

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ЗАДАЧ ТА ЇХ РІШЕНЬ В ПРОЦЕСІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ КРАНОВИХ МЕХАНІЗМІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Проведений аналіз основних проблем які виникають в процесі переміщення вантажу підйомними кранами та скіповими лебідками шахт. Наведено приклади систем керування крановим механізмом та методи їх вдосконалення, в процесі вирішення поставлених задач. Досліджено ефективність застосування наведених технічних рішень. Встановлено "маскування", нестабільних лінійних швидкостей підйому/спуску вантажів в приведених системах стабілізації кутової швидкості.

Ключові слова: крановий механізм, тяговий електродвигун, привод підйому, математична модель, ривок, вантаж, коливання.

Abstract

An analysis of the main problems that arise in the process of moving the cargo by cranes and skip winches of mines. Examples of crane mechanism control systems and methods of their improvement in the process of solving the set tasks are given. Efficiency of application of the given technical decisions is investigated. Installed "masking", unstable linear speeds of lifting / lowering loads in reduced systems of stabilization of angular velocity.

Key words: crane mechanism, traction electric motor, lifting gear, mathematical model, jerk, load, fluctuations.

Практично будь-яка галузь промисловості потребує застосування кранових механізмів (КМ) в певних періодах свого технологічного процесу. Широкий спектр використання, від підйому сировини з надр землі з використання кранових лебідок чи завантаження її на транспорт за допомогою підйомних кранів для доставлення на підприємство, завершуючи завантаженням уже виробленого продукту для реалізації. В ході транспортувань за часту відбувається зміна виду транспорту, що потребує також використання КМ для перевантаження. З врахуванням викладеного та сучасною інтенсифікацією виробництва в цілому, зменшення періоду завантаження чи перевантаження та кількості цих операцій в процесі, може вносити суттєвий вплив, як в плані швидкості так і в плані вартості виготовлення продукції. А підвищення ефективності роботи крану в плані точності та плавності переміщень вантажу зменшить кількість пошкоджень як вантажу так і самого крану.

В процесі аналізу систем керування тяговими електродвигунами (ТЕД) кранових механізмів, було встановлено, що при реконструкції існуючих чи виробництві нових КМ, найпоширенішого застосування набули асинхронні електродвигуни (АД), з релейно-контактною системою керування чи перетворювачем частоти [1, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13].

Кожен процес роботи КМ можна розділити на три періоди [1, 2]: пуску - підвішений вантаж чи скіп, намотується на барабан чи змотується з нього, усталеного руху – ТЕД працює зі сталою кутовою швидкістю обертання валу та гальмування - ТЕД зменшує свою кутову швидкість від сталої до нуля для зупинки процесу підйому/спуску вантажу. Весь же цикл роботи КМ в більшості випадків характеризується як повторно-короткочасний [2] з великою кількістю чергувань періодів роботи механізмів і технічних пауз.

Період пуску КМ характеризується процесом відриву вантажу від поверхні, якому передую вибір зазору в механічній передачі при наявності слабину в канаті чи тросі, що є основною причиною виникнення динамічних навантажень які діють на електропривод підйому КМ та являється найпоширенішою причиною виникнення несправностей, до 80%. Також момент відриву супроводжується, виникненням перехідного некерованого процесу коливального характеру, та можливим виникненням ривків [6] при перевищенні допустимої швидкості обертання ротора тягового електродвигуна КМ, в даний момент для даної маси вантажу. Часте виникнення ривків в

системі сприяє інтенсивному накопиченню втомних пошкоджень в деталях [3], і, в результаті, виходу із ладу механізму.

В період уставленого руху основним завданням є стабілізація вибраної швидкості, та при можливості реалізація технічних рішень в плані її підвищення. Основна задача при цьому, це зменшення амплітуди маятникових коливань виниклих в період пуску з врахуванням впливу зовнішніх динамічних вітрових навантажень [5]. Вплив некерованих маятникових коливань на систему, збільшує, тривалість робочого циклу до 20% та ризик виникнення аварійних ситуацій [4, 10], тому вирішення поставленої задачі матиме суттєвий результат у покращенні показників швидкості.

