклад-

нення у ході проведення спуско-підймальних операцій, обвалення стінок свердловини та ін. [1]. Проте у деяких випадках викривлення свердловин дає змогу значно знизити витрати засобів і часу при розробці родовищ нафти і газу. Таким чином, якщо викривлення свердловини небажане, то його прагнуть попередити, а якщо воно необхідне, то його розвивають. Цей процес називається спрямованим бурінням, яке може бути визначене як буріння свердловин з використанням закономірностей природного

викривлення за допомогою технологічних прийомів і технічних засобів для виведення свердловини в задану точку. При цьому викривлення свердловин обов'язково піддається контролю і керуванню.

У процесі буріння спрямованої свердловини необхідно знати положення кожної її точки в просторі. Для цього визначаються координати її гирла і параметри траси, до яких відносяться zenітний кут, азимут свердловини і її довжина.

Zenітний кут – це кут між віссю свердловини або дотичної до неї і вертикаллю. Азимут – це кут між напрямом на північ і горизонтальною проекцією дотичної до осі свердловини, виміряний за годинниковою стрілкою. Довжина свердловини – це відстань між гирлом і вибоєм вздовж осі.

При вирівнюванні свердловини з горизонталлю відбувається збільшення zenітного кута (буріння з підйомом кута), а з вертикаллю – зменшення (буріння з падінням кута). При викривленні свердловини вліво азимут її зменшується, а вправо – збільшується.

Відхилення свердловин від проектного положення може відбуватися унаслідок неправильного зіставлення осі свердловини при забурюванні або викривленні в процесі буріння. У першому випадку мають місце причини суб'єктивного характеру, які можуть бути легко усунені. Для цього необхідно забезпечити співвісь ліхтаря вежі, прохідного отвору ротора і осі свердловини; горизонтальність стола ротора, прямолінійності провідної труби, бурильних труб і обважнених бурильних труб (ОБТ) згідно з технічними умовами.

Аналіз викривлення нафтогазових свердловин в процесі буріння свідчить, що цей процес описується певними закономірностями, але для різних родовищ вони різні і можуть істотно відрізнятися, тому актуальним є питання розробки математичних моделей викривлення свердловини та її ідентифікації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналітичний огляд з проблематики моделювання та ідентифікації викривлення свердловин в процесі буріння показав, що таких моделей практично немає. Існуючі моделі, що використовуються, не забезпечують можливості достатньої інформаційної підтримки розпізнавання викривлення свердловини, що може призвести до виникнення аварійної ситуації в процесі буріння свердловини [2-5].

Невирішені частини загальної проблеми.

Попри інтенсивний розвиток систем контролю та керування процесом буріння свердловин, методів, що в них використовуються, а також постійно зростаючих можливостей апаратних і програмних засобів, як і раніше, залишається в цій області багато не вирішених проблем: від специфікації задач, що розв'язуються, до адекватних їм методів моделювання та ідентифікації процесів.

Необхідність проведення ідентифікації та моделювання викривлення свердловин пояснюється зростаючою складністю інформації, що моделюється у процесі буріння свердловин на нафту і газ, а також рішенням багатьох проблем в керуванні процесом буріння з обробкою неповної, неточної або неузгодженої інформації.

Формування мети статті. Ідентифікація об'єкта автоматизації загалом полягає у визначенні структури і параметрів моделі за інформацією про вхідний вплив та реакцію системи (об'єкта) на нього.

На основі експериментальних статистичних даних викривлення свердловини побудувати моделі, а саме: кореляційну, спектральну, а також параметричні і визначити коефіцієнти тобто провести їх ідентифікацію.

За числовими оцінками середньоквадратичного розузгодження керуючих рішень, визначити оптимальну модель із всіх розроблених.

Побудувати часові та частотні характеристики для розроблених моделей, що дасть змогу використати результати розрахунків при регуванні режимів буріння нафтових і газових свердловин на базі сучасних мікропроцесорних засобів контролю і управління.

Висвітлення основного матеріалу дослідження.

