

## РОЗРАХУНОК ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТЯГОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДА РОБОЧОГО ОРГАНУ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИДОБУВАННЯ НАФТИ НА БАЗІ КОАКСІАЛЬНО-ЛІНІЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Г.М. Голенков\*, канд. техн. наук, А.В. Веремієнко  
Київський національний університет будівництва та архітектури,  
пр. Повітряних Сил, 31, Київ, 03037, Україна,  
e-mail: [gmgolenkov@ukr.net](mailto:gmgolenkov@ukr.net).

На сьогодні перспективним напрямком розвитку сфери застосування лінійних двигунів є їх використання у конструкціях свердловинних насосів. Це дає змогу значно збільшити хід робочого органу та покращити ефективність видобутку нафти порівняно з традиційно використовуваним штанго-свердловинним аналогом. Під час вирішення такої задачі складним питанням є прогнозування та забезпечення тягового зусилля протягом робочої траєкторії руху, на що і направлено проведені у роботі дослідження. Запропоновано новий підхід щодо покращення пускових характеристик лінійного двигуна шляхом збільшення конструктивним способом активного опору його бігуна на початковій ділянці його розгону. Наведені результати аналітичних розрахунків показують можливість у разі реалізації такого підходу збільшити підйомну силу двигуна приблизно в 4 рази – з 5000 кН до 20000 кН за його номінальної потужності  $P = 90$  кВт. Розроблена Simulink-модель для аналізу електромеханічних процесів при пуску лінійного двигуна із бігуном, активний опір якого змінюється вздовж його довжини за законом ступеневої функції. При цьому на початковій ділянці пуску довжиною 1,5 м цей опір має збільшене значення, а на інших ділянках, що відповідають руху бігуна в усталеному режимі, – мінімально можливе значення. За результатами проведених комп'ютерних розрахунків перехідного електромеханічного процесу показано ефективність запропонованого підходу щодо покращення пускових характеристик лінійного двигуна. Бібл. 5, рис. 6.

**Ключові слова:** лінійний асинхронний двигун, бігун, свердловинний насос, тягове зусилля, електромеханічна тягова характеристика.

**Вступ.** На сьогоднішній день Україна є однією з перспективних країн світу у плані розвитку нафтовидобувної промисловості, що викликає певну зацікавленість у чисельних інвесторів. І доки їхні інтереси обмежуються веденням активних бойових дій на території країни, основним напрямком досліджень вбачається розробка нових та вдосконалення існуючих установок видобування нафти [1]. На території України існує три нафтогазоносних регіони: Західний, Східний і Південний. При цьому переважна частина розвіданих запасів нафти та газу зосереджена в масивно-пластових покладах під регіональною комбінованою (глинисто-хемогенною) покришкою, а глибина залягання продуктивних горизонтів змінюється від 680 до 4050 м [2].

Розробка родовищ нафти проводиться шляхом будівництва нафтових свердловин та шахтним методом. За способами вилучення рідини із свердловини сучасні методи нафтовидобутку розрізняють: фонтан, коли вихід флюїду відбувається за рахунок різниці тисків у продуктивному пласті і на гирлі свердловини; ерліфт (газліфт); насосно-компресорний видобуток з використанням різних видів насосів: електровідцентрового (ЕВЦН), гвинтового (ГВН) чи штанго-свердловинного (ШСН). Найбільш продуктивним із зазначених у реальних умовах є насосно-компресорний видобуток, а найбільш використовуваним та ефективним типом насосу – ШСН, який має ряд недоліків через обмежену відстань ходу штока, велику металоємність, недостатню надійність [3]. Компенсувати такі недоліки можливо у разі застосування як приводу лінійних асинхронних двигунів (ЛАД).

