

БАБІЙ СергійВінницький національний технічний університет
e-mail: babiy82sm@gmail.com**МОШНОРИЗ Микола**Вінницький національний технічний університет
ORCID ID: [0000-0001-7626-8327](https://orcid.org/0000-0001-7626-8327)
e-mail: moshnoriz@vntu.edu.ua**ПРОЦЕНКО Дмитро**Вінницький національний технічний університет
ORCID ID: [0000-0002-5611-7262](https://orcid.org/0000-0002-5611-7262)
e-mail: procenko.d.p@vntu.edu.ua**ПАЯНОК Олександр**Вінницький національний технічний університет
ORCID ID: [0000-0001-8139-4600](https://orcid.org/0000-0001-8139-4600)
e-mail: opayanok@gmail.com**ЖУКОВ Олексій**Вінницький національний технічний університет
ORCID ID: [0000-0001-7451-7633](https://orcid.org/0000-0001-7451-7633)
e-mail: alex4444_2004@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПІДЙОМНОЇ ЛЕБІДКИ КРАНА В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

В роботі проведено аналіз статичних навантажень підйомних лебідок підйомно-транспортних механізмів та сформовано узагальнену математичну модель підйомної лебідки крана. На основі запропонованої моделі розроблено структурну схему підйомної лебідки та реалізовано її як комп'ютерну модель у вигляді блока бібліотеки програмного середовища Simulink Matlab. Використання даної моделі дозволяє суттєво спростити процес проектування електроприводів підйомних лебідок кранів.

Ключові слова: підйомна лебідка, математична модель, статичний момент, електропривод.

BABIY Sergiy, MOSHNORIZ Mykola, PROCENKO Dmytro,
PAYANOK Oleksandr, ZHUKOV Oleksiy
Vinnytsia National Technical University

SIMULATION OF WORKING MODES OF THE ELECTRICAL DRIVE OF A LIFTING CRANE WINCHES IN MATLAB

Among the most common mechanisms in the industry are lifting machines of various types and designs. They are widely used in construction and assembly, repair, warehouse and other works related to lifting and moving large and heavy loads. The main and most energy-intensive mechanism of lifting machines is the lifting winch. The electric drive of the lifting winch must meet the increased operational requirements and ensure the performance of the given speed diagram, the necessary dynamics of work and high reliability in the operating modes. The energy indicators of the electric drive of the lifting winch mainly determine the energy indicators of the machine as a whole, therefore, due attention should be paid to the issue of designing the electric drives of the lifting winches. It is worth noting that the kinematic connections of the lifting winch are not absolutely rigid, which determines the occurrence of oscillations in the system as a result of dynamic forces. It is the presence in the electromechanical system of the lifting winch of elements with high inertia that causes the appearance of elastic oscillations during any transient process in this system. The presence of elastic oscillations in the mechanical system of the electric drive distorts the speed graphs of the system and leads to force pulsations. Elastic oscillatory processes in mechanisms lead to unpredictable behavior of the system and can cause emergency situations. Thus, taking into account the elastic properties of the mechanical system during its design will improve the efficiency and reliability of its operation. The results of the research carried out in the work contain the analysis of static loads of lifting winches of lifting and transport mechanisms and a generalized mathematical model of the crane lifting winch. On the basis of the proposed mathematical model, a structural diagram of a lifting winch was developed and implemented as a computer model in the form of a Matlab Simulink PPP library block. The mathematical and computer models presented in the work allow obtaining correct results in the entire range of loads, taking into account the change in the efficiency of the mechanical transmission when the loads and the direction of transportation change, and also take into account the influence of the elastic connection between the drive motor and the actuator. The use of the proposed models will significantly simplify the process of designing the power electric drive of lifting winches of cranes.

Keywords: lifting winch, mathematical model, static moment, electric drive.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Одним із важливих напрямків розвитку сучасного електричного привода (ЕП) є продовження наукових-досліджень зі створення комп'ютерних засобів для моделювання режимів їх роботи [1]. Це дозволяє суттєво спростувати процес проектування ЕП виробничих механізмів і дає можливість проводити дослідження їх роботи без шкоди та зношення технологічного обладнання.

В промисловості одними із найбільш поширених є вантажопідйомні машини різних типів та конструкцій. Вони широко використовуються при виконанні будівельно-монтажних, ремонтних, складських та інших робіт, пов'язаних з підйомом та переміщенням великогабаритних та вагових вантажів. Основним та найбільш енергоємним механізмом вантажопідйомних машин, наприклад кранів, є підйомна лебідка.

Енергетичні показники ЕП підйомної лебідки визначають головним чином енергетичні показники машини в цілому. Наявність в електромеханічній системі підйомної лебідки елементів з високою інерційністю під час будь-якого перехідного процесу викликає появу пружних коливань в цій системі, які призводять до непрогнозованої поведінки системи і можуть стати причиною аварійних ситуацій. Врахування пружних властивостей механічної системи підйомної лебідки під час її проектування дозволить покращити ефективність та надійність її роботи. Саме тому питання проектування ЕП підйомних лебідок має беззаперечну актуальність та потребує проведення відповідних досліджень.