Основним завданням періоду гальмування є забезпечення посадкової швидкості для вантажу, а для процесу опускання ще і точність у його розміщенні. Тому задача вирішення якої суттєво вплине на якість роботи КМ, це зменшення швидкості ТЕД по заданому математичному закону. Та погашення маятникових коливань, які виникають в процесі гальмування.

В процесі аналізу було розглянуто методи вирішення наведених задач. Так у роботі [3] авторами обрано відображення моделі електроприводу підйому КМ, у вигляді двохмасової механічної системи. А також запропоновано, застосувати в даному електроприводі безінерційне джерело моменту (БІМ) рис. 1, в якості якого виступає АД з перетворювачем частоти, та уведений у систему регулятора пружного моменту (РПМ) і регулятора швидкості (РШ). А в якості алгоритму керування РПМ застосувати залежність, отриману на базі синергетичної теорії керування [3]:

$$M = M_{12} + \frac{J_1}{J_2}(M_{12} - M_C) - J_1\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)(\omega_1 - \omega_2) - \frac{J_1}{T_1 T_2 C_{12}}(M_{12} - M_{12}^*), \quad (1)$$

де $\omega_1, \omega_2, J_1, J_2$ - кутова швидкість і момент інерції першої і другої мас; M_{12} - моменту сили пружності; M_{12}^* - завдання для регулятора моменту сили пружності; M - потрібне значення електромагнітного моменту двигуна; T_1, T_2 - постійні часу регулятора; M_C, M_{C2} - момент сили опору діючий на першу і другу маси.

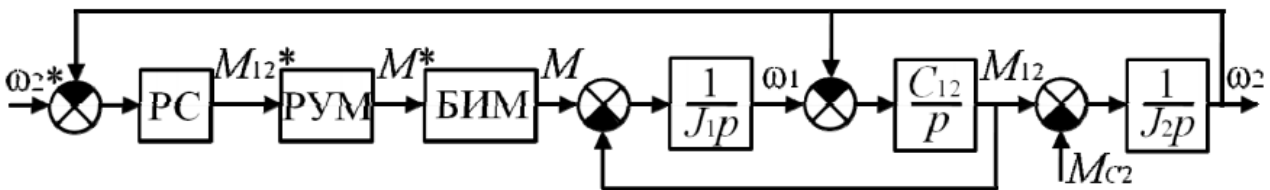


Рис.1 – Структурна схема електропривода підйому кранового механізму

Задання значення швидкості обертання ротора ТЕД, в період вибору зазору визначається виразом (2), при цьому фіксується прямо пропорційна залежність між ω_1 та M_{12}^* :

$$\omega_1 = M_{12}^* \frac{1}{(T_1 + T_2)C_{12}}. \quad (2)$$

Також у роботі запропонований метод автоматичного обмеження динамічних навантажень в приводах підйому КМ, в результаті розрахунок кутової швидкості ω_{1max} , при якій забезпечується обмеження пружного моменту на рівні M_{12max} максимально допустимій силі натягу тросу, приведений до валу ТЕД

$$\omega_{1max} = \sqrt{\frac{C_{12}}{J_1} \Delta\varphi_{1max}^2 + \frac{2}{J_1} M_{Tmax} \frac{M_{12max}}{C_{12}}}. \quad (3)$$

Наведена модель не дозволяє забезпечити лінійність в процесі відриву вантажу від поверхні, хоча, при цьому забезпечує автоматичне обмеження динамічних навантажень при виборі зазору.

Обмеження величини ривка розглянуто також у роботі [6], де запропоновано на початковому етапі роботи електропривод підйому включити як позиційний з нульовим завданням та з допомогою датчика положення, реверсного лічильника та контролера, розраховувати допустимий рівень ривка і

прискорення. Також запропонована структурна схема електропривода підйому з обмеженням ривка рис. 2.