У процесі буріння необхідний постійний контроль за положенням осі свердловини в просторі. Тільки в цьому випадку можна побудувати геологічний розріз і визначити дійсні глибини залягання продуктивних пластів, визначити положення вибою свердловини і забезпечити попадання його в задану проектом точку. Для цього необхідно знати zenітні і азимутні кути свердловини і глибини їх вимірювань. Такі виміри проводяться за допомогою спеціальних приладів, що називаються інклінометрами.

За вимірами zenітних кутів і азимутів свердловини в окремих точках проводиться побудова фактичного профілю і плану свердловини. Фактична траса свердловини порівнюється з проектною, на підставі чого робиться висновок про можливість попадання свердловини в задане коло допуску. У випадку, якщо це попадання неможливе, ухвалюється рішення про застосування спеціальних технічних засобів спрямованого буріння з метою виведення свердловини на проектну трасу.

Вибір необхідної інтенсивності викривлення стовбура проводиться з урахуванням декількох чинників. Очевидно, що при значній інтенсивності викривлення погіршуються умови експлуатації всього устаткування та інструменту, при опусканні бурильних і обсадних колон можливі посадки і утворення жолобів. Проте довжина інтервалу викривлення в цьому випадку скорочується, що призводить до зменшення додаткових витрат часу на буріння з відхилювачем. При малій інтенсивності викривлення витрати за рахунок збільшення довжини інтервалу буріння з відхилювачем істотно вищі.

Таблиця 1 – Параметри промивальної рідини

Верх	Низ	Густина (мін), г/см ³	Густина (макс), г/см ³	Умовна в'язкість (мін)	Умовна в'язкість (макс)	Фільтрат (мін), мл/30 хв	Фільтрат (макс), мл/30 хв	Вміст піску (мін), %	Вміст піску (макс), %	СНС (мін)	СНС (макс)
	881	1,160	1,180	55	80	6,0	8,0	1,5	2,0	35-40	70-100
881	2231	1,120	1,140	22	25	6,0	6,0	1,0	1,0	10-20	20-30
2231	2936	1,140	1,160	22	25	5,0	6,0	1,0	1,0	10-20	20-30

За параметрами раніше пробурених на родовищі свердловин визначаються закономірності викривлення і вплив на нього різних чинників. Ці дані дають змогу визначити інтенсивність природного викривлення на окремих інтервалах.

Експериментальні дані свердловини №3 Новомихайлівської світи: проектна глибина – 2936 м; глибина свердловини по вертикалі – 2654 м; максимальний кут – 32 град., проектні горизонти АС 11-2; мета буріння – видобування; магнітний азимут – 179,94; зміщення – 1095,4м; альтитуда ротора – 54,36 м; категорія свердловини – II. Параметри промивальної рідини наведено в таблиці 1.

Свердловину № 3 бурили з 15.05.2014 до 29.05.2014 року. Нам відома база даних по цій свердловині, а саме: зеніт, азимут, глибина по вертикалі, відхід, відхилення, азимут до верху кола, азимут до центра кола, азимут до низу кола, зеніт на віддалений край, зеніт на центр кола, зеніт на ближній край залежно від глибини проходження свердловини.

Експериментальні дані (вибірка складає 144 позиції) обробляли в програмному середовищі Matlab (System Identification Toolbox (SIT)). Цей інструментарій дає можливість будувати і досліджувати різні типи моделей (кореляційну, спектральну, параметричні з різними параметрами «вхідних» і «вихідних» даних) [6, 7].

Моделі є математичним записом перетворення вхідного і вихідного сигналів системи.

На вихідні параметри, будь-якої реальної системи в тією чи іншою мірою діють безліч різних факторів. Ці фактори можуть мати природу перешкод (шуму), а можуть бути параметрами, про які ми не маємо уяви. До першої категорії можна віднести технічні об'єкти. У них, як правило, можна виділити вхідні дії і вихідні параметри. До другої – економічні і фінансові процеси. На рис. 1 відображено класичну динамічну систему.

