

І. В. Волошина, В. І. Мороз, В. Б. Цяпа, Л. Ф. Карплюк
Національний університет «Львівська політехніка»,
кафедра ЕКС

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРИВОДУ ПІДЙМАННЯ ЕКСКАВАТОРА-ДРАГЛАЙНА ЕШ-15/90А

© Волошина І. В., Мороз В. І., Цяпа В. Б., Карплюк Л. Ф., 2018

This article surveys an analysis of dynamic processes of hoist of the excavator-dragline type ЕШ-15/90 using computer simulation, considering the effect of sagging of the rope. A comparison of the accuracy of the obtained computer models with and without the nonlinearity of its elasticity coefficient is considered. Structural models with the use the libraries of MATLAB + Simulink mathematical program are proposed to solve this problem.

Keywords: computer simulation, dragline excavator, mining excavator electric drive, structure modeling.

Засобами комп'ютерного моделювання проаналізовано динамічні процеси електроприводу підйому екскаватора-драглайна типу ЕШ-15/90 з урахуванням ефекту провисання каната. Порівняно точність одержаних комп'ютерних моделей з урахуванням та без урахування нелінійності його коефіцієнта пружності. Для розв'язування цієї задачі запропоновано структурні моделі з використанням бібліотек математичного застосування MATLAB + Simulink.

Ключові слова: екскаватор-драглайн, екскаваторний електропривод, комп'ютерне моделювання, структурне моделювання.

Вступ

Постановка проблеми. Аналіз динаміки нелінійних систем віддавна є доволі складною задачею в дослідженнях систем керування електромеханічними об'єктами. У цьому разі, на думку авторів, перспективним є використання сучасних засобів комп'ютерного імітаційного моделювання, що потребує, однак, розв'язання задач створення математичних і комп'ютерних моделей досліджуваних об'єктів для цих засобів. Під час комп'ютерного моделювання в багатьох випадках намагаються уникати додаткового ускладнення моделей внаслідок збільшення порядку системи рівнянь, які описують поведінку об'єкта, та врахування нелінійностей досліджуваного об'єкта. Це має своє раціональне зерно, оскільки практика показує, що ускладнення моделі досліджуваної системи має свої раціональні межі, вище яких ефект покращення точності є мізерним. Таке явище зумовлене низкою факторів, які описані у відомих науково-технічних джерелах, про що йдеться нижче.

Аналіз попередніх досліджень та публікацій

Будь-яка комп'ютерна модель є апроксимацією поведінки досліджуваного об'єкта. Як відомо з прикладної математики, точність апроксимації практично перестає зростати з підвищенням її порядку вище третього-четвертого, натомість знижується числова стійкість апроксиманти [1]. Це підтверджено в роботах [2, 3], де показано неефективність апроксимацій вище 3–4-го порядків у задачах моделювання та обробки інформації. Так, відомо, що апроксимація поліномами вище п'ятого порядку на практиці не застосовується внаслідок зростання коливності апроксимації та зниження її числової стійкості [4–6]. Більше того, в роботі [7] показано, що лінійна модель п'ятого порядку забезпечує практично таку саму точність відтворення динамічних процесів, як і нелінійна

модель одинадцятого порядку. Саме тому є цікавою задачею дослідження практичного впливу ускладнення комп'ютерної моделі на точність відтворення динамічних процесів.

Ускладнення моделей часто намагаються уникати під час моделювання екскаваторних електроприводів, які традиційно відзначаються доволі складною поведінкою внаслідок наявності як високого порядку рівнянь, що описують систему керування та електромеханічну частину, так і наявності гладких і жорстких нелінійностей. Врахування таких нелінійностей, як люфти у механічних передачах, характеристики намагнічування електричних апаратів та машин дає змогу адекватніше відтворити поведінку реальних об'єктів у комп'ютерній моделі, проте відразу відчутно ускладнює як саму модель, так і процес розв'язування числовим методом внаслідок "застрягання" на розривних ділянках нелінійностей [4, 6].

Складність формування нелінійних моделей, зокрема, в екскаваторному електроприводі, підтверджується відсутністю публікацій, в яких розглядається задача врахування такої істотної нелінійності, як провисання канатів у приводах копаючих механізмів потужних екскаваторів-драглайнів. Це однаковою мірою стосується як давніших публікацій (наприклад, [8, 9]), так і сучасних наукових досліджень [10, 11]. Навіть поява таких потужних засобів імітаційного моделювання, як MATLAB + Simulink, які використані в згаданих роботах, не призвело до появи досконаліших моделей, що враховують згаданий ефект провисання канатів.