Аналіз досліджень та публікацій

Значна частина досліджень в галузі підйомно-транспортних машин орієнтована на формування оптимальних законів керування механізмами цих машин, як це показано, наприклад, в роботах [2, 3] тощо. Інші роботи присвячені питанню проектування силового привода механізмів підйомно-транспортних машин. Так в роботі [4] запропоновано комп'ютерну модель підйомної лебідки вантажного крана в середовищі ППП Matlab. Дана модель дозволяє отримати коректні результати лише за умови, якщо значення коефіцієнта корисної дії механічної передачі електропривода складає не менше 0,5. Крім того, запропонована модель не враховує вплив пружного зв'язку між приводним двигуном та виконавчим механізмом.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є розробка математичної та відповідної їй комп'ютерної моделі підйомної лебідки крана, які враховують вплив пружних зв'язків між приводним двигуном електропривода та його виконавчим механізмом, і дозволяють отримати реальні динамічні характеристики досліджуваного механізму в усьому діапазоні навантажень із врахуванням зміни коефіцієнта корисної дії (ККД) механічної передачі та напрямку транспортування (підйом, спуск).

Виклад основного матеріалу

Спрощено кінематична схема підйомної лебідки зображена на рис. 1.

Результуючий момент статичного опору підйомної лебідки обумовлений як активним моментом M_A від сили тяжіння, що діє на вантаж та вантажозахватний пристрій, так і реактивним моментом M_P від сили тертя в рухомих елементах кінематичної схеми [5]:

$$M_c = M_A \pm M_P, \quad (1)$$

$$M_A = \frac{F \cdot D}{2 \cdot i_{mn} \cdot u}, \quad (2)$$

$$M_P = M_A \left(\frac{1}{\eta_{mn}} - 1 \right), \quad (3)$$

де F – результуюче зусилля на барабані лебідки, Н; D – діаметр барабана лебідки, м; i_{mn} – передаточне число механічної передачі; u – кратність поліспасти; η_{mn} – ККД механічної передачі при підйомі вантажу [5].

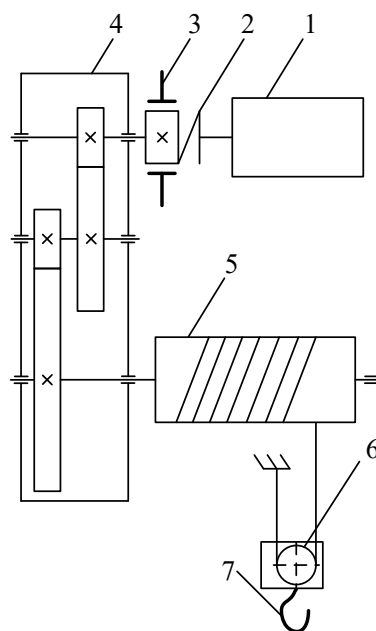


Рис. 1. Кінематична схема підйомної лебідки: 1 – двигун; 2 – муфта; 3 – гальмо; 4 – механічна передача (редуктор); 5 – барабан; 6 – блок поліспасти; 7 – вантажозахватний пристрій

Результуюче зусилля на барабані лебідки:

$$F = (m_b + m_0) \cdot g = G_b + G_0, \tag{4}$$

де m_b – маса вантажу, т; m_0 – маса вантажозахватного пристрою; G_b – вага вантажу, Н; G_0 – вага вантажозахватного пристрою, Н; g – прискорення вільного падіння, м/с² [5].

На основі аналізу наведеної кінематичної схеми та з врахуванням виразів (1)-(4) сформуємо узагальнену систему рівнянь, які описують механічну частину лебідки:

$$\begin{cases} V = \frac{\omega_{об} \cdot D_{\delta}}{2 \cdot i_{мп} \cdot u}, \\ G_0 = m_0 \cdot g, \\ G_b = m_b \cdot g, \\ M_c = M_A + M_P \cdot \text{sign}(V), \\ M_A = \frac{(G_b + G_0) \cdot D_{\delta}}{2 \cdot i_{мп} \cdot u}, \\ M_P = M_A \cdot \left(\frac{1}{\eta_{мп}} - 1 \right), \end{cases} \tag{5}$$

де V – швидкість транспортування вантажу, м/с; $\omega_{об}$ – кутова швидкість вала двигуна при транспортуванні вантажу, рад/с.

Відповідна структурна схема механічної частини лебідки зображена на рис. 2.