Визначені параметри, передаточної функції регулятора положення W_{pn} в період компенсації електроприводом впливу моменту навантаження (4) та передаточної функції регулятора прискорення в період розгону двигуна (5):

$$W_{pn}(p) = K_{pn} \approx \frac{K_C}{8TK_p K_L}, \quad (4)$$

$$W_{ku}(p) = \frac{1/K_U}{T_U p + 1}, \quad (5)$$

де K_U, K_C, K_L - коефіцієнти зворотного зв'язку по прискоренню, швидкості та положенню відповідно, K_p - коефіцієнт редуктора, T_U - постійна часу швидкодії контуру прискорення.

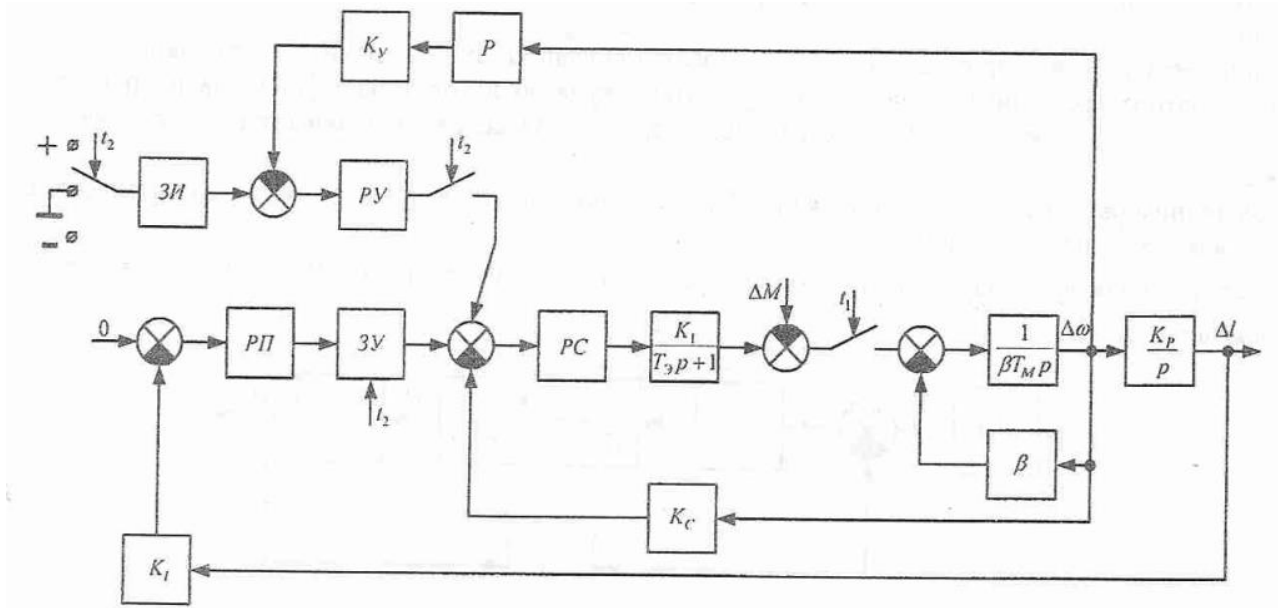


Рис.2 – Структурна схема електропривода підйому з обмеженням ривка

Також наведено отримані передаточні функції (6) та (7) для розглянутих періодів роботи, в яких виконаний зв'язок ривка з моментом навантаження та ривка із заданим сигналом прискорення відповідно:

$$W_{p1}(p) = \frac{p^2}{T_M p (T_E p + 1) + T'_M}, \quad (6)$$

$$W_{p2}(p) = \frac{p(2T_p + 1) / K_U}{2T_p + 1 + (T_U p + 1)(2T_p + \alpha)}, \quad (7)$$

де T_E - електрична постійна часу АД, T_M, T'_M - реальні і розрахункове значення постійної часу відповідно, T_U - постійна часу регулятора, $\alpha = T_M / T'_M$.