Схематичне зображення електромеханічної установки для видобування нафти на базі лінійного асинхронного двигуна показано на рис. 1, де 1 – лінійний асинхронний двигун; 2 – бігун лінійного

© Голенков Г.М., Веремієнко А.В., 2024

\* ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4468-3301>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

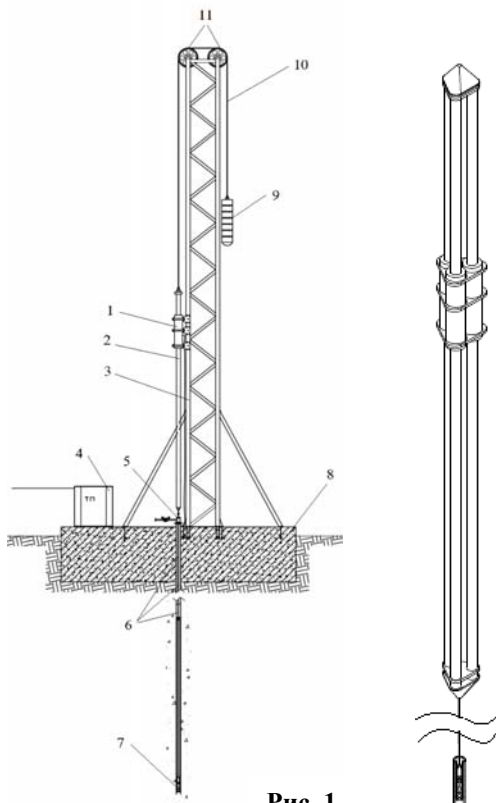


Рис. 1

асинхронного двигуна; 3 – опорна вежа; 4 – трансформатор; 5 – гирло свердловини; 6 – свердловина; 7 – насос; 8 – фундамент; 9 – протизвага; 10 – трос; 11 – система блоків.

На рис. 2 та 3 показано основні конструктивні елементи коаксіально-лінійного двигуна з тяговим елементом (бігуном) та насосом на його основі [4]. На рис. 2 позначено: 1 – бігун; 2 – магнітопровід бігуна; 3 – обмотка бігуна; 4 – корпус ЛАД; 5 – кріплення ЛАД; 6 – статор; 7 – обмотка статора; 8 – магнітопровід статора, а на рис. 3: 1 – тягова штанга; 2 – зворотні клапани; 3 – корпус свердловини; 4 – корпус насоса; 5 – плунжер.

Характерною особливістю роботи такого двигуна є робота за постійних пусках. При цьому відомо із загальної теорії електричних машин, що задля покращення пускових характеристик активний опір бігуна повинен мати відносно велике значення, в той час як після його розгону він повинен бути максимально малим для зменшення електричних втрат у бігуні. Такі умови ефективної роботи лінійного двигуна саме в установках для видобування нафти обумовлюють доцільність побудови бігуна із змінним вздовж його довжини активним опором [4]. Для практичного застосування таких систем необхідно провести попередні дослідження електромеханічних тягових характеристик коаксіально-лінійного асинхронного двигуна із змінним опором короткозамкненої обмотки бігуна, враховуючи особливості його роботи в установках видобутку нафти (рис. 1).

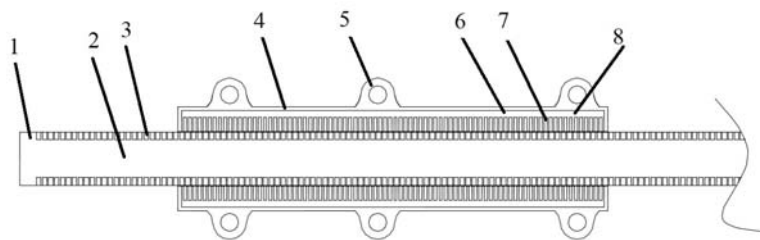


Рис. 2

Враховуючи вищесказане, метою роботи є обґрунтування методу розрахунку та дослідження електромагнітних тягових характеристик лінійних двигунів електромеханічних установок для видобутку нафти за змінного вздовж довжини активного опору бігуна та врахуванні складної траєкторії руху робочого органу.