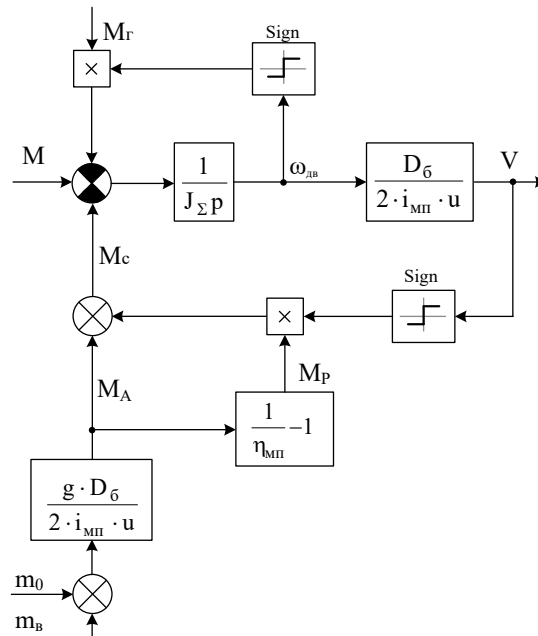


Рис. 2. Структурна схема механічної частини лебідки

На рис. 2: M – момент приводного двигуна, Н·м; M_c – гальмівний момент, створюваний електромагнітним гальмом, Н·м; J_{Σ} – приведений до вала двигуна момент інерції привода, кг·м².

ККД механічної передачі залежить від навантаження, а тому його наближене значення при будь-якому навантаженні пропонується розраховувати аналітичним шляхом так [6, 7]:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{a}{\gamma} + b}, \tag{6}$$

де a – коефіцієнт постійних втрат; b – коефіцієнт змінних втрат; γ – коефіцієнт навантаження, значення якого для підйомної лебідки може бути розраховано таким чином [6, 7]:

$$\gamma = \frac{m_{en} + m_0}{m_{en} + m_0}, \tag{7}$$

де m_{en} – номінальна маса вантажу, т.

При номінальному навантаженні ($\gamma = 1$) співвідношення коефіцієнтів втрат відомі із статистичних даних [6, 7]:

$$k = \frac{a}{b} = 1,2 \dots 1,5. \tag{8}$$

Таким чином значення коефіцієнтів постійних та змінних втрат можна розрахувати шляхом сумісного розв'язку рівнянь (6) та (8) при $\gamma = 1$ [6, 7]:

$$b = \frac{1 - \eta_{ном}}{\eta_{ном}(1 + k)}, \tag{9}$$

$$a = kb = k \frac{1 - \eta_{ном}}{\eta_{ном}(1 + k)}. \tag{10}$$

Відповідно до розробленої структурної схеми (див. рис. 2) та наведених аналітичних виразів реалізуємо відповідну структуру в ППП Matlab та оформимо її у вигляді елемента бібліотеки Simulink (див. рис. 3).

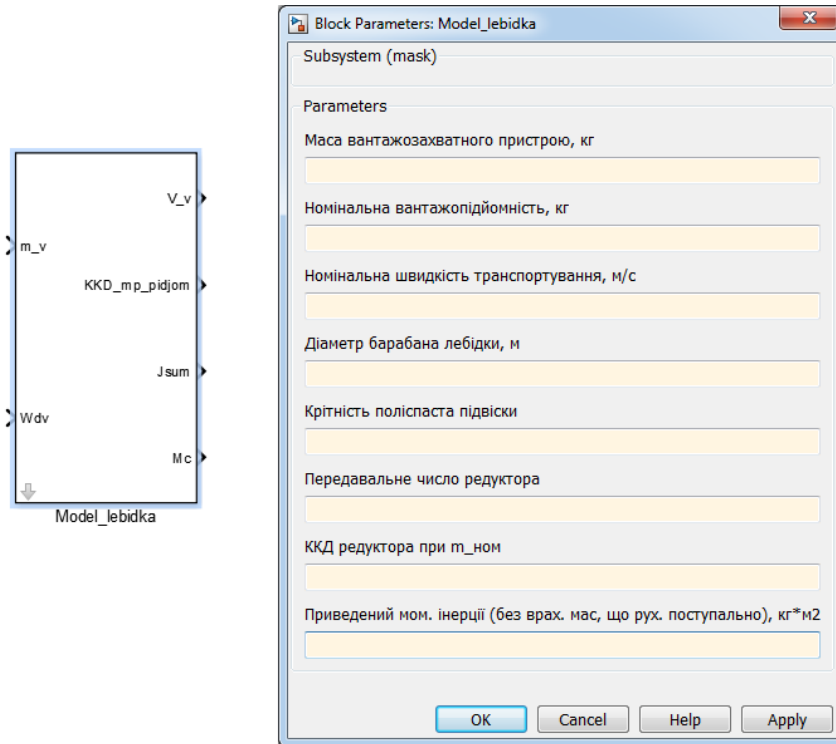


Рис. 3. Налаштування моделі підйомної лебідки

Розгорнута структура механічної частини лебідки зображена на рис. 4.