По результатам моделювання розглянутої моделі з врахуванням поставлених припущень (не враховується змінні складові електромагнітних перехідних процесів в АД і перетворювачі частоти та проведена лінеаризація рівняння $M = f(\omega, U_D)$), встановлено, що забезпечується лінійність в процесі відриву вантажу.

Вирішення проблеми демпфування коливань вантажу на пружному підвісі [4, 9, 10, 11, 12, 13], запропоновано у роботі [11], де наведено спосіб розгону (гальмування) вантажу в режимі повного гасіння залишкових коливань, виникаючих після розгону.

Для аналітичного виводу нелінійних часових залежностей прискорення, швидкості і переміщення точки підвісу вантажу, обрано математичну модель плоского маятника (8) та використано принцип

перерахунку аналітичної часової залежності (9) кута відхилення вантажного тросу від вертикалі в аналітичній залежності прискорення, швидкості і переміщення точки підвісу вантажу. В ході перетворень авторами отримано аналітичний вираз прискорення точки підвісу вантажу (10), з якого в свою чергу було отримати також вирази для швидкості та переміщення:

$$\ddot{q} + \frac{\ddot{x}}{L} + \left(2 \cdot \frac{b}{m}\right) \dot{q} + g \cdot \frac{q}{L} = 0, \quad (8)$$

$$q(t) = A + A \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (9)$$

$$\ddot{x}(t) = -g \left(A - A \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega \cdot t\right) \right) - A \cdot L \cdot \omega^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega \cdot t\right) - \frac{2 \cdot A \cdot L \cdot b \cdot \omega \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \omega \cdot t\right)}{m}, \quad (10)$$

де \ddot{q} – друга похідна кута відхилення вантажного тросу КМ від гравітаційної вертикалі; m – маса вантажу; L – довжина вантажного тросу КМ від рухомої точки підвісу на вантажній люльці; b – приведений до кутової координати коефіцієнт в'язкого тертя; g – прискорення вільного падіння; A – амплітуда кута нахилу вантажного тросу КМ в час переміщення вантажу; $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$ – циклічна частота синусоїди; T – час розгону вантажу.

Для перевірки реакцій динамічної системи КМ з вантажем та розрахованого за наведеною математичною моделлю, керуючого впливу, запропонована імітаційна математична модель коливань вантажу, переміщуваного КМ в окремій площині рис. 3. Також наведений приклад часових залежностей переміщення, швидкості і прискорення точки підвісу та кута нахилу тросу відповідно.

