

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-45-51>

УДК 622.7: 534

МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЗМУ ВЗАЄМОДІЇ БУРОВОГО ДОЛОТА З ГІРСЬКОЮ ПОРОДОЮ

Моркун В.С., Моркун Н.В., Бобров Є.Ю., Грищенко Я.О.

MODELING THE MECHANISM OF INTERACTION BETWEEN A DRILL BIT AND ROCK

Morkun V.S., Morkun N.V., Bobrov E.Y., Hryshchenko Y.O.

У дослідженні виконано моделювання основних складових взаємодії бурового долота з гірською породою при бурінні свердловин в процесі розробки рудних покладів для формування інформаційної бази автоматизованого керування буровою установкою. При обертальному способі буріння має місце реалізація п'яти механізмів взаємодії робочого органу установки з гірською породою: втискання інструменту; зріз шару породи; ударне сколювання породи; тертя інструменту об стінки свердловини; видалення бурового щламу із вибою. Наведені механізми взаємодії робочого органу бурової установки з гірською породою призводять до складної динаміки рухів її основних функціональних блоків, що включає обертальні та поступальні складові. Її динамічна модель може бути представлена у вигляді сукупності з'єднаних елементарних базових коливальних блоків, що складаються з пружини (засобу для зберігання потенційної енергії), маси або інерції (засобу для зберігання кінетичної енергії) та демпфера (засобу, за допомогою якого енергія поступово губиться). Математичну модель бурової установки можна представити рівнянням руху приводної системи в надземній частині, рівнянням руху бурового інструменту в свердловинній частині та рівнянням взаємодії долота з гірською породою. Механізм руйнування гірської породи в процесі буріння свердловин носить яскраво виражений динамічний характер енергоємної контактної взаємодії, впродовж якої кожен елемент долота є джерелом високоамплітудних віброакустичних коливань, які в сукупності характеризують цей процес. Запропоновано моделі як обертальної, так і поступальної складових взаємодії. Супутнім ефектом обертальної складової є «прихват-прослизання» бурового інструменту, яке відбувається, коли механізм зачеплення бурового

долота з пластом має нелінійний характер. Це змушує всю бурову колону ковзати або зупинятися. Однак, якщо накопичена крутильна енергія досягне певного рівня, долото раптово відпускається і починає обертатися з високою швидкістю. Результуюча торсіонна біжуча хвиля передається у верхню частину системи обертання. Також змодельовано аксіальний рух основних структурних складових бурової установки в залежності від динаміки бурового інструменту.

Ключові слова: керування, автоматизація, буріння, свердловина, вібрація, моделювання, характеристики.

Вступ. Для побудови ефективної моделі процесу буріння свердловин необхідно виконати аналітичний опис динаміки складових частин бурової установки, а також моделювання функцій, що важко формалізуються та аналітично не визначаються за допомогою яких задаються характеристики взаємозв'язків «бурове долото - гірська порода».

Долото - основний інструмент, який використовується при бурінні; воно виконує руйнівальну дію щодо гірської породи при проходці свердловин. Вибір найкращого долота та умов його експлуатації є однією з проблем, з якою стикаються інженери під час буріння. Існує широкий вибір бурових долот, які використовуються відповідно до умов буріння. Проте для обертального буріння їх в основному поділяють на дві категорії: шарошечні долота та долота з фіксованими різцями [1-3].

Долота з фіксованими фрезами містять леза, вбудовані в корпус долота. Долото та леза

обертаються як єдине ціле. Це є перевагою, оскільки немає необхідності турбуватися про вихід з ладу частин, що рухаються. Крім того, через зсув дії різців, ці долота потребують меншого навантаження на робочі поверхні і можуть використовуватися для більш широкого діапазону пластів. Долота з полікристалічним алмазом PDC (Polycrystalline Diamond Compact) є поширеним типом долот з фіксованою фрезою.

Шарошечні долота мають одну або кілька шарошок з ріжучими елементами, які обертаються вздовж осі конуса при русі долота проти пласта. Зуби шарошки періодично стикаються з породою і під впливом осьового зусилля F подачі кожен із них заглиблюється на певну глибину.