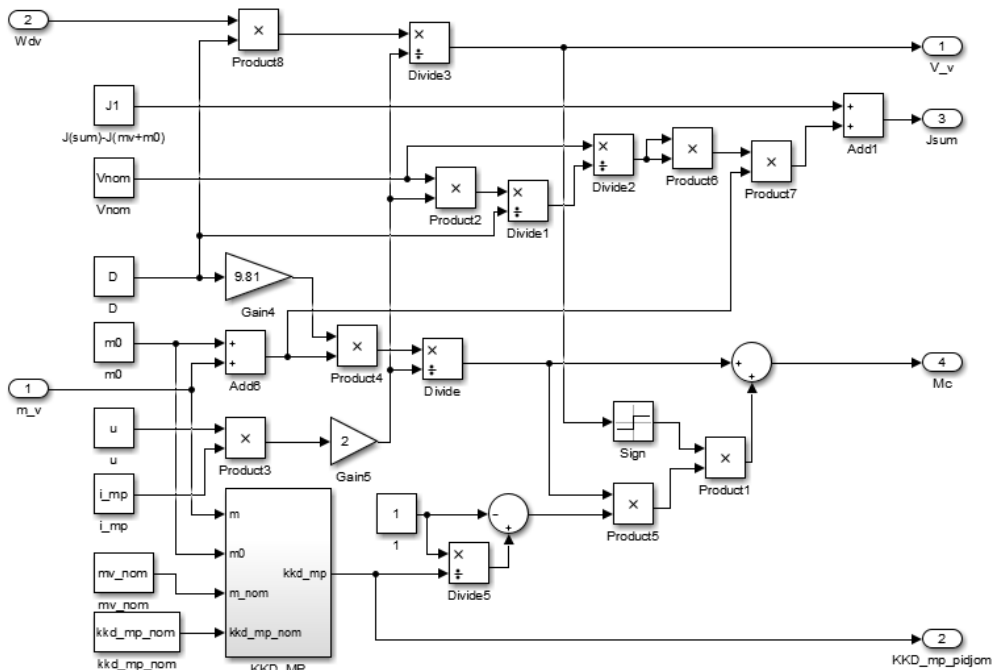


Рис. 4. Розгорнута структура механічної частини підйомної лебідки

Структура блоку розрахунку ККД механічної передачі відповідно до виразів (6) – (10) приведена на рис. 5.

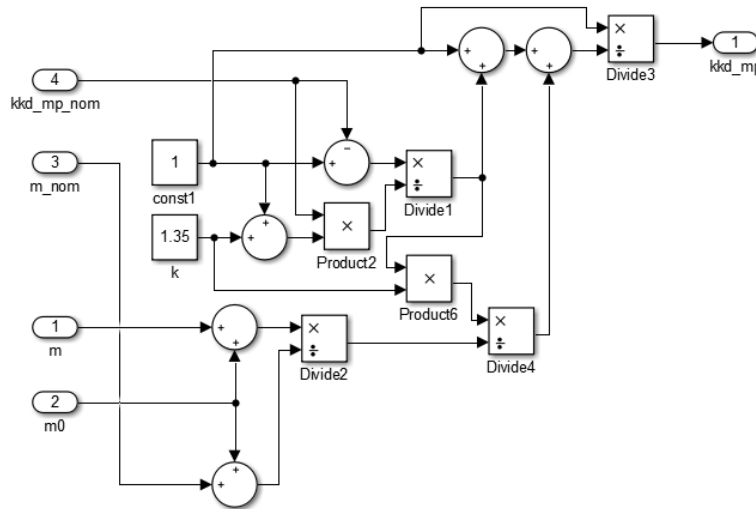


Рис. 5. Структура блоку розрахунку ККД механічної передачі лебідки

Проведемо моделювання роботи електропривода підйомної лебідки електроталі вантажопідйомністю 2т. при підйомі номінального вантажу. Лебідка приводиться в дію електродвигуном потужністю 3 кВт. Модель в ППП Matlab Simulink та налаштування її параметрів приведені на рис. 6. Результати моделювання повністю збігаються з результатами проведених аналітичних розрахунків та зображені на рис. 7.