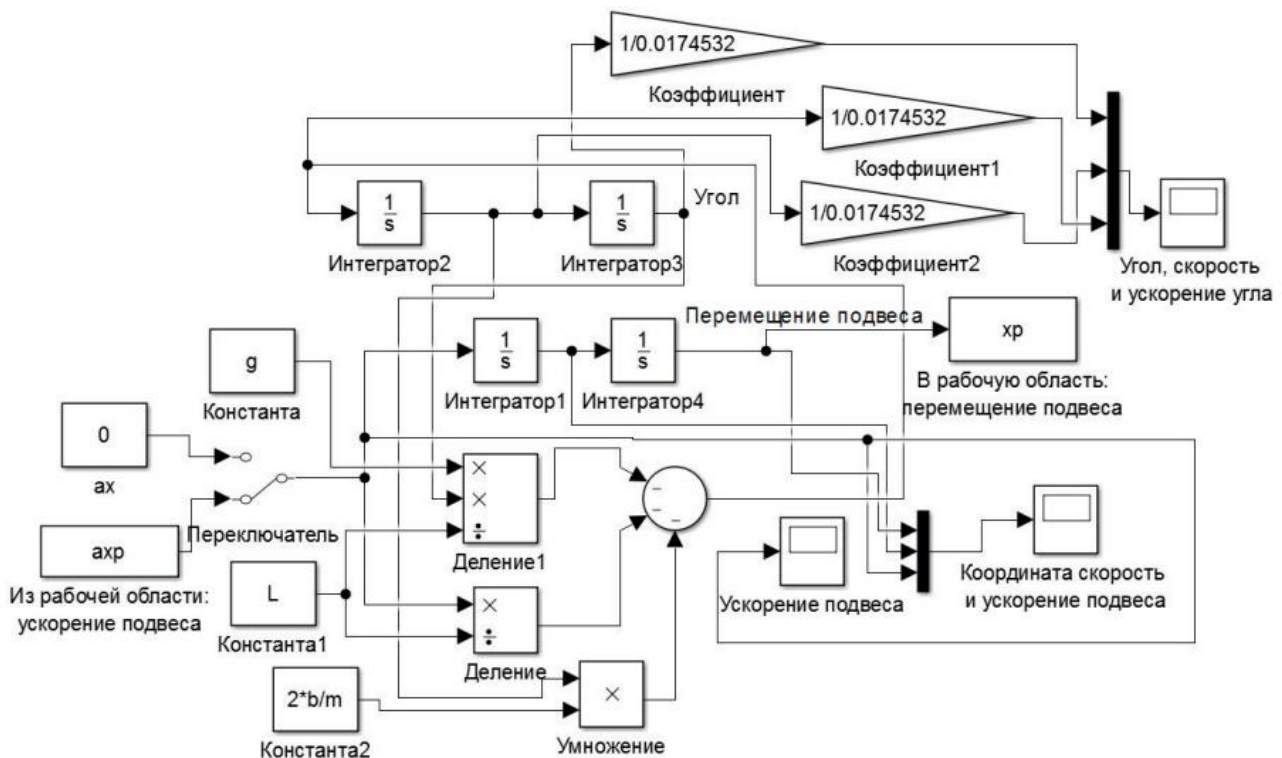


Рис.3 – Імітаційна математична модель коливань вантажу, переміщуваного КМ в окремій площині, описана диференційним рівнянням (10)

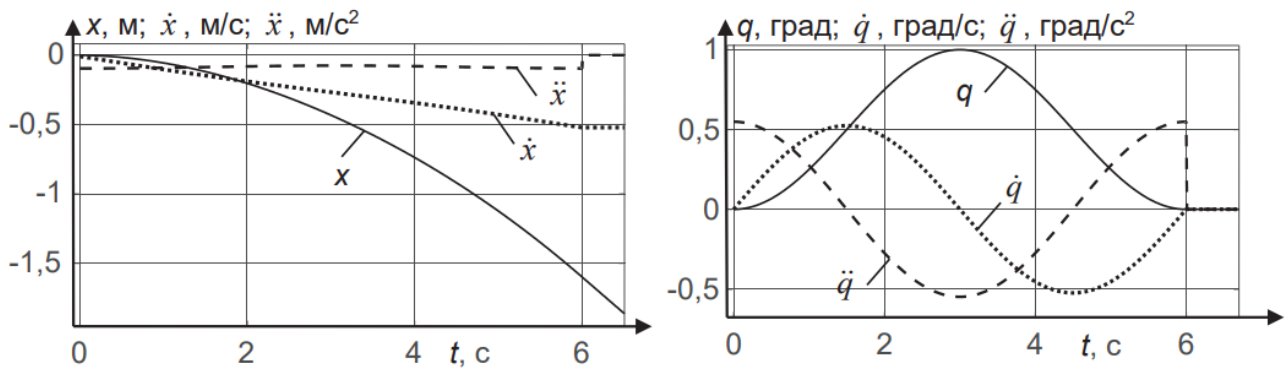


Рис.4 – Приклад часових залежностей переміщення, швидкості та прискорення точки підвісу(а), відповідні їм переміщення, швидкість і прискорення кута нахилу тросу(б)

По наведених на рис. 4 результатів моделювання, відмічено повне затухання поздовжніх коливань вантажного тросу в кінці моменту розгону/гальмування.