Постановка задачі

Отже, задачею досліджень є порівняння засобами комп'ютерного імітаційного моделювання динаміки екскаваторного електроприводу з урахуванням і без урахування нелінійностей механічної частини, а саме – ефекту від провисання канату. На прикладі електроприводу підймання екскаватора-драглайна ЕШ-15/90А необхідно оцінити її вплив на поведінку досліджуваної системи та зробити висновки стосовно доцільності врахування ефекту провисання канатів під час моделювання цього електроприводу.

Виклад основного матеріалу

Основним фактором, який потрібно врахувати під час створення математичного опису моделі провисання канату, є фактор його змінної пружності залежно від величини провисання. При цьому потрібно зазначити, що для провисаючого канату не виконується закон Гука. При виведенні використовують основні рівняння статички для системи, що знаходиться в рівновазі:

- сума проекцій всіх зовнішніх сил на координатні осі дорівнює нулю: $\Sigma X=0$; $\Sigma Y=0$;
- сума моментів всіх зовнішніх сил або їх проекцій для будь-якої точки дорівнює нулю: $\Sigma M=0$.

Розглянемо частину канату, розрізавши його в нижчій точці O і в будь-якій точці D з координатами $(x; y)$. Відрізані частини канату замінимо відповідними зусиллями за методикою [12, 13]: у нижній точці кривої провисання діє сила H , а в точці D – сила Tx (див. рис. 1).

Для канатів дотична до кривої провисання в будь-якій точці має малий кут з горизонтальною прямою, що дає змогу прийняти вагу цієї ділянки рівномірно розподіленою горизонтально та замінити зосередженою силою px , яка діє в середині розглянутої ділянки, тобто, на відстані $x/2$ від точок O і D , а силу Tx вважають такою, що дорівнює силі тяжіння в найнижчій точці H (рис. 1) згідно з [12, 13]. При цьому допускаємо, що канат є ідеальною гнучкою ниткою.

Напрямок дії сили H у точці D протилежний стосовно напрямку цієї самої сили в найнижчій точці кривої провисання канату, тому що внаслідок властивостей ідеальної гнучкої нитки вона може працювати тільки на розтягування. У цьому випадку рівняння моментів сил відносно точки D записують так:

$$\Sigma M_D = H \cdot y - p \cdot x \cdot \frac{x}{2} = H \cdot y - \frac{p \cdot x^2}{2} = 0.$$

Розв'язавши це рівняння відносно величини провисання y , отримаємо основне рівняння кривої провисання канату [12, 13]:

$$y = \frac{p \cdot x^2}{2 \cdot H},$$

де p – одиничне навантаження на канат; H – сила тяжіння в нижній точці кривої провисання.

У практичних розрахунках користуються не зусиллям, а напруженням у канаті σ , і не одиничним навантаженням, а питомим – γ . Підставляючи до попередньої формули $p = \gamma F$ і $H = \sigma F$, отримуємо:

$$y = \frac{p \cdot x^2}{2 \cdot H} = \frac{\gamma \cdot F \cdot x^2}{2 \cdot \sigma \cdot F} = \frac{\gamma \cdot x^2}{2 \cdot \sigma}. \quad (1)$$

Для визначення стріли провисання f_k у простішому випадку, а саме – для однакої висоти точок підвісу, потрібно підставити до формули (1) значення $x = l/2$, і тоді матимемо величину стріли провисання f_k [14]:

$$f_k = \frac{\gamma \cdot l^2}{8 \cdot \sigma} \quad \text{або} \quad f_k = \frac{T}{ql}, \quad (2)$$

де q – вага канату; T – зусилля в канаті, H .