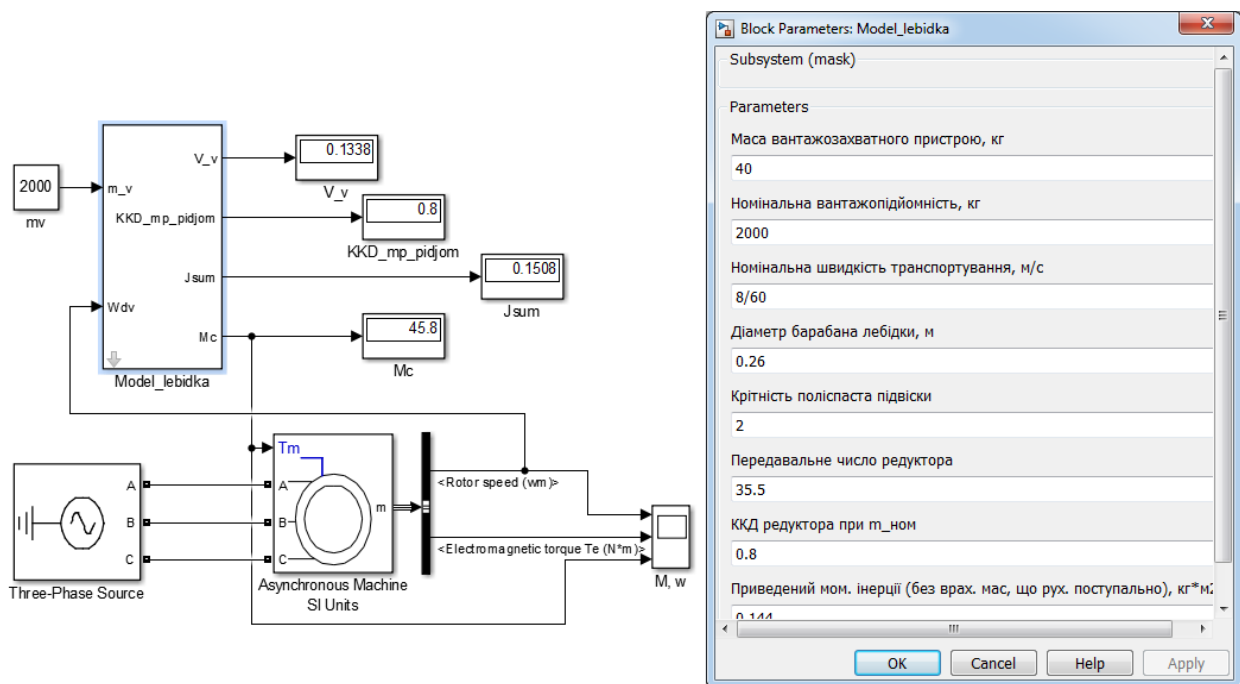


Рис. 6. Моделювання електропривода лебідки електроталі при підйомі номінального вантажу

Використовуючи запропоновану модель визначимо границі зміни статичних навантажень розглянутої підйомної лебідки при підйомі та спуску номінального вантажу та незавантаженого вантажозахватного пристрою (рис. 8). Результати моделювання представимо у вигляді графіків механічних характеристик (рис. 9).

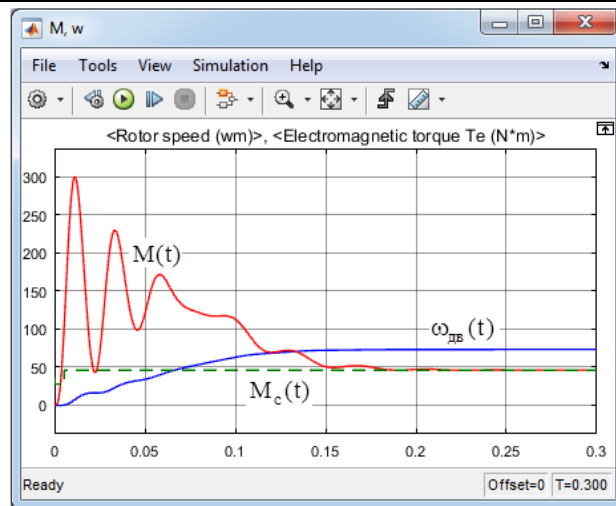


Рис. 7. Результати моделювання електропривода лебідки електроталі при підйомі номінального вантажу

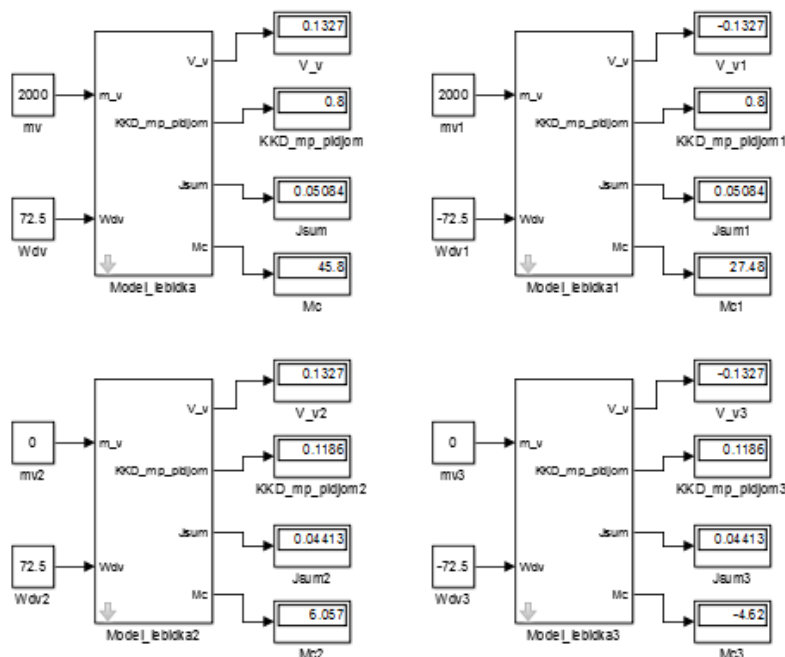


Рис. 8. Моделювання статичних навантажень підйомної лебідки при підйомі та спуску номінального вантажу та незавантаженого вантажозахватного пристрою