Вирішення даного питання представлено також у роботі [10], авторами приведена розрахункова модель КМ, яка описується системою диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 + m_2 \cdot \ddot{x}_2 = F - W \cdot g \cdot \sin \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 + \frac{g}{l} (x_2 - x_1) = 0 \end{cases}, \quad (11)$$

де m_1, m_2, x_1, x_2 - приведені маси та координати центрів мас відповідно КМ та вантажу; W, F - приведені сили опору та тяги чи гальмування, які діють на КМ; l - довжина тросу.

В ході математичних перетворень та присвоєння відповідних значень швидкості та тривалості періоду розгону, була знайдена формула, яка описує енергію коливань вантажу на пружному підвісі в момент закінчення розгону КМ

$$E(2 \cdot T_3 + \Delta T) = \frac{m_2 \cdot v_1^2}{2 \cdot T_3^2 \cdot \Omega_0^2} (2 - 2 \cdot \cos(T_3 \cdot \Omega_0) - 2 \cdot \cos(\Delta T \cdot \Omega_0) + 2 \cdot \cos((T_3 + \Delta T)\Omega_0) - \cos((2 \cdot T_3 + \Delta T)\Omega_0)), \quad (12)$$

де v_1 - проміжна швидкість руху КМ; T_3 - час розгону КМ до проміжної швидкості; ΔT - час руху КМ на проміжній швидкості; Ω_0 - частота власних коливань математичного маятника.

Усунення маятникових коливань вантажу в момент виходу КМ на сталу швидкість стає можливим при розв'язанні рівняння

$$E(2 \cdot T_3 + \Delta T) = 0, \quad (13)$$

відносно параметру ΔT . Вирішення трансцендентного алгебраїчного рівняння (14) представлено в такому вигляді:

$$\Delta T = \frac{\pi}{\Omega_0} - T_3. \quad (14)$$

При якому рівняння (15) яке характеризує енергію залишкових коливань вантажу на пружному підвісі в момент закінчення перехідного режиму руху КМ, стає рівним нулю:

$$E(2 \cdot T_1 + \Delta T) = \frac{288 \cdot m_2 \cdot v_1^2 \cdot \cos\left(\frac{1}{2}(T_1 + \Delta T)\Omega_0\right)^2 \cdot \left(T_1 \cdot \Omega_0 \cdot \cos\left(\frac{T_1 \cdot \Omega_0}{2}\right) - 2 \sin\left(\frac{T_1 \cdot \Omega_0}{2}\right)\right)^2}{T_1^6 \cdot \Omega_0^6}. \quad (15)$$

При аналізі фазового портрету коливань вантажу на пружному підвісі рис. 5, наведеного авторами після моделювання переміщення вантажу по заданому закону, відмічається, що не великі відхилення швидкості руху КМ від заданої швидкості викликають незначні залишкові коливання вантажу на пружному підвісі. Максимальна амплітуда яких не перевищує 0,7 грудуса.

