

Симуляція перехідного процесу автоматичної швартової лебідки з електричним приводом

*Швець Е., к.т.н., доц.; **Костючко С., маг., ***Чабан В., д.т.н., проф.

* Національний університет кораблебудування імені Макарова, Миколаїв

** Луцький національний технічний університет, Луцьк

*** Національний університет «Львівська політехніка», Львів

Abstract. In this article is demonstrated transient proces of automatic docking mooring winches with electric drive. The developed mathematical model of motor is based on electromagnetic circuit theory. The differential equations of motor are written down in normal Cauchy's form. The results of simulation are gaven.

Key words: electric motor, transient process, differential equations, automatic mooring winch.

Вступ

Розрахунок перехідних процесів перший етап задачі аналізу. Його презентує задача Коші для диференціальних рівнянь стану. Для розв'язання поставленої задачі необхідно було сперш: побудувати математичну модель пристрою. Побудовані математичні моделі виконавчих об'єктів нелінійних систем одержано на підставі теорії електромагнетних кіл, а не електричних. Це не тільки спрощує процес одержання таких моделей, а й дає змогу записати рівняння стану в нормальній формі Коші, а відтак дає змогу аналізувати довготривалі процеси, які, зазвичай, мають місце на практиці.

Актуальність досліджень

Останнім часом більшість суден обладнають автоматичними швартовними лебідками. Швартування суден за допомогою таких лебідок роблять у режимі ручного керування, а на стоянці вони утримують судна на швартовах з постійним натягом каната в автоматичному режимі. При зниженні зусилля (ослабленні каната) лебідка автоматично вибирає канат (намотує його на барабан), а зі збільшенням натягу швартовів понад задане зусилля – попускає канат (повертає барабан для подовження швартова). Автоматичні швартовні лебідки виготовляють з електричними чи гідравлічними приводами у залежності від типу судна. Установлюють лебідки на палубі в зручному для виробництва швартовних операцій місці. Пост керування може бути розташований і на деякій відстані від лебідок.

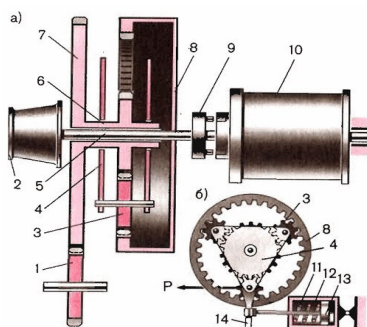


Рис. 1. Автоматична швартовна лебідка з електричним приводом, яка встановлюється на суховантажних суднах

Автоматичну швартовну лебідку з електричним приводом обладнають редуктором, що при пуску електродвигуна приводить в обертання шестірню 1 і пустотілий вал 6 із шестірнею 7 і шестірнею планетарної передачі (на рис. 1 електродвигун і система управління двигуном не показані). Остання, обертаючи в нерухомому корпусі 4, через шестірні-сателіти 3 і корончатую шестірню 8 обертає вантажний вал 5. На вантажному валу лебідки змонтовані швартовна турачка 2 і швартовний барабани 10, причому турачка жорстко скріплена з вантажним валом, а барабан з'єднаний з ним за допомогою кулачкової муфти 9. При включенні муфти 9 електродвигун через редуктор, шестірню 7 і корончатую шестірню 8 передає обертаючий момент на барабан 10 лебідки. Зусилля на швартовному канаті через шестірні 8 і 3 сприймається корпусом 4 планетарні передачі, що утримується від повертання пружиною 11 перемикача режимів.