На об'єкт діють вхідні сигнали u і випадкові дії e , вихідні параметри – y . Загалом сигнали u , e , y є векторами довільної розмірності.

На рис. 1б, відображена схема системи, що ідентифікується. Нам відомі значення вхідних і вихідних параметрів, виміряні з певним інтервалом часу. Отже, вхідним і вихідним сигналами є дискретні функції, тобто вхід – $u(t)$; $t = 1, 2, \dots, N$; вихід – $y(t)$; $t = 1, 2, \dots, N$.

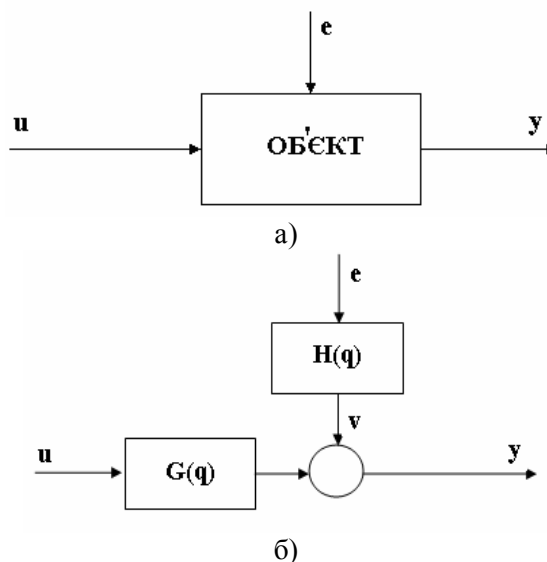


Рисунок 1 – Узагальнена модель системи

Припустимо, що сигнали зв'язані лінійно, тоді перетворення “вхід-вихід” може бути записане у вигляді

$$y(t) = G(q)u(t) + v(t), \quad (1)$$

де q – оператор зсуву;

$$G(q)u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k)u(t-k), \quad (2)$$

$$G(q) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k)q^{-k}; \quad q^{-1}u(t) = u(t-1). \quad (3)$$

Числа $\{g(k)\}$ називаються імпульсною передавальною функцією системи. Зрозуміло, що $g(k)$ є виходом системи в час k , якщо в початковий момент часу на вхід системи подається імпульс. Функція $G(q)$ називається передавальною функцією системи. Ця функція, визначена на одиничному колі ($q = e^{j\omega}$), дає частотну передавальну функцію

$$G(e^{j\omega}). \quad (4)$$

У (1) $v(t)$ – додаткова функція, що є шумом (перешкодами). Його характеристикою може бути спектральна щільність (спектр)

$$\Phi_v(\omega), \quad (5)$$

що визначається як

$$\Phi_v(\omega) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R_v(\tau)e^{-j\omega\tau}, \quad (6)$$

де $R_v(\tau)$ – коваріаційна функція шуму $v(t)$

$$R_v(\tau) = M\{v(t)v(t-\tau)\}, \quad (7)$$

M – символ математичного очікування. Альтернативно, перешкода може бути описана як відфільтровані білі шуми

$$v(t) = H(q)e(t), \quad (8)$$

де $H(q)$ – білі шуми з параметром l і

$$\Phi_v(\omega) = \lambda |H(e^{j\omega})|^2. \quad (9)$$

Разом всі наведені вище рівняння (1) – (9) дають опис часової області системи

$$y(t) = G(q)u(t) + H(q)e(t), \quad (10)$$

де G – передавальна функція системи. Вирази (4) і (5) складають опис частотної області: $G(e^{j\omega})$; $\Phi_v(\omega)$.

Імпульсна передавальна функція (3) і частотні характеристики (4-10) називаються непараметричними моделями, оскільки вони не визначені в термінах кінцевого числа параметрів.

Основний опис (10) може використовуватися і у разі безлічі змінних; тобто, система має декілька (позначимо nu) вхідних сигналів і декілька (ny) вихідних сигналів. В тому разі $G(q)$ є матрицею розмірності $ny \times nu$, а $H(q)$ $\Phi_v(\omega)$ матрицями розмірності $ny \times ny$.