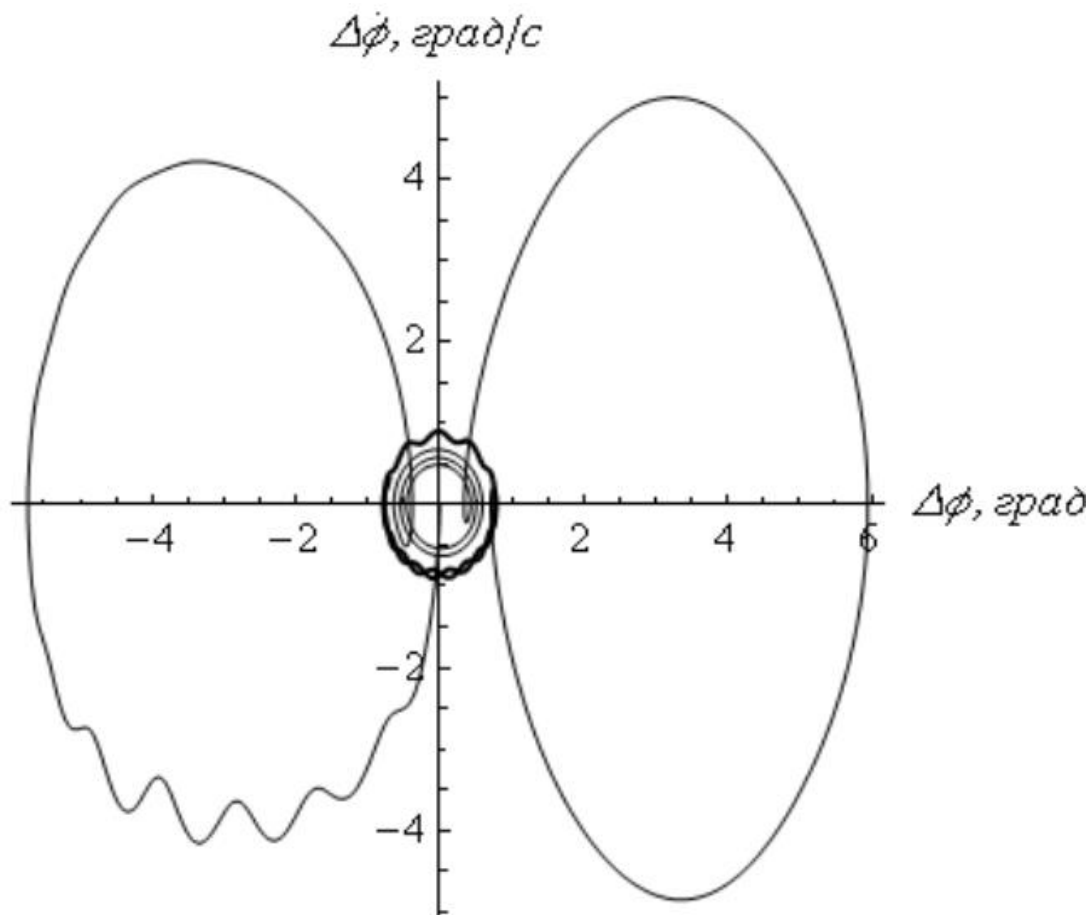


Рис.5 – Фазовий портрет коливань вантажу на пружному підвісі

Важливо також відмітити, ще одну роботу авторів «Динамічна оптимізація механізму підйому вантажу мостових кранів» [13]. В даній монографії розгорнуто розглянутий аналіз робіт з динаміки та оптимального керування мостовими кранами. Описані режими підйому/опускання вантажу „з підхватом” та „з вісу”. Для першого, приведена дев’ятиетапна математична модель руху динамічної системи «механізм підйому вантажу – вантаж - основа» яка враховує динаміку взаємодії вантажу та основи. Для другого, синтезована багатоетапна математична модель руху „механізм підйому вантажу – вантаж”. Отримані значення динамічних навантажень тросу, кранового моста та основи на яку опускається вантаж. Також виконаний аналіз експериментальних даних, при частотному керуванні тяговим електродвигуном КМ, та встановлена доцільність застосування в порівнянні з реостатним керуванням, як в технічному так і в економічному плані.

За результатами проведеного дослідження всіх розглянутих робіт спрямованих на нейтралізацію пружних коливань в системі КМ при підніманні/опусканні вантажу, встановлено, що не враховується змінний момент інерції барабана, на який намотується і з якого розмотується трос, до якого підвішено вантаж. А припущення, що при сталій швидкості обертання ротора ТЕД кранового механізму лінійна швидкість підйому/спуску вантажу також буде сталою, не є вірним. Вона буде або наростати, або спадати, тому приведені системи стабілізації кутової швидкості "маскують" нестабільні лінійні швидкості підйому/спуску вантажів.