Кожному зусиллю Р на швартовному канаті лебідки відповідає визначене положення поршня 13 у циліндрі 12, тобто натяг пружини 11. При ослабленні чи натягу швартовного каната рівновага порушується. Наприклад, зі зменшенням зусилля Р (ослабленням каната) пружина 11, впливаючи на поршень 13, повертає важіль 14, зв'язаний з командоконтролером, вправо й електродвигун включається в режим вибирання каната. При збільшенні натягу каната (зростанням зусилля Р) пружина 11 стискується, важіль 14 повертається вліво й електродвигун включається в режим травлення каната. Коли зусилля у швартовному канаті і натяг пружини перемикача режимів роботи лебідки досягнуть заданого значення, важіль 14 розімкне ланцюг керування електродвигуна. Обертаючий момент на швартовному барабані в цьому випадку буде урівноважений моментом опору на корпусі планетарної передачі лебідки.

Математична модель

Рівняння електромагнетного стану досліджуваного пристрою запишемо у вигляді [1]

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} = \mathbf{A}(\mathbf{u} - \mathbf{\Omega}'\Psi - \mathbf{R}\mathbf{i}) \quad (1)$$

причому

$$\begin{matrix} \lambda_S \\ \lambda_R \end{matrix}, \lambda = \mathbf{u}, \Psi, \mathbf{i}; \mathbf{A} = \begin{matrix} A_S & A_{SR} \\ A_{RS} & A_R \end{matrix}; \quad (2)$$

$$\mathbf{\Omega}' = \begin{matrix} & & \\ & & \mathbf{\Omega} \end{matrix}; \mathbf{R} = \begin{matrix} \mathbf{R}_S & & \\ & & \mathbf{R}_R \end{matrix},$$

де $\mathbf{i}_k = (i_{kA}, i_{kB})_t$, $k = S, R$ – колонки фазних струмів обмотки статора й перетворених струмів обмотки ротора; $\mathbf{u}_k = (u_{kA}, u_{kB})_t$, $k = S, R$ – колонки фазних на-

пруг обмоток статора та ротора; A_S, A_{SR}, A_{RS}, A_R – матриці

$$\begin{aligned} A_S &= \alpha_S (1 - \alpha_S \mathbf{G}); \quad A_{SR} = A_{RS} = -\alpha_S \alpha_R \mathbf{G}; \\ A_R &= \alpha_R (1 - \alpha_R \mathbf{G}), \end{aligned} \quad (3)$$

де $\mathbf{G}, \mathbf{\Omega}$ – матриці

$$\mathbf{G} = \frac{1}{\alpha_S + \alpha_R + \alpha_m} \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Omega} = \frac{\omega}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -1 & -2 \\ & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

α_m – обернена основна індуктивність, α_S, α_R – обернені індуктивності дисипації обмоток статора й ротора.

$$i_m = 2\sqrt{(i_A^2 + i_{A'B}^2 + i_B^2)/3}; \quad i_A = i_{SA} + i_{RA}; \quad i_B = i_{SB} + i_{RB}, \quad (5)$$

де i_m – модуль просторового вектора намагнечувальних струмів.

У нашому випадку відсутнє насичення, отже обернені статична (τ) й диференціальна (ρ) індуктивності рівні. Характеристикою намагнечування є пряма і ми отримуємо найпростішу з усіх відомих математичну модель електричного приводу; $\mathbf{R}_S, \mathbf{R}_R$ – матриці опорів

$$\mathbf{R}_S = \begin{bmatrix} r_S & & \\ & r_S & \\ & & r_S \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R}_R = \begin{bmatrix} r_R & & \\ & r_R & \\ & & r_R \end{bmatrix} \quad (6)$$

причому r_S – опір фаз статора; r_R – приведений опір обмотки ротора.

Елементи матриці-вектора повних потокозчеплень обмоток статора й ротора знаходимо наступним чином

$$\Psi_{kj} = \frac{1}{\tau} (i_{Sj} + i_{Rj}) + \frac{1}{\alpha_k} i_{kj}, \quad j = A, B; \quad k = S, R. \quad (7)$$

Елементи колонок напруг статора й ротора

$$u_S = (U_m \sin(\omega_0 t), U_m \sin(\omega_0 t - 120^\circ))_t; \quad u_R = 0, \quad (8)$$

де U_m, ω_0 – амплітуда й кругова частота напруги мережі.