**Розрахунок електромеханічних характеристик КЛАД приводу установки для видобування нафти за графоаналітичним методом.** Задля розрахунку електромеханічної тягової характеристики КЛАД застосовано вираз [5]

$$F_{em} = \frac{m_1 U_1^2 R'_2 / s}{v_1 \left( (R_1 + R'_2 / s + \xi R_\mu)^2 + (X_1 + X'_2 / s + \xi X_\mu)^2 \right)} + \frac{\xi m_1 U_1^2 (R'_2 / s + R_1 / (2s - 1))}{v_1 \left( (R_1 + R'_2 / s + R_1 / (2s - 1))^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right)}. \quad (1)$$

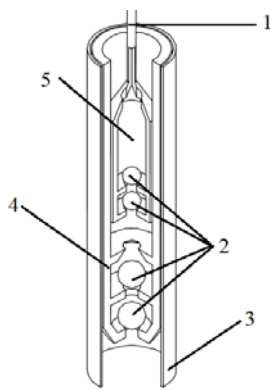


Рис. 3

Тут  $m_1$  – число фаз;  $v_1$  – швидкість бігучого магнітного поля статора;  $R_1$  – активний опір обмотки статора;  $X_1$  – індуктивний опір обмотки статора;  $R'_2$  – активний опір обмотки бігуна, приведений до обмотки індуктора статора КЛАД;  $X'_2$  – індуктивний опір розсіювання обмотки бігуна, приведений до обмотки індуктора статора КЛАД;  $R_\mu$  – активний опір контуру намагнічування магнітопроводу статора КЛАД;  $X_\mu$  – індуктивний опір контуру намагнічування магнітопроводу статора КЛАД;  $s = (v_1 - v) / v_1$  – ковзання, де  $v = (1 - s)v_1$  – швидкість переміщення двигуна;  $\xi = |\bar{I}_{H2}| / |\bar{I}_{I2}| = (2p)^{-1}$  – коефіцієнт несиметрії струму контурів бігуна КЛАД;  $H$  – висота підйому бігуна.

Подальші розрахунки проведено для КЛАД з наступними параметрами: число фаз  $m_1 = 3$ , число пар полюсів  $p = 7$ ,  $v_1 = 8,4 \text{ м/с}$ ,  $R_1 = 0,212 \text{ Ом}$ ,

$X_1 = 0,7221 \text{ Ом}$ ,  $R_2' = 0,1924 \text{ Ом}$ ,  $X_2' = 0,047 \text{ Ом}$ ,  $R_\mu = 0,667 \text{ Ом}$ ,  $X_\mu = 12,25 \text{ Ом}$ ,  $\xi = 0,07143$ ,  $H = 10 \text{ м}$ .

На основі (1) з використанням *Microsoft Excel* розраховано значення параметрів електромагнітних тягових характеристик коаксіально-лінійного двигуна  $v = f(F_{em})$  за зміни ковзання  $s = 1 \dots 0,1$  та різних опорів вторинного контуру (бігуна) КЛАД, що змінюються в діапазоні  $R_2' = 0,19 \dots 1,2 \text{ Ом}$ .

За результатами розрахунків побудовано сімейство електромеханічних тягових характеристик  $v = f(F_{em})$  за різних значеннях  $R_2' = 0,19 \dots 1,2 \text{ Ом}$  (рис. 4). Аналізуючи вид отриманих електромеханічних тягових характеристик  $v = f(F_{em})$ , для практичної реалізації вибрано тягову характеристику КЛАД з опором  $R_2' = 1,2 \text{ Ом}$ , для якої пускове тягове зусилля становить  $F_n = 26,8 \text{ кН}$ , а мінімальне тягове зусилля за ковзання  $s = 0,5$  –  $F_{min} = 26,8 \text{ кН}$ . Для цих умов номінальне навантаження дорівнює