Внаслідок косого удару у породі утворюється несиметрична лунка, витягнута у напрямі удару. У наступний момент, завершуючи сколювання породи прослизанням, зуб вдавлюється в лунку, що утворилася, завершуючи процес руйнування в даній точці вже під дією статичного вдавлювання.

Експериментальні дослідження та теоретичні моделі довели, що об'єм лунки для зуба у формі долота визначається як [4]

$$V_c = \left(\frac{F}{SL}\right)^2 \quad (1)$$

де V_c - об'єм лунки на одиницю ширини різця; F - сила прикладена до одного зуба; S - міцність гірської породи; L - довжина гребеня зуба.

Якщо кожен удар зуба вважається однаково ефективним, то швидкість проходки ROP можна визначити як [4]

$$ROP = \frac{4wL_tV_c}{\pi d_b^2} \quad (2)$$

де w - швидкість обертання долота; L_t - загальна довжина гребеня зуба долота; d_b - діаметр долота.

Рівняння (2) не є реалістичним виразом для ROP, оскільки воно означає, що верхньої межі ROP немає зі збільшенням навантаження на долото. Обмеження на ROP накладаються як через механічну конструкцію, так і через міркування щодо видалення шламу. Оскільки зубці прикипають глибше в пласт, навантаження розподіляється на більшу кількість зубців. Якщо припустити, що частка ваги, яка підтримується сусідніми зубцями, пропорційна загальній глибині проникнення зубців і нерозривно пропорційна їх довжині, то ROP визначається за формулою [4]

$$ROP = \left(\frac{ad_b^3S^2}{wW^2} + \frac{2c}{wd_b} - \frac{c^2 \cdot ROP}{w^2d_b^2} \right)^{-1} \quad (3)$$

де a, c - безрозмірні константи.

Загалом можна відзначити універсальність породоруйнівної дії шарошечних доліт, а саме поєднання динамічних та статичних впливів на породу та реалізацію породоруйнівних зусиль як у напрямку перпендикулярно до забою (роздавлювання), так і в площині вибою (сколювання). Можна додати, що при прослизанні шарошок на вибої відбувається ще й різання-сколювання породи. В результаті цього процесу формуються колювання різної амплітуди і частоти як у самому долоті, так і у гірському масиві.

При бурінні долотом PDC процес взаємодії породи з долотом включає різання/зсув породи, що викликає тертя між різцями та породою. При цьому кожен окремий різець відчуває різну величину та напрямки сили, залежно від його розташування на профілі долота [5].

Феноменологічна модель, запропонована у роботі [6], враховує, що ріжуча дія фрикційного долота складається як з процесу різання, так і з процесу тертя. Вважається, що компоненти крутного моменту ТОВ та навантаження на долото WOB діють на кожен різець долота. При бурінні гірських порід середня ріжуча сила T_c і середня вага, що переноситься ріжучою поверхнею, W_c є ріжучими компонентами ТОВ і WOB відповідно, а сила тертя T_f і поверхня контакту W_f є відповідними компонентами тертя. У моделі взаємодії породи з долотом як вхідні дані використовуються WOB і кутова швидкість долота w_b , а момент, що крутить, на долоті T_b ; крутний момент, пов'язаний з тертям T_f ; вага, пов'язана з тертям W_f ; крутний момент, пов'язаний з різанням T_c ; вага, пов'язана з різанням W_c , є виходами.

Рівняння для крутного моменту на долоті T_b (відображає момент нелінійного тертя, обумовлений взаємодією породи і долота), що зазнає переривчастого прослизання [5]

$$T_b = D_b W_b [\mu_{cb}(w_b) + (\mu_{sb} - \mu_{cb})e^{-\lambda|w_b|}] \quad (4)$$

де μ_{cb} та μ_{sb} - статичні коефіцієнти сухого та кулонівського тертя, λ - коефіцієнт загасання, рівний 0,9, w_b - кутова швидкість долота.

