

УДК 004.942 : 519.876.5

**В. А. Федорчук***Інститут проблем моделювання в енергетиці  
ім. Г. Є. Пухова НАН України***СТРУКТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ РОЗПОДІЛЕНИХ  
ЛАНОК МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ БУРОВОЇ УСТАНОВКИ**

Запропоновано метод побудови математичних моделей нелінійних розподілених ланок на основі структурного підходу.

**Ключові слова:** *структурна нелінійна модель, розподілені параметри, бурова установка.*

**Вступ.** При розв'язуванні задач проектування, оптимального управління, діагностики сучасних керованих електромеханічних систем виникає необхідність якісного аналізу системи з метою досягнення чи покращення певних, наперед заданих її характеристик.

Великий вплив на роботу таких систем мають пружні деформації у виконавчих механізмах. Це стосується таких елементів обладнання як маніпулятори роботів, протяжні тросові передачі, рамні конструкції, бурові установки та ін. При цьому, якісного керування можна досягти лише за умови врахування ефекту розподіленості параметрів та врахування нелінійних залежностей. Недостатньо точний математичний опис таких елементів приводить до значних похибок при аналізі і синтезі керованих систем, до зниження точності їх роботи, а в деяких випадках до втрати стійкості і виникненню автоколивань.

На початкових етапах синтезу системи ефективним способом її аналізу є заміна об'єкта дослідження адекватною математичною чи комп'ютерною моделлю. При цьому необхідно враховувати специфічні особливості керованих електромеханічних систем, які проявляються в присутності в них елементів різної природи. В цілому керовані електромеханічні системи є неоднорідними і, внаслідок цього, єдиного ефективного методу їх математичного опису та чисельної реалізації немає. Крім того, сучасні системи постійно удосконалюються та ускладнюються, що утруднює задачу створення адекватних математичних моделей. Виходом із цієї ситуації є застосування принципу декомпозиції, який дозволяє представити складну модель у вигляді структури з простіших елементів.

Дискретизацію складних неоднорідних систем із виділенням типових елементів можна проводити за різними принципами:

- за фізичною структурою (доцільно виділяти структурні елементи, з яких складається система – електродвигуни, генератори, різноманітні датчики, системи керування тощо);
- за характером залежностей (лінійні, нелінійні);

- за способом математичного опису (у вигляді диференціальних, інтегральних, інтегро-диференціальних рівнянь, рівнянь стану, передатних функцій та ін.);
- за вимірністю (просторово одномірні, просторово багатомірні).

Проведення класифікації типових елементів, що входять до електромеханічних систем, дає можливість для кожного класу знайти оптимальні методи моделювання.

Таким чином, при використанні структурного підходу виникають задачі, що стосуються вибору ефективних способів математичного опису та чисельної реалізації для різних груп компонент. Отримані структурні моделі будуть також неоднорідними і при їх реалізації необхідно вирішувати додаткові задачі фізичної та алгоритмічної сумісності. В кінцевому результаті застосування структурного підходу дасть можливість синтезувати моделі складних керованих електромеханічних систем із певного базового набору скалярних комп'ютерних макромоделей.

**Постановка задачі.** Типовим представником складної електромеханічної системи, яка містить розподілені ланки є привід бурової установки. Останнім часом у зв'язку з ростом глибини буріння особливої актуальності набула проблема автоматизації подачі долота. Це викликано як необхідністю створення працездатних конструкцій автоматичних регуляторів, так і необхідністю розробки теоретичних питань, пов'язаних із специфікою застосування регуляторів у бурових установках.

В процесі буріння свердловини важливою задачею є контроль за навантаженням на долото при його заглибленні в породу [1]. Відмітною рисою систем автоматичного регулювання подачі долота бурових установок є наявність розподіленої колони бурильних труб, через яку здійснюється замір забійних параметрів (осьового навантаження, швидкості переміщення долота тощо), а також передача з поверхні в забій регулюючої дії. Вплив бурильної колони проявляється в істотному спотворенні та запізненні інформації, яка отримується із забою, тому організація процесу управління подачі долота пов'язана зі значними труднощами, які зростають разом із збільшенням глибини свердловин.