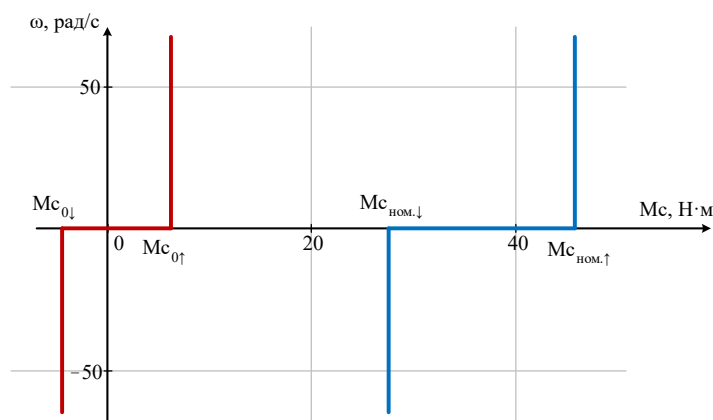


Рис. 9. Межі зміни статичних моментів лебідки при підйомі та спуску вантажів

Кінематичні зв'язки підйомної лебідки не є абсолютно жорсткими, вони характеризуються певною жорсткістю, що обумовлює виникнення коливань в системі в результаті дії динамічних зусиль.

Наявність пружних коливань в механічній системі спотворює графіки швидкості руху системи та призводить до пульсацій зусилля. Якщо під час проектування або моделювання не враховувати пружні

властивості механічного зв'язку, то можна помилитися у виборі матеріалу в механічній системі, завданні режиму роботи системи. Все це може призвести до аварії, зупинки технологічного процесу, нанесення шкоди обслуговуючому персоналу тощо.

Представимо підйомну лебідку двомасовою механічною системою з пружним зв'язком (рис. 10).

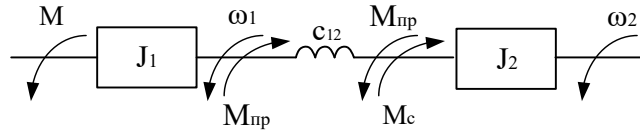


Рис. 10. Еквівалентна двомасова система з пружним зв'язком

Система диференціальних рівнянь такої двомасової системи буде мати вигляд:

$$\begin{cases} M_{np} = c_{12} \cdot \Delta\varphi, \\ \Delta\varphi = \int (\omega_1 - \omega_2) dt, \\ M - M_{np} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}, \\ M_{np} - M_c = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \end{cases} \quad (11)$$

де M_{np} – момент пружного зв'язку, Н·м; c_{12} – коефіцієнт пружності у зв'язку між масами; $\Delta\varphi$ – кутова деформація пружного елемента, рад; ω_1, ω_2 – частота обертання першої та другої мас, рад/с; M – рушійний момент, Н·м; J_1, J_2 – момент інерції першої та другої маси, кг·м².

Для сталевих валів та канатів коефіцієнт пружності розраховується за формулами [8]:

$$c_{np} = \frac{\pi}{32} \cdot G \cdot \frac{d^4}{L}, \quad (12)$$

$$c_{np} = \frac{1,11 \cdot 10^8 \cdot m_k}{160 \cdot H_k - 10^{-4} \cdot m_k \cdot H_k^2}, \quad (13)$$

де G – коефіцієнт, що характеризує пружні якості матеріалу, з якого виготовлено вал ($G = 8,7 \cdot 10^5$ кг/см² = $8,53 \cdot 10^{10}$ Н/м²); d – діаметр вала, см; H_k – довжина канату, м; m_k – запас пружності канату.

Структурна схема двомасової системи, складеної у відповідності до системи рівнянь (11) наведена на рис. 11 [9, 10].

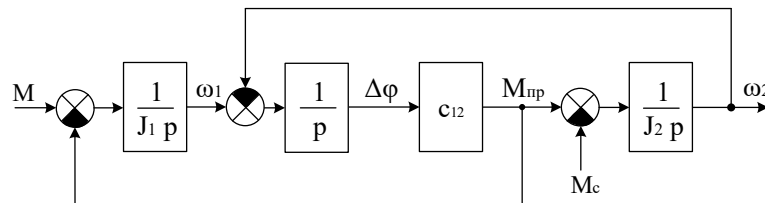


Рис. 11. Структурна схема двохмасової системи

Доповнивши модель підйомної лебідки структурою двомасової системи, отримаємо узагальнену модель лебідки із врахуванням пружності механічної передачі. На рис. 12 наведено відповідну комп'ютерну модель (з використанням лінеаризованої моделі приводного двигуна) та графіки перехідних процесів $\omega_1(t)$ та $\omega_2(t)$ при підйомі номінального вантажу.