Це явище, відоме як «прихват-прослизання», відбувається, коли механізм зчеплення бурового долота з пластом має нелінійний характер [7]. Це змушує всю бурову

колону ковзати або зупинятися. Однак, якщо накопичена крутильна енергія досягне певного рівня, долото раптово відпускається і починає обертатися з високою швидкістю. Результуюча торсійна біжуча хвиля передається у верхню частину системи обертання. Однак, оскільки силова головка має сильну інерцію, вона може утримувати бурову колону, так що торсійна хвиля повертається до долота. Таким чином, долото знову зупиняється і хвиля крутного моменту повторюється, що спричиняє дуже велику та шкідливу вібрацію бурової колони. Якщо втратити контроль за цим процесом, бурова колона та долото будуть пошкоджені разом [8].

Метою роботи є моделювання механізму взаємодії бурового долота з гірською породою при бурінні свердловин в процесі розробки рудних покладів для формування інформаційної бази автоматизованого керування буровою установкою.

Викладання основного матеріалу. Для моделювання обертального руху долота в процесі його взаємодії з гірською породою використано блок тертя обертання Rotational Friction із бібліотеки Simscape® для Simulink® /MATLAB®[9]. Він відтворює функцію тертя при контакті між обертовими тілами. Крутний момент тертя моделюється як функція відносної швидкості та вважається сумою компонентів тертя Штрібека (Stribeck), Кулона та в'язкості, як показано на рис. 1 [10].

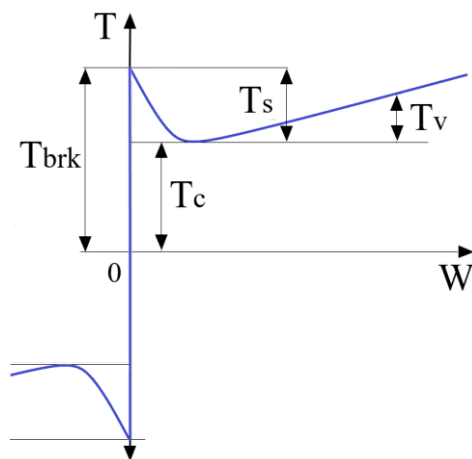


Рис. 1. Компоненти тертя обертання

Тертя Штрібека (Stribeck) T_s - це характеристики з від'ємним нахилом, що мають місце при низьких швидкостях [11]. Кулонівське тертя T_c призводить до постійного крутного моменту при будь-якій швидкості.

В'язке тертя T_v протидіє руху з крутним моментом, прямо пропорційним відносній швидкості. Сума кулонівського і стрібеківського тертя в околицях нульової швидкості визначає тертя відриву T_{brk} . Загалом тертя обертання апроксимується такими рівняннями [9,11]

$$T = \sqrt{2e} (T_{brk} - T_c) \exp\left(-\left(\frac{w}{w_{st}}\right)^2\right) \cdot \frac{w}{w_{st}} + T_c \cdot \tanh\left(\frac{w}{w_{coul}}\right) + fw \quad (5)$$

де $w_{st} = w_{brk}\sqrt{2}$; $w_{coul} = w_{brk}/10$; $w = w_R - w_C$; T - момент тертя; T_c - кулонівський момент тертя; T_{brk} - момент тертя відриву; w_{brk} - швидкість тертя відриву; w_{st} - поріг швидкості Штрібека; w_{coul} - поріг кулонівської швидкості; w_R та w_C - абсолютні кутові швидкості портів R і C блоку тертя обертання; ω - відносна швидкість; f - коефіцієнт в'язкого тертя.

Експоненціальна функція, яка використовується в частині рівняння сили Штрібека, є неперервною і спадає при величинах швидкості, більших за швидкість відривного тертя. Функція гіперболічного тангенса, яка використовується в кулонівській частині рівняння сили, гарантує, що рівняння є гладким і неперервним через $\omega = 0$, але швидко досягає свого повного значення при ненульових швидкостях.

На рис. 2 наведена модель механічної системи обертання бурового інструменту з ефектом прихват-прослизання у розширенні Simscape® для Simulink® /MATLAB® [9,12].