Наголос на врахування даного питання поставлений в роботі [1], в якій за основу взяте загальне рівняння динаміки (15) у якому враховується і змінність в часі моменту інерції і змінність в часі моменту навантаження [14]:

$$J(t) \frac{d\omega}{dt} + \frac{dJ}{dt} \omega = M(t). \quad (16)$$

Тому в наступних роботах планується, шляхом синтезу математичних моделей керування тяговими електроприводами КМ з врахуванням змінного моменту інерції барабану в законах

керування, досягти збільшення точності при моделюванні руху вантажу з врахуванням нейтралізації пружних коливань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Mokin B. I. Synthesis of mathematical models for one class of electromechanical systems with variable parameters. Electrical and Computer Engineering (UKRCON) [Text] / B. I. Mokin, O. B. Mokin, O. M. Kryvonis // 2017 IEEE First Ukraine Conference on (YSF-2017). -2017. -DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100504.
2. Режими роботи механізмів кранів. [Електронний ресурс]. -Будівельна техніка. Довідник. -2016. -Режим доступу: <http://budtehnika.pp.ua/6798-rezhimi-roboti-mehanzmv-kraniv.html>
3. Завьялов В. М. Автоматическое ограничение динамических нагрузок электропривода подъема мостового крана [Текст] / В. М. Завьялов, А. В. Гусев // Известия Томского политехнического университета. -2011. -№4. -С. 151-154.
4. Корытов М. С. Обоснование значений коэффициентов регуляторов гашения колебаний груза мостового крана [Текст] / М. С. Корытов, В. С. Щербаков, Е. О. Шершнева // Вестник СибАДИ. -2017. -№1. -С. 12-19.
5. Машин А. В. Реализация алгоритма управления приводами башенных кранов при ветровых воздействиях [Текст] / А. В. Машин, П. А. Сорокин // Известия ТулГУ. Технические науки. -2014. -№1. -С. 186-193.
6. Виноградов С. С. Синтез крановых электроприводов с ограничением рывка [Текст] / С. С. Виноградов, А. В. Гордеев, И. Ю. Муллин // Вестник УлГТУ. -2012. -№2. -С. 42-48.
7. Ручка О. О. Векторне управління частотно-регульованого асинхронного електроприводу [Текст] / О. О. Ручка, О. О. Ніколаєв // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. -2013. -№4. -С. 159-162.
8. Григоров О. В. Аналіз пуско-гальмівних процесів кранових механізмів з частотно-регульованим приводом [Текст] / О. В. Григоров, В. В. Стрижак // Вісник ХНАДУ. -2012. -№57. -С. 249-256.
9. Щербаков В. С. Математическое моделирование рабочего процесса мостового крана с релейными приводами моста и грузовой тележки [Текст] / В. С. Щербаков, М. С. Корытов, Е. О. Шершнева // Вестник СибАДИ. -2016. -№1. -С. 28-36.
10. Ромасевич Ю. А. Оптимизация режимов движения мостовых кранов [Текст] / Ю. А. Ромасевич, В. С. Ловейкин // Синергия. -2016. -№2. -С. 73-80.
11. Корытов М. С. Использование синусоидальной функции для моделирования разгона и торможения груза мостового крана в режиме гашения колебаний [Текст] / М. С. Корытов, В. С. Щербаков // Вестник СибАДИ. -2017. -№2. -С. 22-28.
12. Швед Ю. С. Экспериментальные исследования и математическое моделирование асинхронного электропривода передвигания мостового крана [Текст] / Ю. С. Швед, И. А. Орловский // Электротехника та електроенергетика. -2013. -№1. -С. 18-27.
13. Ловейкін В.С. Динамічна оптимізація механізму підйому вантажу мостових кранів. Монографія / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич. – К.: ЦП „КОМПІНТ”, 2015. – 197 с.
14. Dimensioning of a drive system. [Electronic resource]. -Technical guide No. 7. -2011. -Режим доступу: https://library.e.abb.com/public/a3ef20fdc69ccc9ac12578800040ca95/ABB_Technical_guide_No_7_REVC.pdf.

Кривоніс Олександр Михайлович, аспірант, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, kryvonis.ol@gmail.com

Мокін Борис Іванович, академік НАПНУ, д.т.н., професор, професор кафедри ВЕТЕСК, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Kryvonis Oleksander, Postgraduate Student, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, kryvonis.ol@gmail.com

Mokin Borys, Academician of NAPNU, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of VETESK, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.