Функції G і H можуть бути описані як раціональні функції від q^{-1} .

Одна з моделей, що включена до системи ідентифікації (SIT) – модель ARX (рис. 2), описується системою рівнянь

$$G(q) = q^{-nk} \cdot \frac{B(q)}{A(q)}; \quad (11)$$

$$H(q) = \frac{1}{A(q)}, \quad (12)$$

де B і A – многочлен в операторові затримки q^{-1} :

$$A(q) = a_1 + a_2q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na+1}, \quad (13)$$

$$B(q) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb+1}.$$

Тут, числа na і nb – порядки відповідних поліномів, nk – число затримок від введення (входу) до виходу. Модель зазвичай записується

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - nk) + e(t) \quad (14)$$

або явно

$$\begin{aligned} y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_{na}y(t-na) = \\ = b_1u(t-nk) + b_2u(t-nk-1) + \dots + \\ + b_{nb}u(t-nk-nb+1) + e(t) \end{aligned} \quad (15)$$

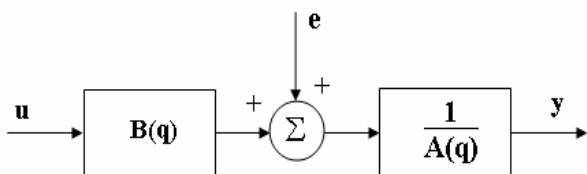


Рисунок 2 – Загальний вигляд ARX-моделі

Вирази (14) – (15) можуть бути узагальнені для випадку з багатьма змінними. Тоді $A(q)$ стане матрицею розмірності $ny \times ny$, а $B(q)$ матрицею розмірності $ny \times nu$.

Іншою головною, і більш загальною моделлю є ARMAX структура (рис. 3)

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - nk) + C(q)e(t), \quad (16)$$

де $A(q)$ і $B(q)$ визначаються згідно з (13), а

$$C(q) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc}.$$

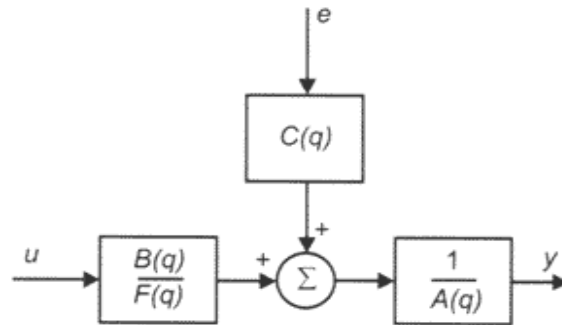


Рисунок 3 – Загальний вигляд ARMAX-моделі

Структура моделі помилки вихідної величини (ПВВ) отримана як

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t - nk) + e(t) \quad (17)$$

з

$$F(q) = 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_{nf}q^{-nf}.$$

Так звана модель Бокса-Джекинса (БД) має вигляд

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t - nk) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t), \quad (18)$$

де

$$D(q) = 1 + d_1q^{-1} + \dots + d_{nd}q^{-nd}.$$

Всі ці моделі - окремі випадки загальної параметричної моделі:

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t - nk) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t). \quad (19)$$

Параметри білого шуму $\{e(t)\}$ прийняті за 1. В межах структури (19), можуть бути фактично отримані всі лінійні моделі систем типу "чорного ящика". Так, модель ARX, очевидно, отримана при $nc = nd = nf = 0$. Структура ARMAX відповідає $nc = nf = 0$. Модель ПВВ отримана для $na = nc = nd = 0$, тоді як модель БД переписується з $nd = na = nf = 0$.