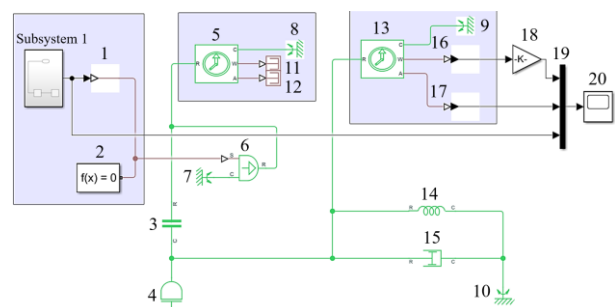


Рис. 2. Модель механічної системи обертання долота у свердловині з врахуванням ефекту прихват-прослизання

У моделі, що представлена на рис. 2, використані наступні елементи: 1 - блок Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 2 - блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 3 - блок Rotational

Friction із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 4 – блок Inertia із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 5 – блок Ideal Rotational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors; 6 – блок Ideal Angular Velocity Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sources; 7, 8, 9, 10 – блок Mechanical Rotational Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 11,12 – блоки PS Terminator із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Physical Signals / Sinks; 13 – блок Ideal Rotational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors; 14 – блок Rotational Spring із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 15 – блок Rotational Damper із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 16, 17 – блоки PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 18 – блок Gain із бібліотеки Simulink / Math Operations; 19 – блок Mux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 20 – блок Scope із бібліотеки Simulink / Sinks.

Модель включає електричну підсистему формування сигналу джерела обертання (Subsystem 1), підсистему перетворення електричного сигналу у механічний рух на основі блока 6 Ideal Angular Velocity Source і підсистему врахування механічних властивостей контактної взаємодії бурового долота із середовищем із застосуванням блока 3 Rotational Friction, блока 4 Inertia, блока 14 Rotational Spring та блока 15 Rotational Damper. Інерційний блок з'єднаний з нерухомою точкою за допомогою пружини та демпфера. Інерція приводиться в дію джерелом швидкості за допомогою фрикційного елемента ковзання. Фрикційний елемент має різницю між тертям відриву та тертям Кулона, що призводить до стрибкоподібного руху за інерцією.

На рис. 3 наведено результати моделювання режиму прихват-прослизання долота у свердловині.

Як свідчать наведені на рис. 3 графіки, в результаті виникнення режиму прихват-прослизання долота у свердловині у частотній картині кутової швидкості долота з'являються нові складові, що означає відповідні зміни у спектрі цього процесу.

Для моделювання аксіальних рухів функціональних складових бурової установки, як реакції на взаємодію долота з гірською

породою, сформовано модель у розширенні Simscape® для Simulink® /MATLAB® [9], яка наведена на рис. 4.

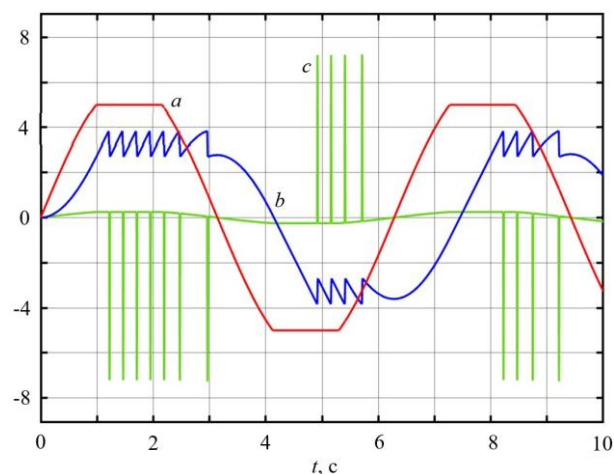


Рис. 3. Результати моделювання режиму прихват-прослизання долота у свердловині:

a – кутова швидкість джерела, rad/s (-5 0 5);
b – кутова позиція, rad (-4 0 4); *c* – кутова швидкість долота за результатами контактної взаємодії, rad/s (-150 0 150) = /0.05