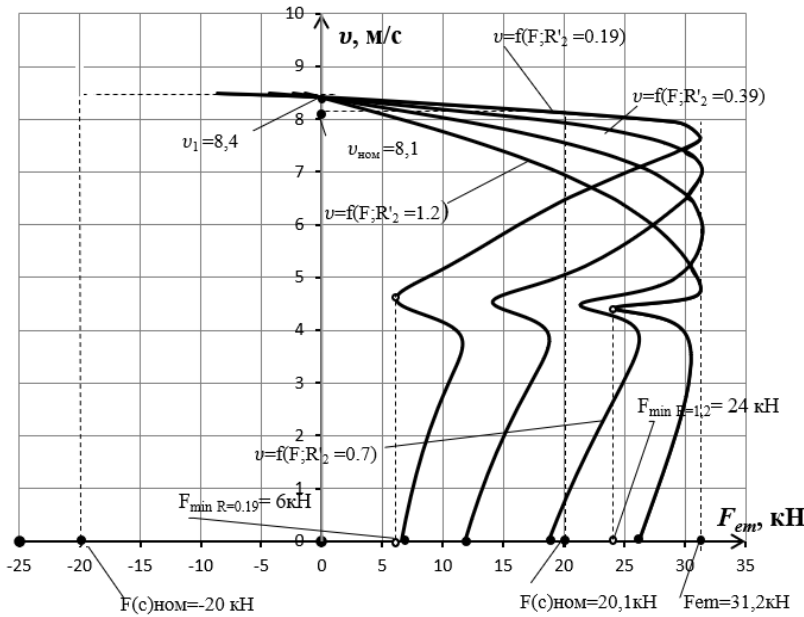


Рис. 4

$F_{(c)ном} = F_n / 1,3 = 20,1 \text{ кН}$ , номінальна швидкість –  $v_{ном} = 8,1 \text{ м/с}$ .

Розраховані механічні характеристики на рис. 4 отримано за допомогою виразу (1) і відповідають усталеному режиму роботи двигуна. В той же час лінійний двигун, що досліджується в даній роботі, працює безперервно в перехідних режимах пуску, коли бігун знаходиться у нижньому та у верхньому положеннях. Для того, щоб уточнити отримані дані, виконано комп'ютерне моделювання роботи лінійного двигуна. Розроблену за допомогою пакету *Matlab/Simulink* модель для дослідження роботи двигуна показано на рис. 5. При цьому лінійний асинх-