Той же самий тип моделей може бути визначений для систем з довільним числом входів. Вони мають форму

$$\begin{aligned} A(q)y(t) = \frac{B_1(q)}{F_1(q)}u_1(t-nk_1) + \dots + \\ + \frac{B_{nu}(q)}{F_{nu}(q)}u_{nu}(t-nk_{nu}) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t). \end{aligned} \quad (20)$$

Загальний підхід до опису лінійних систем полягає в тому, щоб використовувати моделі в просторі станів:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + v(t). \end{aligned} \quad (21)$$

Тут залежність між входом і виходом визначається через \mathbf{nx} -мірний вектор станів. У формі (21) передавальна функція переписується у вигляді

$$G(q) = C(qI_{\mathbf{nx}} - A)^{-1}B + D, \quad (22)$$

де $I_{\mathbf{nx}}$ – одинична матриця розмірності \mathbf{nx} . Ясно, що (21) може розглядатися як один із способів параметризації передавальної функції. За допомогою (22) $G(q)$ стає функцією матриць $A, B, C, i D$.

У SIT використовується наступна модель в просторі станів

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + Bu(t) + Ke(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + e(t). \end{aligned} \quad (23)$$

Використання цих виразів дає змогу враховувати шуми і знаходити лінеаризовані рівняння нелінійних об'єктів.

У разі (23) $G(q)$ визначається за формулою (22), а $H(q)$ –

$$H(q) = C(qI_{\mathbf{nx}} - A)^{-1}K + I_{\mathbf{ny}}, \quad (24)$$

де \mathbf{ny} – розмірність $y(t)$ і $e(t)$.

Часто можна встановити опис системи одразу в (23). У інших випадках, бажано описати спочатку шуми, які діють на систему. Це призводить до стохастичної моделі простору станів:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + Bu(t) + w(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + e(t), \end{aligned} \quad (25)$$

де $w(t)$ і $e(t)$ – стохастичні процеси з деякою мірою корельованості. В умовах стаціонарності і залежно від виду перетворення “вхід-вихід”, можна записати (25) еквівалентно (23). Тоді матриця K вибирається як фільтр Кальмана.

Часто простіше описати систему у вигляді неперервної динамічної моделі. Причина в тому, що, як правило, фізичними законами є диференціальні рівняння. Тому, моделювання фізичних явищ зазвичай веде до описів простору станів

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Fx(t) + Gu(t) \\ y(t) &= Hx(t) + Du(t) + v(t). \end{aligned} \quad (26)$$

Тут, $\dot{x}_{kT} \leq t \leq (k+1)T$, тоді залежність між $u[k]=u(kT)$ і $y[k]=y(kT)$ може бути точно виражена (21), причому

$$A = e^{FT}; B = \int_0^T e^{F\phi} G d\phi. \quad (27)$$

Неперервна динамічна модель простору станів в SIT –

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Fx(t) + Gu(t) + \tilde{K}e(t) \\ y(t) &= Hx(t) + Du(t) + e(t). \end{aligned} \quad (28)$$

Відповідність між \tilde{K} і K здійснюється на основі такого виразу

$$K = \int_0^T e^{F\phi} \tilde{K} d\phi. \quad (29)$$

Для побудови кореляційної моделі в програмному середовищі SIT вибираємо варіант Correlation Model із списку Estimate (оцінювання). В області Model Views з'явиться знак з іменем **imp** (рис. 4), що означає отримання результату ідентифікації у вигляді такої моделі:

$$\begin{aligned} A_0 \cdot y(t) + A_1 \cdot y(t-T) + \dots + A_n \cdot y(t-nT) = \\ B_0 \cdot u(t) + B_1 \cdot u(t-T) + \dots + B_m \cdot u(t-nT) + e(t) \end{aligned}$$

з параметрами A_n, B_m . Значення параметрів відображаються в командному вікні Matlab.[6] Перехідну характеристику досліджуваної кореляційної моделі зображено на рисунку 5 (синій колір), а імпульсну характеристику – на рисунку 6 (синій колір).

Повторюємо оцінювання параметрів для іншого варіанту, а саме для спектральної моделі. В результаті отримаємо оцінку системи у вигляді частотних характеристик (рис. 7).