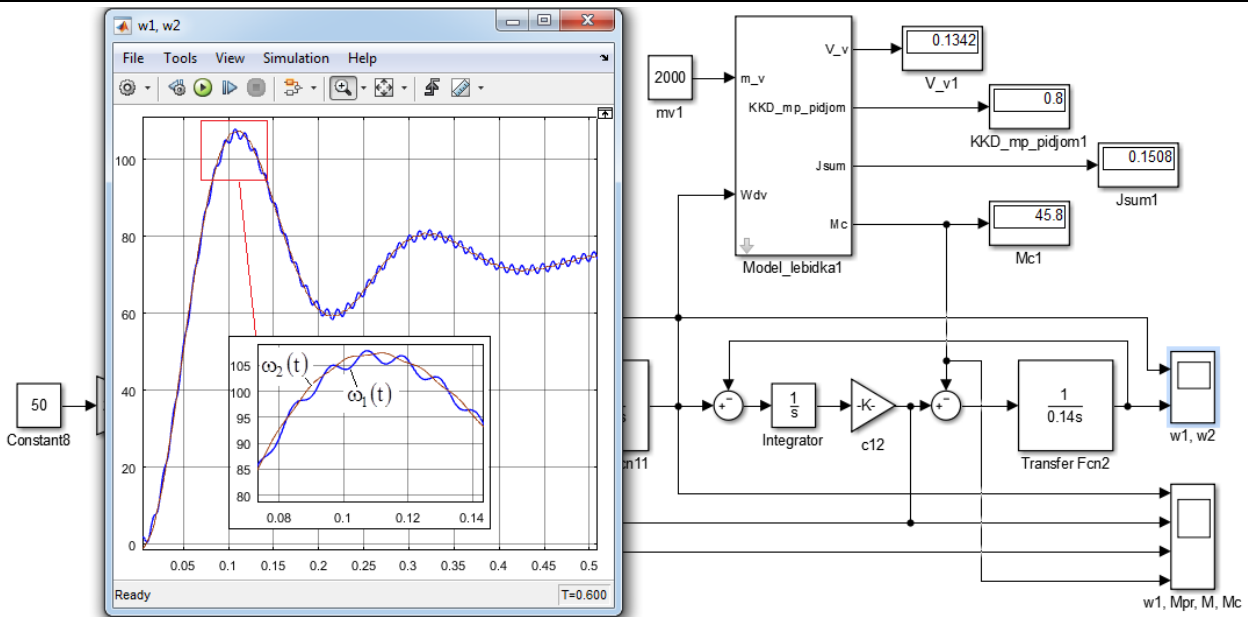


Рис. 12. Результати моделювання двомасової системи із врахуванням пружності у зв'язку між масами

На рис. 13 наведено графіки перехідних процесів кутової швидкості двигуна $\omega_1(t)$, моменту двигуна $M(t)$, пружного моменту $M_{np}(t)$ та моменту статичного опору $M_c(t)$ при підйомі номінального вантажу.

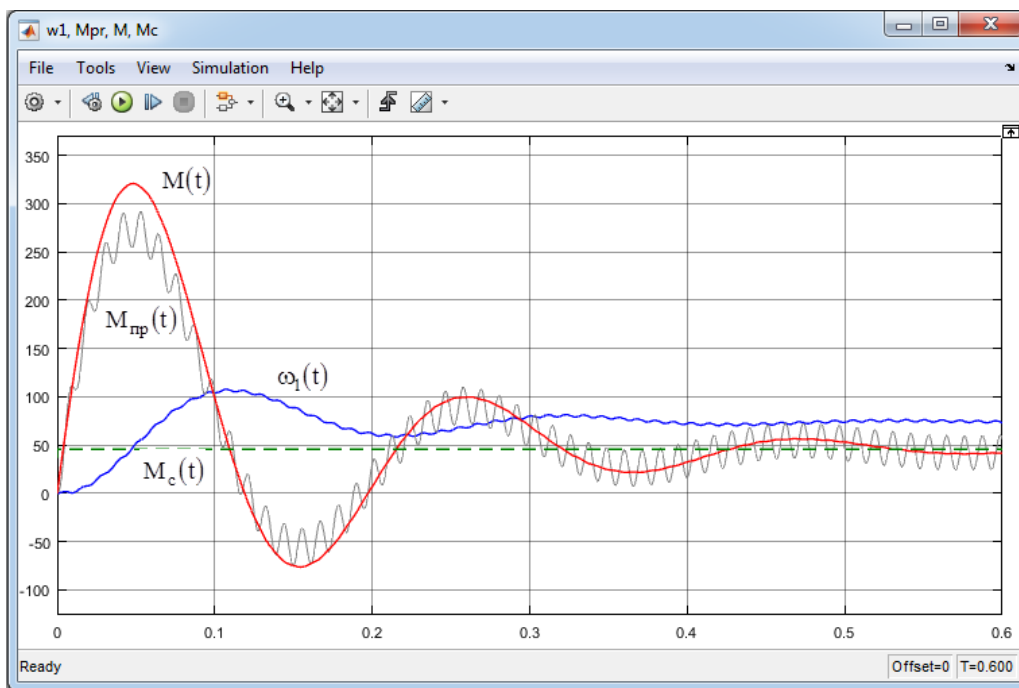


Рис. 13. Результати моделювання двомасової системи із врахуванням пружності у зв'язку між масами

З графіків видно, що в результаті прямого запуску установки її швидкість та момент мають більш виражений коливальний характер. Таких коливань немає на графіках (див. рис. 7), які отримані без врахування пружності. Пружні коливальні процеси в механізмах призводять до непрогнозованої поведінки системи і можуть стати причиною аварійної ситуації. Таким чином, врахування пружних властивостей механічної системи під час її проектування дозволить покращити ефективність та надійність її роботи.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Розроблені математичні та комп'ютерні моделі дозволяють отримати коректні результати в усьому діапазоні навантажень із врахуванням зміни ККД механічної передачі при зміні навантажень та напрямку транспортування, а також враховують вплив пружного зв'язку між приводним двигуном та виконавчим механізмом. Використання запропонованих моделей дозволить суттєво спростити процес проектування силового електропривода підйомних лебідок кранів.