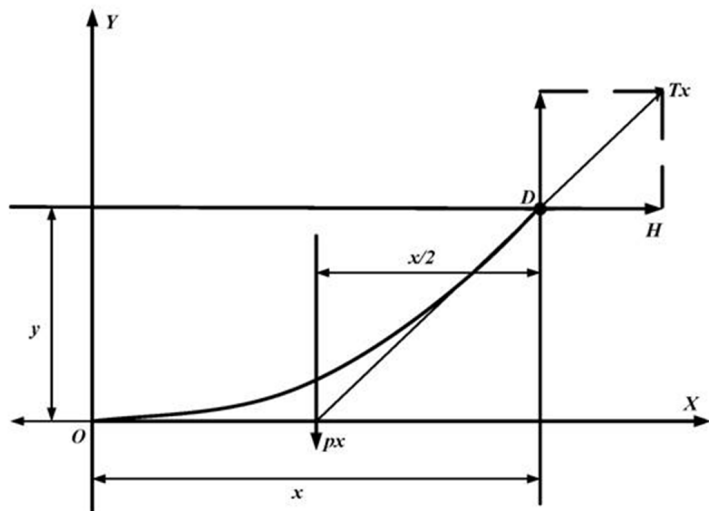


Рис. 1. Зовнішні сили, що діють на відрізок каната

Жорсткість від "слабини" від провисання канату визначають диференціюванням за довжиною [15]: $C_{нк} = \frac{dT}{dl} = 12qf_k^3$. Жорсткість канату, відповідно, є комбінацією лінійної жорсткості (за законом Гука) та нелінійної складової від провисання канату і складатиме згідно з [15]:

$$\frac{1}{C_k} = \frac{1}{C_{нк}} + \frac{1}{C_{лін}}, \quad \text{звідки} \quad C_k = C_{лін} \cdot \frac{f_k^3 \cdot \frac{12 \cdot q}{C_{лін}}}{1 + f_k^3 \cdot \frac{12 \cdot q}{C_{лін}}}. \quad (3)$$

Потрібно зазначити, що у випадку різної висоти точок підвісу крива провисання проводу буде несиметричною, і нижня точка кривої провисання проводу знаходитиметься не в середині прольоту, а ближче або до точки А, або до точки В. У цьому разі необхідно визначити три різні типи стріли провисання:

1) f_c – стрілу провисання, яка знаходиться в середині прольоту і розраховується за формулою (2) для стріли провисання за однакої висоти точок підвісу дроту;

2) f_a – стрілу провисання проводу, яка вимірюється щодо ординати нижньої точки підвісу А, знаходять за формулою:

$$f_a = \frac{\gamma \cdot a^2}{8 \cdot \sigma}, \quad (4)$$

3) f_b – стрілу провисання проводу, яку вимірюють відносно ординати вищої точки підвісу В, розраховують за формулою:

$$f_b = \frac{\gamma \cdot b^2}{8 \cdot \sigma}. \quad (5)$$

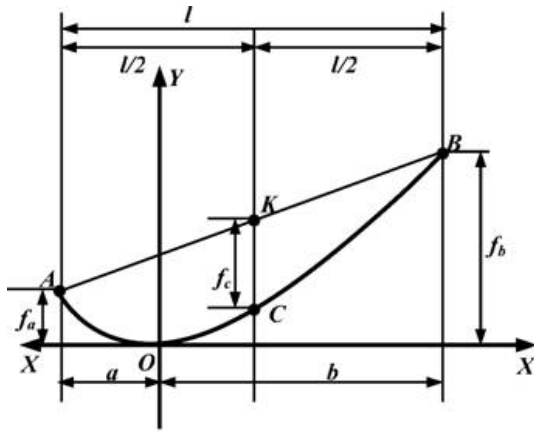


Рис. 2. Крива провисання каната з різною висотою точок підвісу

Як видно з одержаних залежностей (3)–(5), опис провисання канатів підйомно-транспортних механізмів є доволі складною математичною задачею, тому на першому етапі комп'ютерного моделювання буде логічним використання низки спрощень. У зв'язку з цим, для використаних у статті комп'ютерних моделей механічної частини прийнято такі допущення:

- канат є пружним і підлягає закону Гука;
- канат є ідеальною ниткою;
- канат має однакові точки підвісу.

У такому випадку структурна модель змінної жорсткості канату внаслідок його провисання ґрунтується на формулі (3) і матиме вигляд, як на рис. 3. Конкретні значення параметрів моделі відповідають приводу підймання екскаватора-драглайна ЕШ-15/90 включно з врахуванням параметрів механічної частини приводу.