Перейдемо тепер до ідентифікації за допомогою параметричних моделей. В результаті налаштування параметрів і їх оцінки отримаємо характеристику з іменем **arx 10101** (рис. 1, червоний колір). Це означає побудову моделі з 10-ма параметрами «вхідних» даних, 10-ма параметрами «вихідних» даних і 1-м кроком затримки (пам'яті) системи керування.

Для проведення оцінки і порівняння побудуємо ще декілька параметричних моделей (**arx 441, arx 223, arx 321, arx 222, arx 322, arx 333, arx 1062, arx 331, arxqs**), що зображено на рис. 4.

Всі характеристики і функції відповідно зображено на рисунках 5 – 9.

Виникає питання: яку з отриманих моделей прийняти як оптимальне керуюче рішення? Для відповіді порівняємо отримані моделі, вивісивши результати і рекомендації стосовно рішень, рис. 10.

Як видно за числовими оцінками середньоквадратичного розузгодження керуючих рішень, що представлені в правому вікні (рис.10), оптимальною є модель вигляду **arx 321**, рівняння якої наведено в командному вікні (рис.11).

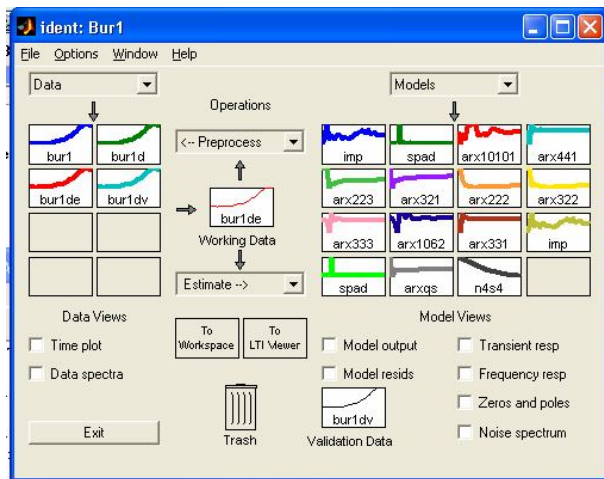


Рисунок 4 – Діалогове вікно редактора ідентифікації після формування вибірок

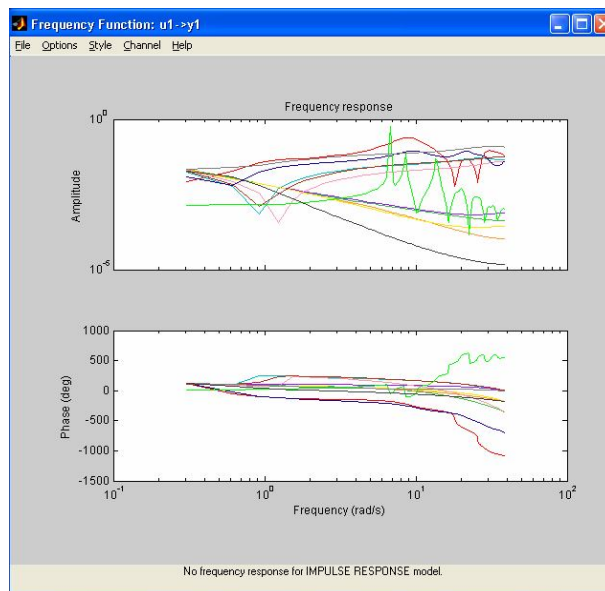


Рисунок 7 – Вікно оцінки системи у вигляді частотних характеристик

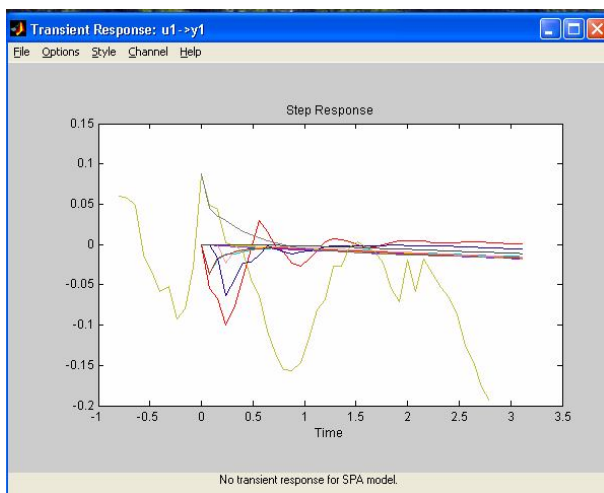