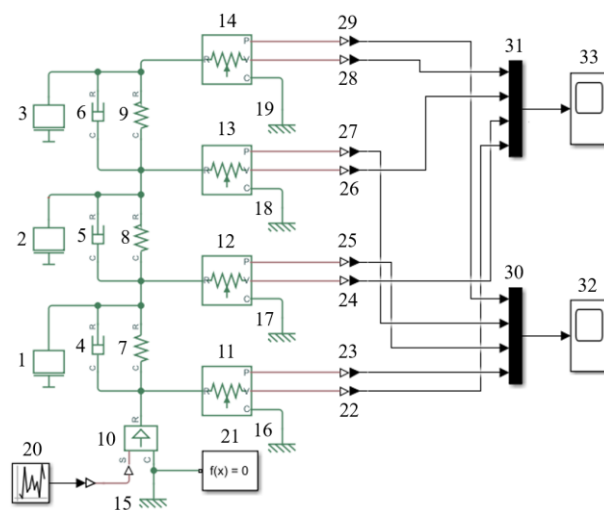


Рис. 4. Модель аксіальних рухів функціональних складових бурової установки через взаємодію долота з гірською породою

У наведеній на рис. 4 моделі використані наступні елементи: 1,2,3 – блок Mass із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 4,5,6 – Translational Damper із бібліотеки Simscape / Mechanical Translational Elements; 7,8,9 – блок Translational Spring із бібліотеки Simscape / Mechanical Translational Elements; 10 – блок Ideal Translational Velocity Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sources; 11,12,13,14 – блок Ideal

Translational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors; 15,16,17,18,19 – блок Mechanical Translational Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 20 – блок Uniform Random Number із бібліотеки Simulink / Sources; 21 – блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 22,23,24,25,26,27,28,29 – блок PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 30,31 – блок Mux із бібліотек Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Signal Routing; 32,33 – блок Scope із бібліотек Scope Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks;

Блок Translational Damper являє собою ідеальний механічний поступальний в'язкий демпфер. Блок Mass являє собою ідеальну механічну масу, що використовується при поступальному русі. Блок Translational Spring являє собою ідеальну механічну лінійну пружину.

Блок Ideal Translational Velocity Source являє собою ідеальне джерело швидкості, яке генерує диференціал швидкості на своїх терміналах, пропорційний вхідному фізичному сигналу. Джерело є ідеальним у тому сенсі, що воно вважається достатньо потужним, щоб підтримувати задану швидкість незалежно від сили, що діє на систему. Блок Ideal Translational Motion Sensor являє собою пристрій, який перетворює змінну, виміряну між двома механічними трансляційними вузлами, у керуючий сигнал, пропорційний прискоренню, швидкості або положенню. Датчик ідеальний, оскільки не враховує інерцію, тертя, затримки, споживання енергії тощо.

Блок Uniform Random Number генерує рівномірно розподілені випадкові числа протягом заданого інтервалу. Блок Mux поєднує вхідні дані з однаковим типом і складністю у віртуальний вектор. Блок Scope відображає сигнали у часовій області.

На рис. 5 наведено результати моделювання змін швидкості рухів основних структурних складових бурової установки в залежності від динаміки рухів бурового інструменту: *a* – приводний блок; *b* – свердловинна частина; *c* – блок бурового долота; *d* – вхідний сигнал.

Як свідчать наведені залежності, у частотній області механічні складові бурової установки постають природним фізичним фільтром високих частот сформованих

коливань. Таким чином, при використанні параметрів динаміки рухів долота в процесі його взаємодії з гірською породою в якості характеристичних ознак, сенсор має бути максимально наближений до джерела коливань чи використана процедура виділення відповідної складової з інтегрованого сигналу.

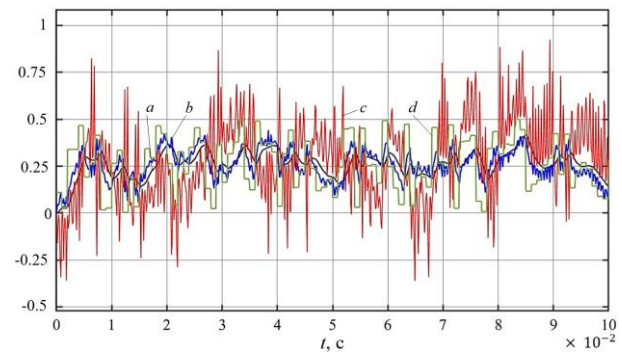


Рис. 5. Результати моделювання змін швидкості рухів основних функціональних складових бурової установки в залежності від динаміки рухів долота (нормалізовані значення): *a* – приводний блок; *b* – свердловинна частина; *c* – блок бурового долота; *d* – вхідний сигнал