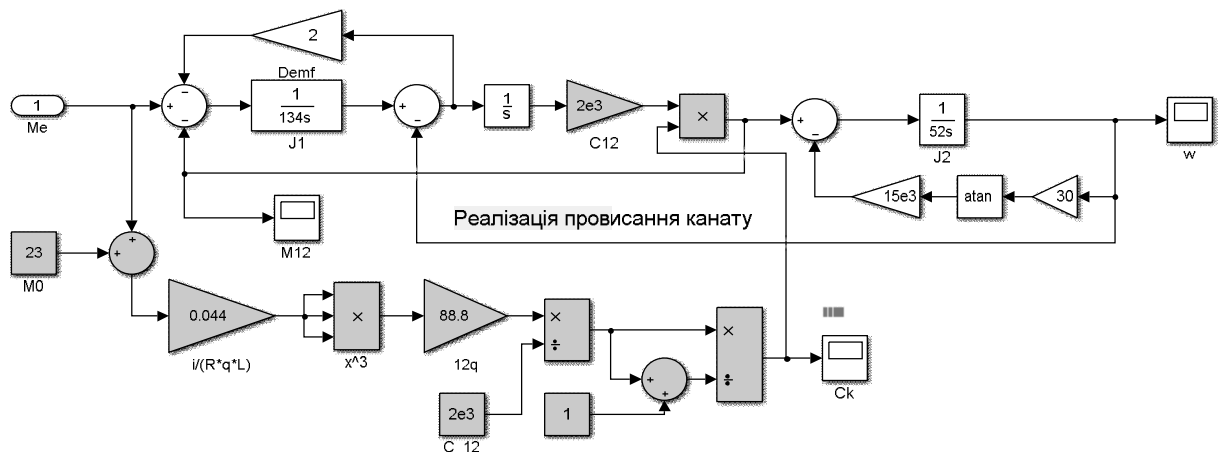


Рис. 4. Реалізація комп'ютерної моделі провисання канату за формулою (3)

Для порівняння динамічних властивостей використано стандартну двомасову модель приводу підйому з постійною пружністю, яка реалізована за відомою методикою [10, 11, 16], і тому для економії місця окремо її не показано. Допущення, які прийнято для моделі електроприводу підймання екскаватора-драглайна ЕШ-15/90, що виконаний за системою Г-Д з магнітними підсилювачами за структурою підпорядкованого регулювання, є традиційними [16]. Виконану з використанням цих допущень комп'ютерну модель показано на рис. 5. Нелінійні моделі магнітних підсилювачів реалізовано як аперіодичні ланки з обмеженням вихідної напруги, модель генератора приводу є найпростішою, тому описана ланкою першого порядку. Таке спрощення моделей елементів приводу пояснюється метою досліджень – досліджується відмінність поведінки двох типів моделей механічної частини приводу драглайна: традиційна лінійна та з врахуванням провисання канату за методикою [15] як найпростішою на першому етапі досліджень, про що вже повідомлялося вище.

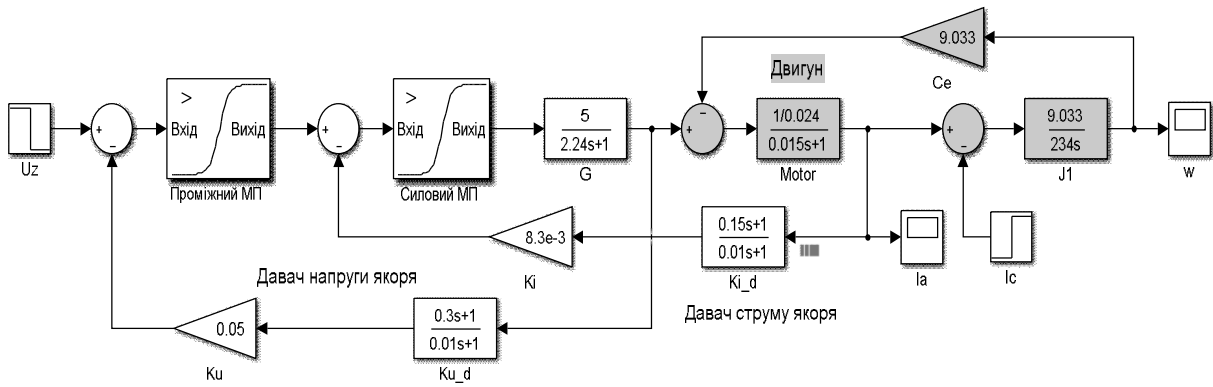


Рис. 5. Реалізація комп'ютерної моделі системи електроприводу підіймання драглайна

Повну комп'ютерну модель для порівняння обох варіантів моделей канатної системи екскаватора-драглайна показано на рис. 6. В обох моделях використано однакові моделі електроприводу підіймання екскаватора ЕШ-15/90 з однаковими завданням і навантаженням, проте, як видно з рис. 6, відмінність полягає лише в реалізації моделей механічної частини.