Рисунок 5 – Оцінки знайдених перехідних функцій

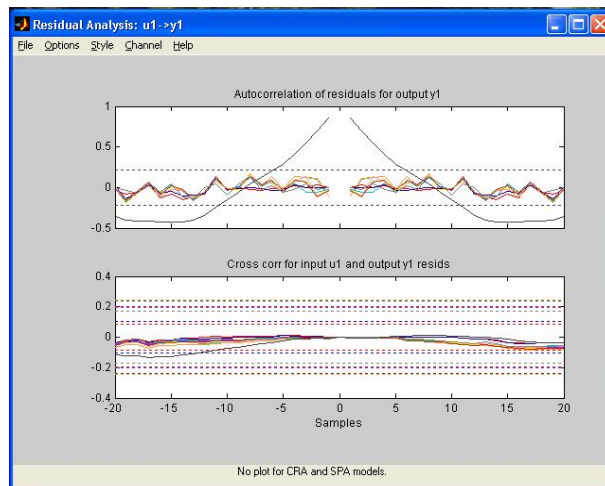


Рисунок 8 – Вікно автокореляційних функцій

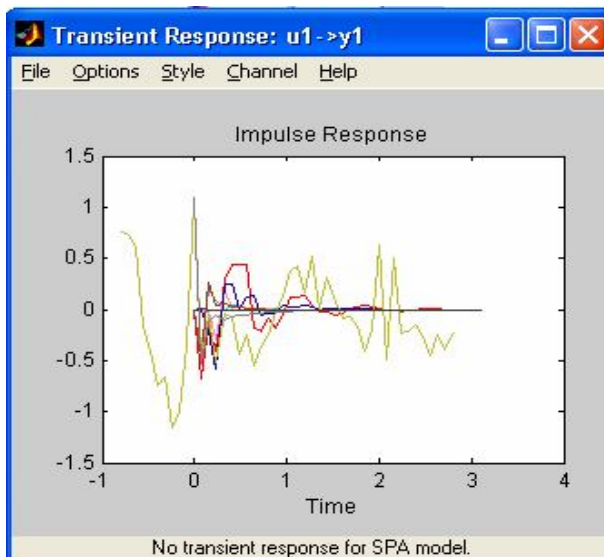


Рисунок 6 – Вікно графіків імпульсних характеристик системи

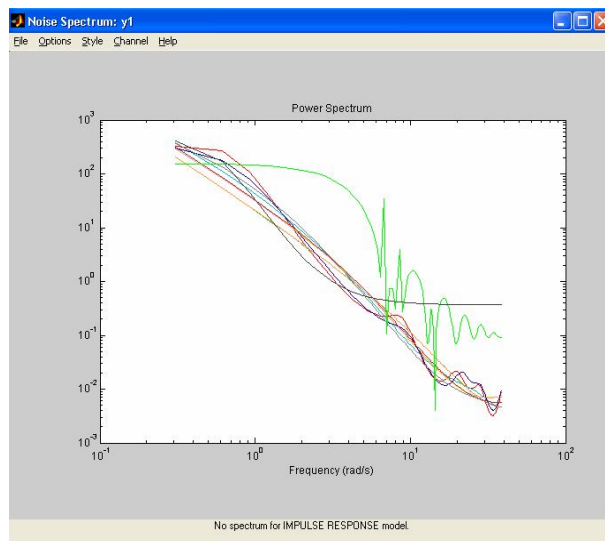


Рисунок 9 – Вікно оцінки спектральних характеристик

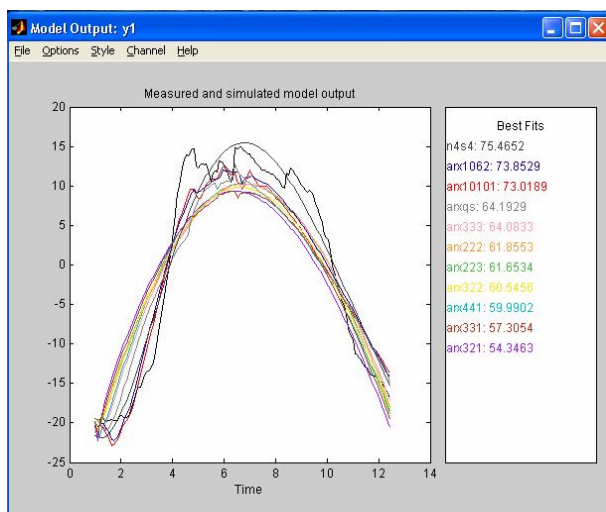


Рисунок 10 – Вікно аналізу отриманих моделей системи керування

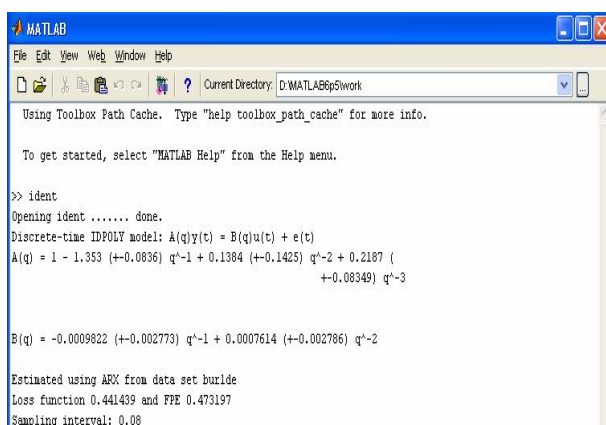


Рисунок 11 – ARX 321 (командне вікно)

Висновки

Наведено теоретичний опис побудови різних математичних моделей та їх ідентифікації згідно з експериментальними даними.

На основі експериментальних даних свердловини №3 Новомихайлівської світи побудовано реальні моделі викривлення свердловини, а саме: *кореляційна, спектральна*, а також *вісім параметричних* і проведено їх ідентифікацію. За числовими оцінками середньоквадратичного розузгодження керуючих рішень, визначено оптимальну модель вигляду **arx 321**.

Побудовано різні характеристики згідно розроблених моделей: перехідні, імпульсні, частотні і спектральні в програмному середовищі Matlab.

Результати розрахунків можуть бути використані для корегування режимів буріння нафтових і газових свердловин на базі сучасних мікропроцесорних засобів контролю і управління.