Висновки. Важливим елементом процедури формування автоматизованого керування буровою установкою є моделювання динаміки руху функціональних складових бурової установки та визначення характеристичних ознак взаємодії бурового інструменту з гірською породою. Руйнування гірської породи в процесі буріння свердловин носить яскраво виражений динамічний характер енергоємної контактної взаємодії, впродовж якої кожен елемент долота є джерелом високоамплітудних віброакустичних коливань, які в сукупності характеризують цей процес. В силу значної невизначеності перебігу фізичних явищ, що відбуваються в цьому процесі з урахуванням пружних деформацій породи і зубів долота здійснити його адекватний аналітичний математичний опис практично неможливо. Отже для вирішення пов'язаних з цим проблем доцільно використати гібридний підхід, що знаходиться між стандартним фізичним моделюванням, якісними методами та нелінійною ідентифікацією за методом «чорної скриньки». Застосування такого підходу для формування ефективного автоматизованого керування процесом буріння свердловин є наступним етапом досліджень.

Література

1. Bourgoyne A. T., Millheim K. K., Chenevert M. E. and Young F. S. Rotary Drilling Bits, in Applied Drilling Engineering, SPE Textbook Series no. 2 Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers, 1986, ch. 5.
2. National Oilwell Varco. RockForce™ Bits in Products, 2014 [online]. Available: http://www.nov.com/Segments/Wellbore_Technologies/Downhole/Drill_Bits/Roller_Cone/RockForce_Bits/RockForce.aspx.
3. Liou J. The Hughes Christensen Talon PDC, 2016 [online]. Available: <http://www.drillingcontractor.org/new-bits-look-beyond-design-at-overall-wellbore16693>.
4. Warren T. M. Penetration-Rate Performance of Roller-Cone Bits. SPE Drill Eng 2, 1987, p. 9–18. doi: <https://doi.org/10.2118/13259-PA>.
5. Patil P. A., Teodoriu C. Analysis of Bit–Rock Interaction During Stick–Slip Vibration Using PDC Cutting Force Model. OIL GAS European Magazine 3/2013, p. 124–129. https://www.researchgate.net/publication/271192233_Analysis_of_Bit-Rock_Interaction_During_Stick-Slip_Vibration_Using_PDC_Cutting_Force_Model.
6. Detournay D., Defourny P. A phenomenological model for the drilling action of drag bits. International Journal of Rock Mechanics and Geomechanics.1992, vol. 29, no. 1, p. 13–23. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)91041-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)91041-3).
7. Kessai I., Benammar S., Doghmane M.Z., Tee K.F. Drill Bit Deformations in Rotary Drilling Systems under Large-Amplitude Stick-Slip Vibrations. Applied Science. 2020, 10, 6523. <https://doi.org/10.3390/app10186523>.
8. Zhou Z., Hu, Y., Liu B., Dai K., Zhang Y. Development of Automatic Electric Drive Drilling System for Core Drilling. Applied Science. 2023, 13, 1059. <https://doi.org/10.3390/app13021059>.
9. Simscape Block Libraries. <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.
10. Rotational Friction. <https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/rotationalfriction.html>.
11. Armstrong B. and C.C. de Wit. Friction Modeling and Compensation, The Control Handbook, CRC Press, 1995.
12. Mechanical Rotational System with Stick-Slip Motion. <https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/mechanical-rotational-system-with-stick-slip-motion.html>.