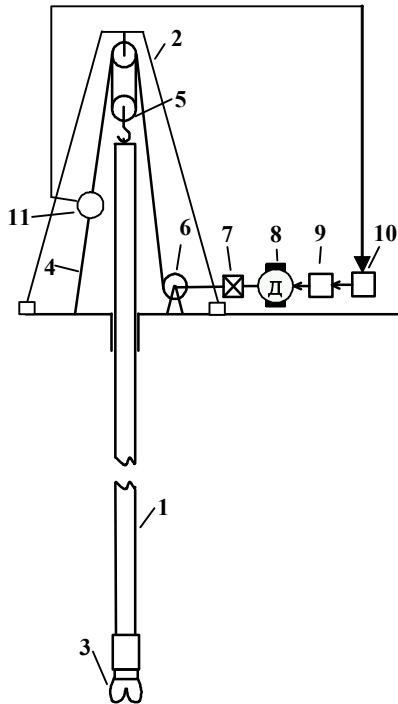
Підвищення продуктивності бурових установок може бути досягнуто шляхом покращення динамічних характеристик колони бурильних труб при передачі механічних зусиль із забою на поверхню і в зворотному напрямку, що, в свою чергу, вимагає використання її комп'ютерної моделі в автоматизованій системі керування. Застосування комп'ютерної моделі колони бурильних труб дозволить вирішити ряд важливих задач:

- підвищення техніко-економічних показників буріння за рахунок підтримки оптимального навантаження на породоруйнівний інструмент;

- контроль за процесом підйому колони бурильних труб, з урахуванням її взаємодії із промивальною рідиною та стінками свердловини з метою зменшення часу підйому;
- контроль за подачею промивальної рідини під час буріння та підйому колони;
- контроль за режимами роботи наземної системи з метою зменшення витрат енергії.

Отже, для розв'язання поставлених вище задач виникає необхідність побудови моделі, яка адекватно відтворює процеси, що відбуваються в колоні бурильних труб при різних режимах роботи.

**Основна частина.** Спрощена структурна схема механізму подачі долота бурових установок приведена на *рис. 1*, де 1 – колона бурильних труб; 2 – бурова вишка; 3 – долото; 4 – нерухомий кінець талевого канату; 5 – крюк талевої системи; 6 – барабан лебідки; 7 – редуктор; 8 – електродвигун подачі долота; 9 – силовий перетворювач; 10 – керуючий пристрій; 11 – датчик навантаження.



*Рис. 1. Схема підйомного механізму бурової установки*

На нижньому кінці колони прикладена осьова реакція забою і реакція долота, а по довжині розподілені сили ваги, в'язкого тертя,

інерції. Колони бурильних труб із врахуванням ряду припущень вважають пружним однорідним стержнем з розподіленою масою, пружністю і еквівалентним в'язким тертям.

Розглянемо способи математичного опису поздовжньої динаміки колони бурильних труб.

Швидкість змінення перерізів колони  $V(x,t)$ , яка викликана дією погонної зовнішньої сили  $F(x,t)$  описується диференціальним рівнянням в частинних похідних (1)

$$m(x) \frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial t^2} + h(x) \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} - k \frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial F(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (1)$$

з граничними та початковими умовами відповідно (2) та (3)

$$\frac{\partial V(l,t)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial V(0,t)}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial V(x,0)}{\partial t} = 0; \quad V(x,0) = 0, \quad (3)$$

де  $m(x)$  – погонна маса колони;  $h(x)$  – погонний коефіцієнт опору колони;  $k$  – коефіцієнт пружності;  $F(x,t)$  – погонна зовнішня сила;  $T(x,t)$  – погонна сила тяжіння;  $V(x,t)$  – швидкість руху перерізу колони.

Однак, якщо колона бурильних труб є неоднорідною, а також при нелінійній постановці задачі використання підходу, коли розв'язується вихідна система диференціальних рівнянь в частинних похідних, є неефективним.