Література

1. Москаленко В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.
2. Ловейкін В. С. Динамічна оптимізація механізму підйому вантажу мостових кранів : монографія / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич. – Київ : КОМПРИНТ, 2015. – 197 с.
3. Мокін Б. І. Синтез закону оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними у часі та просторі / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, О. М. Кривоніс // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2020. – № 6. – С. 38-46.
4. Бабій С. М. Комп'ютерна модель підйомної лебідки вантажного крана в середовищі Matlab / С. М. Бабій, А. М. Ратушна // Zbiór artykułów naukowych. «Inżynieria i technologia. East European Conference» (29.06.2017 – 30.06.2017) – Warszawa : Wydawca : Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2017. – 40 str. – S. 11–13.
5. Ключев В. И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов / В. И. Ключев, В. М. Терехов. – М. : Энергия, 1980. – 360 с.
6. Есаков В. П. Электрооборудование и электропривод промышленных установок / В. П. Есаков. – Киев : Высшая школа. Главное изд-во, 1981. – 248 с.
7. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів. Курсове та дипломне проектування. Самостійна та індивідуальна робота студентів / В. В. Грабко, С. М. Бабій, М. М. Мошноріз – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 119 с.
8. Моделювання електромеханічних систем : підручник / О. П. Чорний, А. В. Луговой, Д. Й. Родькін, Г. Ю. Сисюк, О. В. Садовой – Кременчук, 2001. – 410 с.
9. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу : навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.
10. Довгань С. М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання : навчальний посібник / С. М. Довгань. – Дніпропетровськ : НГА України, 2001. – 137 с.

References

1. Moskalenko V. V. Elektricheskij privod / V. V. Moskalenko – M. : Izdatelskij centr «Akademiya», 2007. – 368 s.
2. Loveikin V. S. Dynamichna optymizatsiia mekhanizmu pidiomu vantazhu mostovyykh kraniv : monohrafiia / V. S. Loveikin, Yu. O. Romasevych. – Kyiv : KOMPRYNТ, 2015. – 197 s.
3. Mokin B. I. Syntez zakonu optymalnoho keruvannya odnym klasom obiektiv z parametry, zminnymy u chasi ta prostori / B. I. Mokin, O. B. Mokin, O. M. Kryvonis // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2020. – № 6. – S. 38-46.
4. Babii S. M. Kompiuterna model pidiomnoi lebidky vantazhnogo kрана v seredovishchi Matlab / S. M. Babii, A. M. Ratushna // Zbiór artykułów naukowych. «Inżynieria i technologia. East European Conference» (29.06.2017 – 30.06.2017) – Warszawa : Wydawca : Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2017. – 40 str. – S. 11–13.
5. Klyuchev V. I. Elektroprivod i avtomatizaciya obshepromyshlennykh mehanizmov / V. I. Klyuchev, V. M. Terehov. – M. : Energiya, 1980. – 360 s.
6. Esakov V. P. Elektrooborudovanie i elektroprivod promyshlennykh ustanovok / V. P. Esakov. – Kiev : Vysshaya shkola. Golovnoe izd-vo, 1981. – 248 s.
7. Avtomatyzovanyi elektroprivod typovykh vyrobnychykh mekhanizmiv. Kursove ta dypломne proektuvannya. Samostiina ta individualna robota studentiv / V. V. Hrabko, S. M. Babii, M. M. Moshnoriz – Vinnytsia : VNTU, 2017. – 119 s.
8. Modeliuvannya elektromekhanichnykh system : pidruchnyk / O. P. Chornyi, A. V. Luhovoi, D. Y. Rodkin, H. Yu. Sysiuk, O. V. Sadovoi – Kremenchuk, 2001. – 410 s.
9. Tolochko O. I. Modeliuvannya elektromekhanichnykh system. Matematychnе modeliuvannya system asynkronnoho elektroprivodu : navchalnyi posibnyk / O. I. Tolochko. – Kyiv, NTUU «KPI», 2016. – 150 s.
10. Dovhan S. M. Doslidzhennia system elektroprivoda metodamy matematychnoho modeliuvannya : navchalnyi posibnyk / S. M. Dovhan. – Dnipropetrovsk : NHA Ukrainy, 2001. – 137 s.

Надійшла/Paper received : 11.08.2022 p. Надрукована/Printed : 01.11.2022 p.