References

1. Bourgoyne A. T., Millheim K. K., Chenevert M. E. and Young F. S. Rotary Drilling Bits, in Applied Drilling Engineering, SPE Textbook Series no. 2 Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers, 1986, ch. 5.
2. National Oilwell Varco. RockForce™ Bits in Products, 2014 [online]. Available: http://www.nov.com/Segments/Wellbore_Technologies/Downhole/Drill_Bits/Roller_Cone/RockForce_Bits/RockForce.aspx.
3. Liou J. The Hughes Christensen Talon PDC, 2016 [online]. Available: <http://www.drillingcontractor.org/new-bits-look-beyond-design-at-overall-wellbore16693>.
4. Warren T. M. Penetration-Rate Performance of Roller-Cone Bits. SPE Drill Eng 2, 1987, p. 9–18. doi: <https://doi.org/10.2118/13259-PA>.
5. Patil P. A., Teodoriu C. Analysis of Bit–Rock Interaction During Stick–Slip Vibration Using PDC Cutting Force Model. OIL GAS European Magazine 3/2013, p. 124–129. https://www.researchgate.net/publication/271192233_Analysis_of_Bit-Rock_Interaction_During_Stick-Slip_Vibration_Using_PDC_Cutting_Force_Model.
6. Detournay D., Defourny P. A phenomenological model for the drilling action of drag bits. International Journal of Rock Mechanics and Geomechanics.1992, vol. 29, no. 1, p. 13–23. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)91041-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)91041-3).
7. Kessai I., Benammar S., Doghmane M.Z., Tee K.F. Drill Bit Deformations in Rotary Drilling Systems under Large-Amplitude Stick-Slip Vibrations. Applied Science. 2020, 10, 6523. <https://doi.org/10.3390/app10186523>.
8. Zhou Z., Hu, Y., Liu B., Dai K., Zhang Y. Development of Automatic Electric Drive Drilling System for Core Drilling. Applied Science. 2023, 13, 1059. <https://doi.org/10.3390/app13021059>.
9. Simscape Block Libraries. <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.
10. Rotational Friction. <https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/rotationalfriction.html>.
11. Armstrong B. and C.C. de Wit. Friction Modeling and Compensation, The Control Handbook, CRC Press, 1995.
12. Mechanical Rotational System with Stick-Slip Motion. <https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/mechanical-rotational-system-with-stick-slip-motion.html>.

Morkun V.S., Morkun N.V., Bobrov E.Y. Hryshchenko Y.O. Modeling of the drill bit interaction mechanism with rock

The study modeled the main components of the interaction between the drill bit and rock during well drilling in the process of ore deposit development to form an information base for automated drilling rig control. In rotary drilling, there are five mechanisms of interaction between the working body of the rig and the rock: tool penetration; cutting of the rock layer; impact chipping of the rock; friction of the tool against the borehole wall; removal of drilling mud from the bottom of the hole. These mechanisms of interaction between the working body of the drilling rig and the rock lead to complex dynamics of the movements of its main functional blocks, which include rotational and translational components. Its dynamic model can be represented as a set of connected elementary basic oscillatory blocks consisting of a spring (a means of storing potential energy), mass or inertia (a means of storing kinetic energy), and a damper (a means by which energy is gradually lost). The mathematical model of a drilling rig can be represented by the equation of motion of the drive system in the above-ground part, the equation of motion of the drilling tool in the well part, and the equation of interaction of the bit with the rock. The mechanism of rock destruction during well drilling is characterized by a pronounced dynamic nature of energy-intensive contact interaction, during which each element of the drill bit is a source of high-amplitude vibroacoustic vibrations, which together characterize this process. Models of both the rotational and translational components of the interaction are proposed. A concomitant effect of the rotational component is the "grabbing-slipping" of the drilling

tool, which occurs when the mechanism of engagement of the drill bit with the formation is nonlinear. This causes the entire drill string to slip or stop. However, if the accumulated torsional energy reaches a certain level, the bit is suddenly released and begins to rotate at high speed. The resulting torsional traveling wave is transmitted to the upper part of the rotation system. The axial movement of the main structural components of the drilling rig depending on the dynamics of the drilling tool is also modeled.

Keywords: control, automation, drilling, well, vibration, modeling, characteristics.

Моркун Володимир Станіславович – д-р техн. наук, проф., професор Криворізького національного університету (Кривий Пір), morkunv@gmail.com.

Моркун Наталя Володимирівна – д-р техн. наук, проф., професор Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів), nmorkun@gmail.com.

Бобров Євген Юрійович – аспірант Криворізького національного університету (Кривий Пір), smgrischenko@gmail.com.

Грищенко Ярослав Олександрович – аспірант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), grischenckokgtl@gmail.com.

Статтю подано 09.09.2025.