Пропонується використання структурних моделей у вигляді багатомасових систем із зосередженими масами. Застосувавши метод прямих до рівняння (1) отримаємо систему з  $n$  диференціальних рівнянь (4)

$$m_i \frac{\partial^2 V_i}{\partial t^2} + h_i \frac{\partial V_i}{\partial t} - k(V_{i-1} - 2V_i + V_{i+1}) = \frac{\partial F_i}{\partial t} - \frac{\partial T_i}{\partial t}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

а після інтегрування систему рівнянь (5)

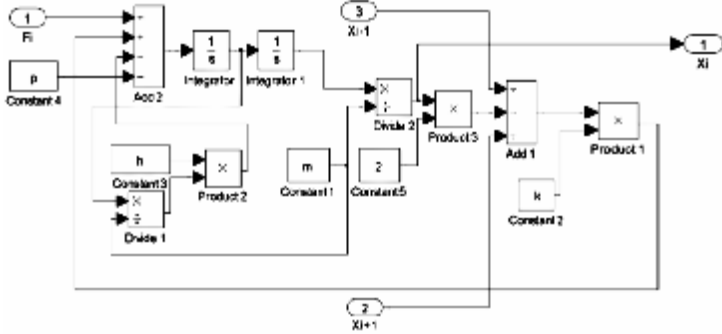
$$m_i \frac{\partial^2 x_i}{\partial t^2} + h_i \frac{\partial x_i}{\partial t} - k(x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1}) = F_i - T_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

де  $V_i$  – швидкість руху  $i$ -го елемента;  $F_i$  – зовнішня сила, що діє на  $i$ -й елемент;  $T_i$  – сила тяжіння, що діє на  $i$ -й елемент.

Отримана модель у вигляді системи диференціальних рівнянь дозволяє провести декомпозицію вихідної моделі за змінною  $x$  на  $n$  ланок. Якщо проводити декомпозицію ще і на рівні отриманих ланок, то можна виділити в її структурі величини, які мають фізичний зміст, що дає можливість реалізовувати динамічні нелінійні залежності через статичні (наприклад, використавши нелінійну залежність в ланці типу гістерезис можна відтворити в структурній моделі ефект внутрішнього тертя).

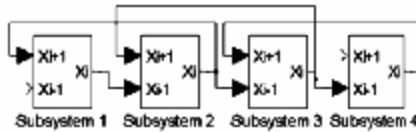
Синтез структурної комп'ютерної моделі доцільно проводити в програмному середовищі, яке підтримує візуальне структурування. Ефективним програмним засобом для розв'язування такого роду задач є додаток Simulink пакету комп'ютерної математики Matlab.

Для реалізації  $i$ -го диференціального рівняння системи (5) після еквівалентних його перетворень отримуємо структурну ланку у вигляді підсистеми simulink-моделі, приведеної на *рис. 2*.



**Рис. 2.** Структурна реалізація ланки для моделювання зосередженої маси

Отримана підсистема складає основу для синтезу структурної комп'ютерної моделі, яка реалізує систему рівнянь (5). З'єднання підсистем здійснюється у відповідності отриманих зв'язків між диференціальними рівняннями в системі рівнянь (*рис. 3*).



**Рис. 3.** Структурна реалізація багатомасової системи

Для побудови багатомасової моделі виникає питання визначення степеня дискретизації при декомпозиції вихідної моделі (1), за умови отримання необхідної точності моделі. З цією метою було проведено ряд модельних експериментів при різному числі ланок в багатомасовій моделі. Порівняння поведилося двома способами. Перший спосіб полягав в оцінці різниці між аналітично отриманою власною частотою коливань пружного стержня при ступінчатому збуренні та отриманою в результаті моделювання. Другий спосіб передбачав аналітичне обчислення часу запізнення при проходженні пружної деформації від одного кінця стержня до іншого та порівняння його з результатами модельного експерименту. Обидва способи дали однакові результати, однак при другому способі можна спостерігати і характер спотворень для отриманого результату. На *рис. 4* приведені результати моделювання при різних значеннях числа мас.

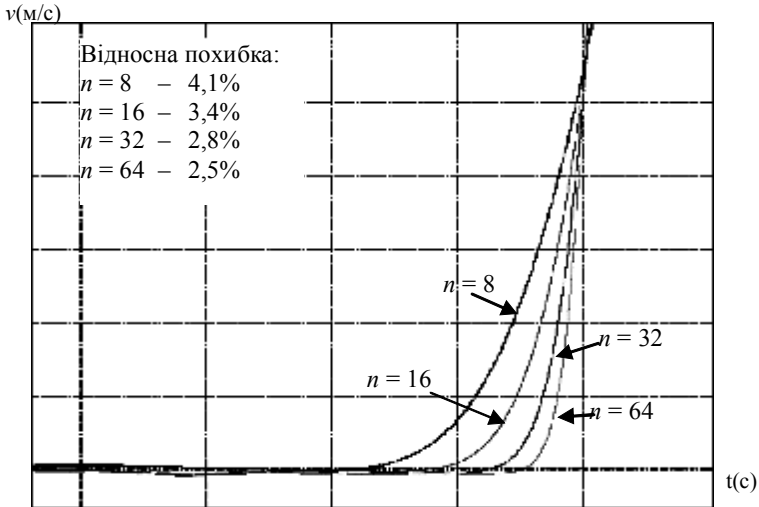


Рис. 4. Графіки відтворення запізнення сигналу при різній кількості мас ( $n$ )