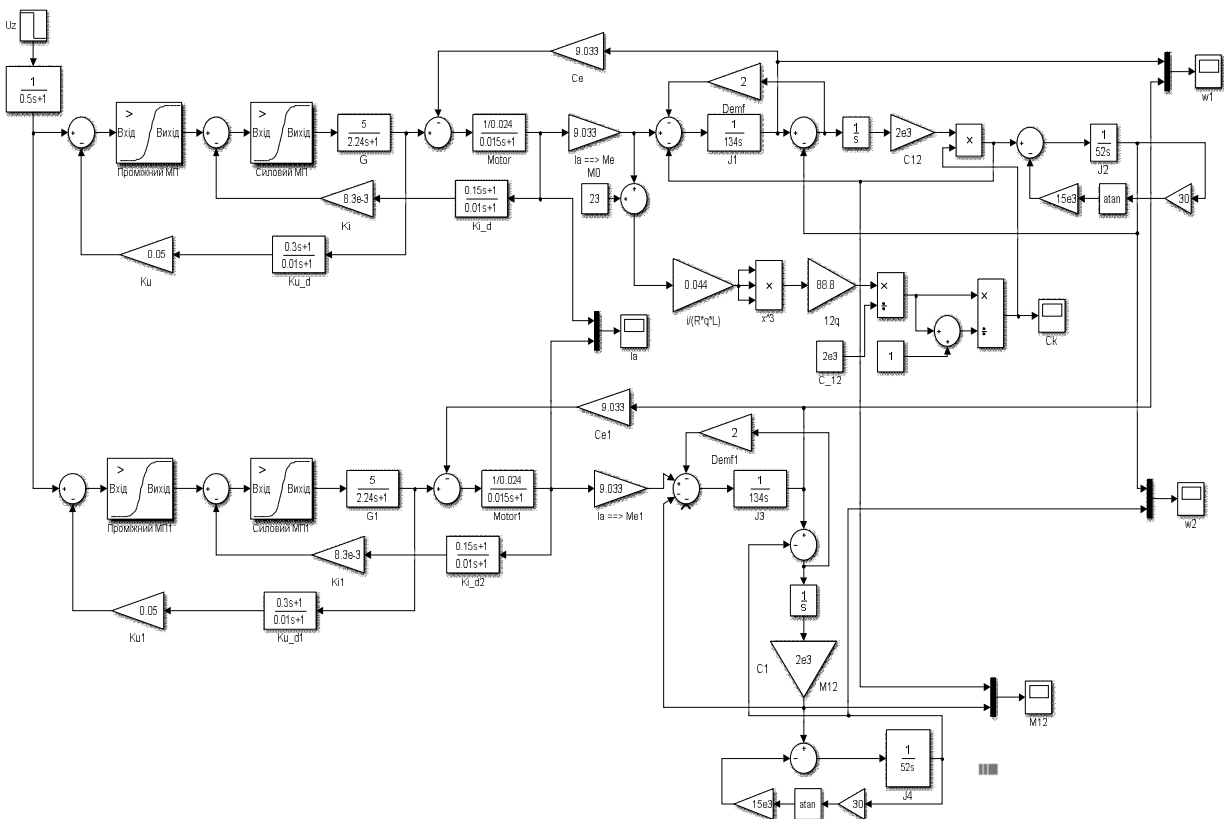


Рис. 6. Повна комп'ютерна модель для порівняння двох варіантів механіки приводу підіймання драглайна

За допомогою розробленої комп'ютерної моделі досліджено процес початку підіймання ківша екскаватора-драглайна ЕШ-15/90 включно з моментом його відриву від землі. Отримані результати перехідних процесів виведені на графіки і частину їх показано нижче на рис. 7–8. Зокрема, цікавим для аналізу виявився графік відносної пружності підіймального каната драглайна рис. 7, з якого видно, що ефект провисання канату в цій моделі присутній лише на початковій стадії пуску, коли "слабина" канату вибирається. Відповідно, потім моделі обидвох систем поведуться однаково, що й видно з графіків пружного моменту (рис. 8).