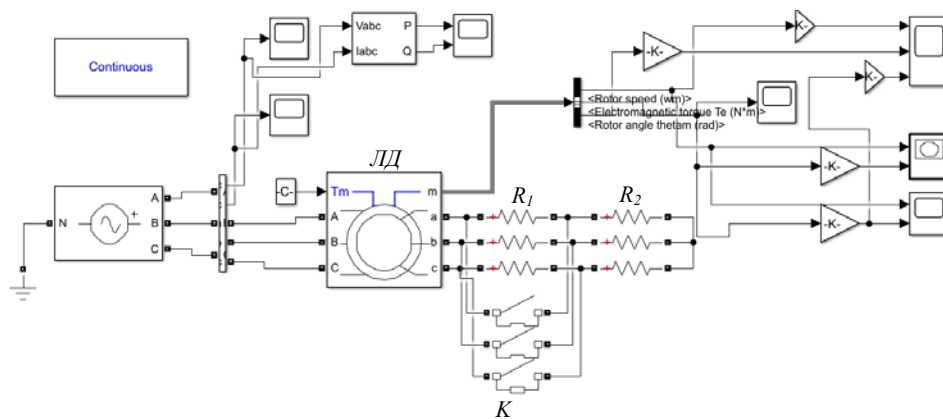


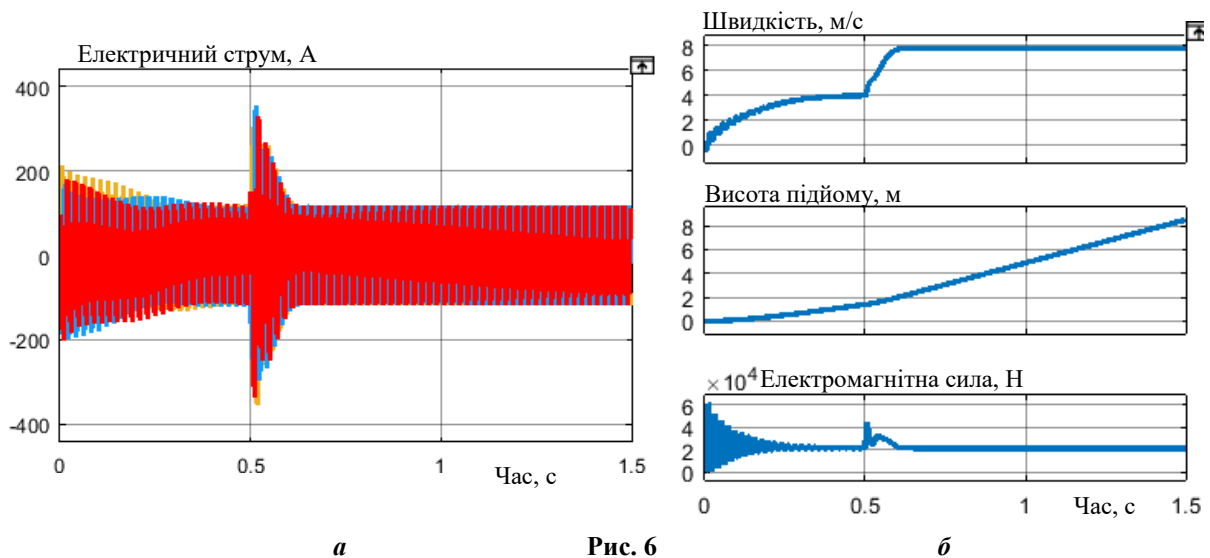
Рис. 5

ронний двигун моделюється за допомогою базової моделі еквівалентного асинхронного двигуна обертового руху, що знаходиться в бібліотеці *Simulink*. Наявність великого числа полюсів, яке дорівнює 14, дає можливість не враховувати кінцеві ефекти. В роботі моделюється режим підйому бігуна від ниж-

нього положення до найвищого під дією електромагнітної сили, що створює лінійний двигун. Задля врахування наявності змінного вздовж довжини бігуна його активного опору використовувалася модель асинхронного двигуна із фазним бігуном, активний опір якого змінюється в залежності від положення бігуна за заздалегідь вибраним законом. В моделі на рис. 5 опір бігунової обмотки в режимі пуску із нижнього положення складає  $R_1 + R_2$ , що відповідає значенню  $R_2' = 1,2 \text{ Ом}$  (див. попередній аналітичний розрахунок). В момент часу  $0,5 \text{ с}$  від початку підйому бігуна, коли він піднімається на

висоту 1,5 м, замикаються за допомогою ключа  $K$  резистивні елементи  $R1$ , і еквівалентний опір бігуна зменшується до величини, що відповідає значенню  $R'_2 = 0,19 \text{ Ом}$ .

На рис. 6 наведено результати розрахунку перехідного процесу, коли бігун під час включення двигуна починає рухатися із нижнього положення. На цьому рисунку наведено фазні струми двигуна в залежності від часу (рис. 6, *a*), швидкість та положення бігуна (висота його підйому), а також значення електромагнітної сили, що діє на цей бігун (рис. 6, *б*). Видно, що збільшений опір бігуна на початковій ділянці дає змогу зменшити пускові струми. В момент часу 0,5 с опір бігуна зменшується і це призводить до виникнення нового пускового режиму. При цьому, оскільки бігун вже має швидкість 4 м/с, ці нові "пускові" струми мають в 1,75 рази зменшене значення. За пусковий час 0,5 с бігун проходить шлях 1,5 м. Отже, для такого розрахунку це означає, що на початковій ділянці бігуна довжиною саме 1,5 м конструктивно виготовлено бігун з підвищеним опором. Після переходу на ділянку із зменшеним опором збільшується електромагнітний момент і збільшується швидкість руху бігуна із подальшим виходом на усталений режим (див. рис. 6, *б*). З цього рисунку також видно, що двигун має підвищене значення пускової сили – приблизно 20 кН (середнє значення). Отже, уточнені результати розрахунку перехідного електромеханічного процесу за допомогою розробленої комп'ютерної моделі показують ефективність запропонованого підходу щодо покращення пускових характеристик лінійного двигуна.



### Висновки.

В роботі запропоновано новий підхід щодо покращення пускових характеристик лінійного двигуна, який використовується в установках для викачування нафти, шляхом збільшення конструктивним способом активного опору бігуна такого двигуна на ділянці його розгону із найнижчого положення. Наведено результати аналітичних розрахунків, що показують можливість за реалізації такого підходу збільшити підйомну силу двигуна приблизно в 4 рази – з 5000 кН до 20000 кН за його номінальної потужності  $P = 90 \text{ кВт}$ .