Таким чином, виходячи з того, яка точність моделі потрібна, можна з деяким наближенням розрахувати необхідне число мас при дискретизації вихідної моделі.

Описану методику моделювання застосуємо для побудови структурної комп'ютерної моделі підйомного механізму бурової установки. При цьому враховуються: деформація бурової вишки при навантаженні та її інертність; сили опору, викликані взаємодією промивної рідини із стінками бурової колони; інерція стовпа промивної рідини (шламового розчину); сили при взаємодії долота з породою. Вихідні параметри моделі представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри механічної частини бурової установки

Параметр	Значення
Глибина свердловини	1472 м
Довжина секції (2 бурильні труби)	23 м
Зовнішній діаметр труби	102 мм
Товщина стінки труби	6.5 мм
Внутрішній діаметр труби	95.5 мм
Площа перерізу труби	0.004 м <sup>2</sup>
Густина речовини труби	7990 кг/м <sup>3</sup>
Маса однієї секції	741.148 кг
Коефіцієнт опору відносно швидкості секції	920 Н·с/м
Модуль Юнга для матеріалу труби	2.1 e+011 Н/м <sup>2</sup>
Густина шламового розчину	1150 кг/м <sup>3</sup>
Вага секції в шламовому розчині	6217.9 Н

Продовження таблиці 1

Параметр	Значення
Коефіцієнт жорсткості для секції	3.6823 e+007 Н/м
Маса шламового розчину	6.8271 e+003 кг
Маса вишки	15000 кг
Коефіцієнт жорсткості вишки	1.02 e+008 Н/м
Швидкість пружної деформації матеріалу труби	5.1267e+003

Для отримання необхідної точності моделі було проведено її дискретизацію з числом мас  $n = 64$ . Структурна simulink-модель подана на рис. 5. Вона складається із 64 однотипних ланок, починаючи з другої, які виконані у вигляді підсистеми, приведеної на рис. 2. Перша ланка призначена для моделювання бурової вишки, а остання ланка четвертого ряду відтворює процеси взаємодії долота з породою та вплив інерції промивної рідини. Також в simulink-моделі присутні модулі для генерації вхідних впливів та для реєстрації і відображення результатів.

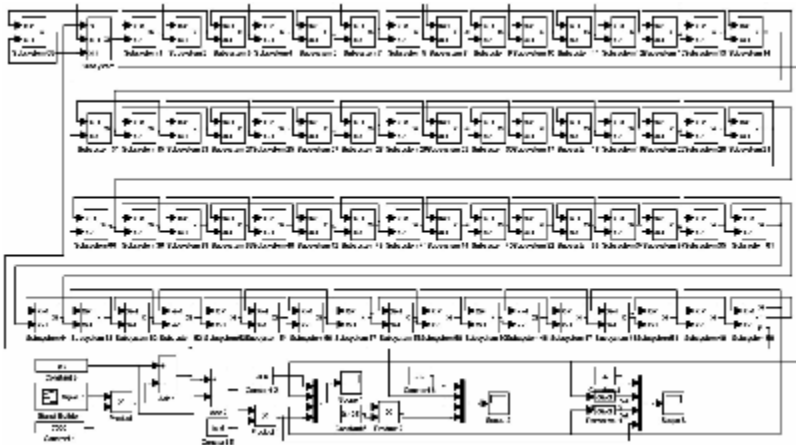


Рис. 5. Структурна модель механічної розподіленої частини бурової установки

За допомогою створеної simulink-моделі було проведено дослідження процесу спуску колони бурильних труб при ідеалізованому стрибкоподібному зменшенні сили дії талевого блоку, що утримує колону в положенні рівноваги. При цьому фіксувалось зміщення верхнього та нижнього кінців колони. Результати моделювання приведені на рис. 6. З графіка, що відображає зміщення нижнього кінця колони видно момент контакту долота з дном свердловини та невеликий відрив ("підскок" близько 0,02 м) в результаті вивільнення потенціальної енергії стиснутої колони.