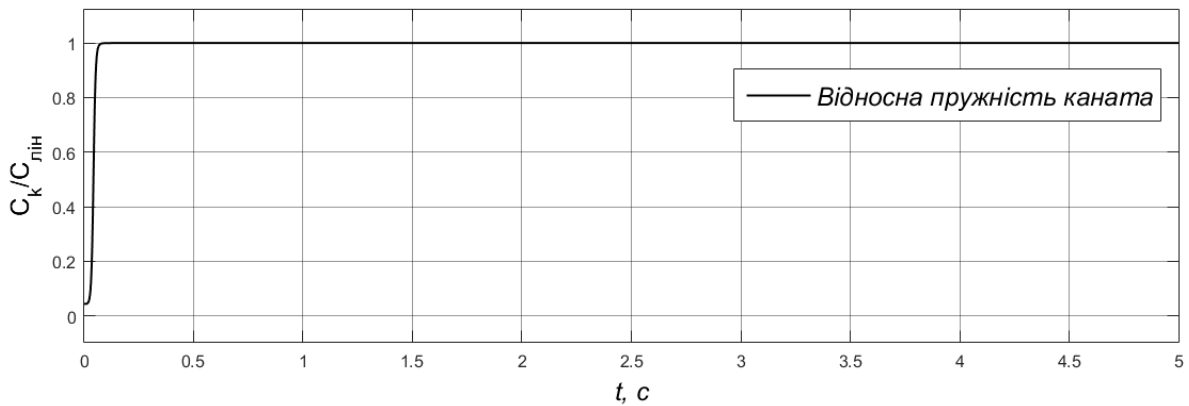


Рис. 7. Графік відносної пружності канату під час пуску приводу підймання

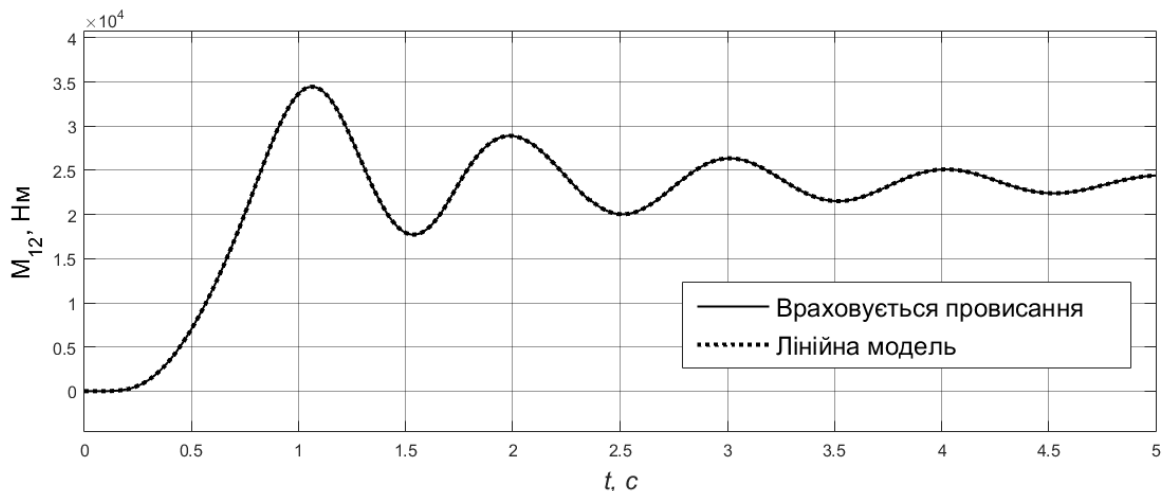


Рис. 8. Пружні моменти в канатах обидвох моделей

Аналіз одержаних результатів досліджень показав, що запропонований у роботі [15] варіант врахування ефекту провисання у випадку його застосування до приводу підймання екскаватора-драглайна ЕШ-15/90 є неефективним з погляду підвищення точності відтворення перехідних процесів. Незважаючи на відчутне ускладнення моделі канатної системи (див. рис. б), відмінностей у поведінці обох способів її імітації не знайдено, що пояснюється плавним процесом вибору слабину канату в моделі приводу (показано на рис. 7), після чого механічні системи мають уже подібну поведінку. Це характерно для приводів ЕШ-15/90 внаслідок використання в них магнітних підсилювачів, які мають доволі високу інерційність, що погіршує динаміку приводу, проте у випадку провисання канату сприяє швидкому і плавному вибору його слабину.