Розроблено Simulink-модель для аналізу електромеханічних процесів при пуску лінійного двигуна із бігуном, активний опір якого змінюється вздовж його довжини за законом ступеневої функції. При цьому на початковій ділянці пуску довжиною 1,5 м цей опір має збільшене значення, а на інших ділянках, що відповідають руху бігуна в усталеному режимі, – мінімально можливе значення. За результатами проведених комп'ютерних розрахунків перехідного електромеханічного процесу показано ефективність запропонованого підходу щодо покращення пускових характеристик лінійного двигуна.

1. Орловський В.М., Білецький В.С., Вітрик В.Г., Сіренко В.І. Бурове і технологічне обладнання. Львів: ФОП Піча С.В., 2021. 358 с.

2. Крупський Ю.З. Західний нафтогазоносний регіон України: минуле, сучасність та перспективи. *Вісник львівського університету. Серія геологічна*. 2018. Вип. 32. С. 3–12.

3. Атлас родовищ нафти і газу України. Т. VI (Південний нафтогазоносний регіон). Львів, 1998. 223 с.
4. Богаєнко Е.М., Богаєнко М.В., Веремієнко А.В., Голенков Г.М., Попков В.С. Електродвигун зворотньо-поступового руху. Патент України на корисну модель №23757. Бюл. № 8. Опубл. 11.06.2007 р.
5. Голенков Г.М. Математичне моделювання перехідних процесів лінійних асинхронних електродвигунів. *Наукові практичні проблеми моделювання та прогнозування надзвичайних ситуацій. Збірник наукових статей*. Київ: КНУБА, 1999. С. 28–32.

## CALCULATION AND MATHEMATICAL MODELING OF ELECTROMAGNETIC TRACTION CHARACTERISTICS OF THE DRIVE WORKING AUTHORITY OF OIL EXTRACTION INSTALLATIONS ON THE BASE OF A COAXIAL-LINEAR INDUCTION MOTOR

**G.M. Golenkov, A.V. Veremienko**  
**Kyiv National University of Construction and Architecture,**  
**Povitrianyh Syl Ave., 31, Kyiv, 03037, Ukraine,**  
**e-mail: [gmgolenkov@ukr.net](mailto:gmgolenkov@ukr.net).**

*Today, a promising direction in the development of the field of application of linear motors is their use in the construction of well pumps. This makes it possible to significantly increase the stroke of the working body and improve the efficiency of oil production compared to the traditionally used rod-well analog. When solving such a problem, a difficult issue is forecasting and ensuring the traction force during the working trajectory of the movement, which is what the research conducted in the work is aimed at. As the main result, the application of the grapho-analytical method in the calculations and modeling of the characteristics of linear motors with complex trajectories of motion is substantiated. In the course of calculations with its use, the possibility of a four-fold increase in the traction force with a general improvement in the static characteristics of the engine in a given range of movement at the permissible speed of the working body was proven. References 5, figures 6.*

**Key words:** linear motor, runner, well pump, traction force, electromechanical traction characteristic.

1. Orlovsky V.M., Biletsky V.S., Vitryk V.G., Sirenko V.I. Drilling and technological possession. Lviv: FOP Picha S.V., 2021. 358 p. (Ukr)
2. Krupsky Yu.Z. Western oil and gas bearing region of Ukraine: past, present and future. *Visnyk Lvivskoho uniuersytetu. Geologichna seriia*. 2018. Vyp. 32. Pp. 3–12. (Ukr)
3. Atlas of oil and gas origins of Ukraine. Vol. VI (Pivdenny oil and gas region). Lviv, 1998. 223 p. (Ukr)
4. Bogaienko E.M., Bogaienko M.V., Veremienko A.V., Golenkov G.M., Popkov V.S. Electric motor of the gate-stepping movement. Patent UA No 23757. Bull. No 8 Published 06.11.2007. (Ukr)
5. Golenkov G.M. Mathematical modeling of transient processes of linear asynchronous electric motors. *Naukovo-praktychni problemy modeliuвання ta prognouвання nadzvychainyh sytuatsii*. Kiev: KNUBA, 1999. Pp. 28–32. (Ukr)

Надійшла 30.04.2024  
Остаточний варіант 17.06.2024