Література

- Семенов Г.Н. Автоматизация процесса бурения свердловин: [навчальний посібник]; ч. 3. – Івано-Франківськ: Факел, 1998. – 191 с.
- Hazard Identification and Risk Assessment of Skin & Eye Irritation in a Manufacturing Industry in the Philippines: Continuing Study JL Lu. – Dehradun, 2007-2009.
- Cantero, J.L.; Tardio, M.M.; Canteli, J.A.; Marcos, M.; Miguelez, M.H. (2005) Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45 (11): 1246-1255.
- Kim, D.; Ramulu, M. (2004) Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloys stacks. Composite Structures, 63 (1): 101-114.
- Dornfeld, D.A.; Kim, J.S.; Dechow, H.; Hewson, J.; Chen, L.J. (1999) Drilling burr formation in titanium alloy, Ti-6Al-4V. CIRP Annals, 48 (1): 73-76.
- Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В.Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
- Шавранський М.В. Фаззи-модельювання для прогнозування прихоплень колони бурильних труб / М.В.Шавранський // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2001. – № 1. – С. 87 - 90.

Стаття надійшла до редакційної колегії
17.09.14

Рекомендована до друку
професором **Горбійчуком М.І.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук **Воциньським В.С.**
(ТЗОВ СКБ ЗА, м. Івано-Франківськ)