Дослідження на комп'ютерній моделі показали, що запропонований у роботі [15] спосіб моделювання провисання канату приводу підймання екскаватора-драглайна ЕШ-15/90 враховує процес його "підтягування" ("вибору слабину"), тобто, зміни довжини провисаючої частини, лише зміною зусилля в канаті, внаслідок чого така комп'ютерна модель не дає змоги отримати достатньо точно відтворити поведінку реального об'єкта. Відповідно, наступним етапом вивчення проблеми є уточнення способу моделювання канатного приводу підйимально-транспортних механізмів з урахуванням отриманих раніше результатів.

Висновки

Комп'ютерне моделювання динамічних процесів показало, що застосування спрощеної моделі провисання канату в приводі екскаватора-драглайна ЕШ-15/90 за методикою [15] призводить до невиправданого ускладнення комп'ютерної моделі без очікуваного ефекту підвищення точності.

Отже, можна вважати виправданим застосування лінійної моделі канатної системи екскаватора-драглайна без врахування ефекту провисання каната.

1. Гришина Т. Ф. Определение передаточной функции линейной системы по кривой переходного процесса / Т. Ф. Гришина // Изв. вузов. Электромеханика. – 1969. – № 7. – С. 762–768.
2. Мороз В. Числові інтегратори в цифрових системах керування // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": "Електроенергетичні та електромеханічні системи". – 2006. – № 563. – С. 99–104.
3. Мороз В. Аналіз раціонального порядку апроксимації для відновлення інформації за її дискретними відліками / В. Мороз // РІУ (Радіоелектроніка. Інформатика. Управління). – 2008. – № 1 (19). – С. 74–78.
4. Forsythe, G. E. / Malcolm, M. A.; Moler, C. B., *Computer Methods for Mathematical Computations*. Englewood Cliffs, New Jersey 07632. Prentice Hall, Inc., 1977. XI, 259 P.
5. *Numerical Computing with MATLAB* by Cleve Moler. Online Resources. -- https://www.mathworks.com/moler/index_ncm.html.
6. Leon O. Chua, Pen-Min Lin. *Computer-Aided Analysis of Electronic Circuits: Algorithms and Computational Techniques* (Prentice-Hall series in electrical & computer engineering). 1st Edition. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1977. – 737 P. [ISBN-13: 978-0131654150].
7. *Controls and Experiments: Lessons Learned* [A. Alleyne, S. Brennan, B. Rasmussen and other] // *IEEE Control Systems Magazine*. – 2003. – October. – Pp. 20–34.
8. Игнатъев С. А. Исследование рациональных режимов работы экскаваторов-драглайнов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 05.05.06 – «Горные машины». СПб, 1998. – 146 с.
9. Вологин Н. А. Совершенствование систем управления электроприводами постоянного тока главных механизмов карьерных экскаваторов. Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы: дис. ... канд. техн. наук. – С.-Петербург, 2003. – 178 с.
10. Л. Д. Певзнер, С. Е. Бабаков. Моделирование и управление операцией транспортирования экскаватора-мехлопаты. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 2. – С. 207–222. ISSN 0236-1493.
11. Соловьев С. В. Обоснование и выбор динамических параметров привода тягового механизма драглайна. Специальность 05.05.06. – Горные машины: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2016. – 116 с.
12. В. К. Качурин, А. В. Брагин, Б. Г. Ерунов. Проектирование висячих и вантовых мостов. – Москва: Книга по Требованию. – 279 с.
13. Построение кривой провисания и определение стрел провисания [електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://leg.co.ua/knigi/oborudovanie/proektirovanie-mehanicheskoy-chasti-vl-4.html>.
14. Таубер Б. А. Подъемно-транспортные машины: Учебник для вузов. – Изд. 5-е, перераб. и доп. – М.: Экология, 1991. – 528 с.
15. Шустов А. Д. Процессы деформации бумажного полотна / А. Д. Шустов. – М., Лесная промышленность, 1969.
16. Костинюк Л. Моделювання електроприводів: навч. посіб. / Л. Костинюк, В. Мороз, Я. Паранчук. – Львів: Вид-во Національного університету "Львівська політехніка", 2004. – 404 с.