**Рис. 6.** Графіки відтворення процесів при спуску бурильної колони

Для контролю за навантаженням, яке виникає на нижньому кінці колони бурильних труб і яке неможливо зареєструвати датчиками можна також використовувати побудовану комп'ютерну модель. Вхідним параметром для моделі є функція зміни в часі навантаження на крюку талевого блоку. Оскільки в наземній системі присутній датчик навантаження 11 (рис. 1), то за його показами можна обчислити реальне навантаження на крюку талевої системи. Вихідним параметром моделі є величина сили взаємодії долота з дном свердловини.

При проведенні обчислювального експерименту було вибрано режим стрибкоподібного зменшення навантаження на крюку талевої системи відносно сили, яка утримувала колону в положенні рівноваги. Утримуючу силу під час експерименту було зменшено на 7500 Н в момент, коли колона знаходилась на висоті 0,38 м від дна свердловини. Припускалось, що колона повністю занурена в шламовий розчин. В результаті експерименту було отримано графік зміни навантаження на нижньому кінці колони (долоті) при його контакті з дном свердловини (рис. 7). Максимальне навантаження спостерігалось в момент контакту долота з дном свердловини (близько 40 000 Н), однак після завершення перехідних процесів навантаження становило 7500 Н, що відповідає значенню зменшення сили на крюку.

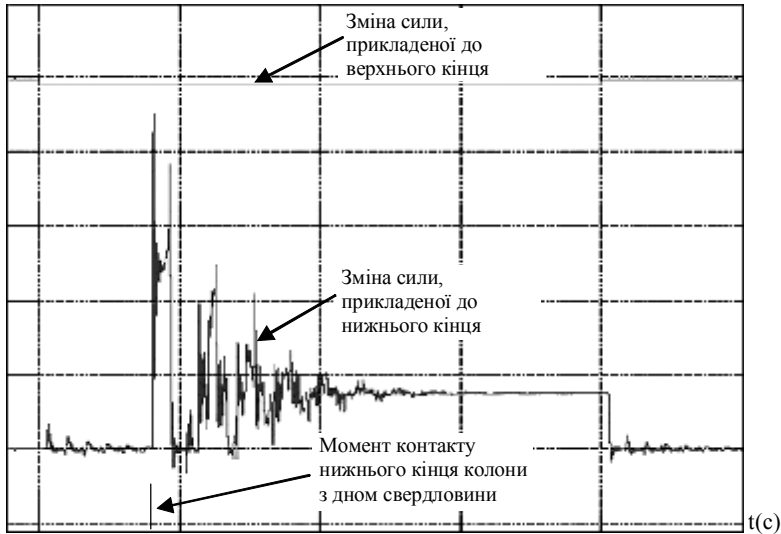
**Висновки.** Таким чином, отримана структурна модель дозволяє проводити якісне дослідження основних режимів при спуско-підйомних роботах при бурінні свердловин. Структурні моделі на основі



багатомасових систем мають перевагу над моделями, що побудовані на основі однорідних систем з розподіленою масою в плані відносно простого їх доповнення новими залежностями (в тому числі і нелінійними).

Перспективним напрямком удосконалення моделі бурової колони є її доповнення описом динаміки обертальних рухів, взаємодії долота з породою тощо.

$F(n)$



**Рис. 7.** Графіки відтворення навантаження на верхньому і нижньому кінці колони при спуску колони в шламовому розчині

### Список використаних джерел:

1. Карпенко В. М. Математична модель системи автоматичного управління і оптимізації процесу буріння // Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. пр. ШМЕ НАН України: Зб. наук. пр. – Вип. 6. – 2000. – С.160-169.
2. Киселев Н. В., Мяздель В. Н., Рассудов Л. Н. Электроприводы с распределенными параметрами. – Л.: Судостроение, 1985. – 220 с.

The method of synthesis of mathematical models of the nonlinear distributed units on the basis of the structural approach is offered.

**Key words:** *structural non-linear model, distributed arguments, drill unit.*

Отримано: 04.06.2008