Диференціальні рівняння стану доповнюємо рівнянням механічного руху

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P_0}{J} (M_E - M(\omega)), \quad M_E = \sqrt{3} p_0 (\Psi_{SA} i_{SB} - \Psi_{SB} i_{SA}), \quad (9)$$

де $M(\omega)$ – механічний момент; p_0 – число пар магнетних полюсів; J – момент інерції ротора; M_E – електромагнетний момент, який заданий так:

$$M(\omega) = \begin{cases} 275, & \text{якщо } 0 \leq t < 0.75; \\ 0, & \text{якщо } 0.75 \leq t < 1.25; \\ -200, & \text{якщо } 1.25 \leq t < 1.75; \\ 0, & \text{якщо } 1.75 \leq t < 2.25. \end{cases} \quad (10)$$

Система диференціальних рівнянь (1), (9) – математична А-модель досліджуваного пристрою. Позитивною стороною побудованої А-моделі є те, що її диференціальні рівняння записані в нормальній формі Коші, що суттєво спрощує обчислювальний процес, пов'язаний з їх інтегруванням. При практичному користуванні нею необхідно знати такі вхідні дані: опори й обернені індуктивності дисипації обмоток статора й ротора; характеристику холостого стану, а при неврахуванні насичення основного магнетного кола – обернену основну індуктивність машини, число пар магнетних полюсів і момент інерції ротора. Вхідними сигналами є: фазні напруги живлення і механічний момент на валу.

Систему звичайних диференціальних рівнянь (1), (9) запишемо в загальному вигляді

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = f(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} = (\mathbf{i}, \omega)_t. \quad (11)$$

Інтегрування диференціальних рівнянь (11) при заданих початкових умовах $\mathbf{x}(t)|_{t=0} = \mathbf{x}(0)$ становить задачу Коші для заданої системи диференціальних рівнянь, яка презентує задачу розрахунку перехідних процесів пристрою.

Задача аналізу перехідних процесів виконавчих об'єктів, де взаємодіють процеси різної фізичної природи, має практичне розв'язання лише в часовому просторі. Методи позачасового простору (метод гармонічного балансу, точковий метод тощо), які досі використовуються в предметній області дослідження, дають можливість знаходити лише електромагнетні процеси при фіксованих значеннях механічних змінних.

Результати симуляцій

Технічні дані асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором: номінальна потужність $P_{ном} = 46$ кВт; номінальна напруга (лінійна) $U_{л,ном} = 380$ В; номінальна напруга (фазна) $U_{ф,ном} = 220$ В; синхронна швидкість обертання $n_{с,ном} = 1000$ об/хв; номінальна швидкість обертання $n_{ном} = 986$ об/хв; номінальний струм $I_{ном} = 85,59$ А; пусковий струм $I_{п} = 6,5 I_{ном}$; струм намагнічування $I_{\mu} = 50,5$ А; номінальний момент $M_{ном} = 440$ Нм; пусковий момент $M_{п} = 1,2 M_{ном}$; критичний момент $M_{кр} = 2,1 M_{ном}$; коефіцієнт корисної дії $\eta_{ном} = 91,5$ %; коефіцієнт потужності $\cos\phi_{ном} = 0,89$; активний опір статорної обмотки $r_c = 0,1$ Ом; індуктивний опір статорної обмотки $x_c = 0,23$ Ом; активний опір роторної обмотки, приведений до активного опору статорної обмотки $r'_p = 0,04$ Ом; індуктивний опір роторної обмотки, приведений до індуктивного опору статорної обмотки $x'_p = 0,36$ Ом; індуктивний опір ланцюга намагнічування $x_{\mu} = 4,35$ Ом; момент інерції двигуна $J_{дв} = 1,2$ кг·м²; число пар полюсів $p_{п} = 3$.

Величини моментів залежать від настроювання автоматичної системи слідкування за натягом швартовного каната. А відрізки часу $0-t_1, t_1-t_2, t_2-t_3 \dots$ можуть бути різні у залежності від зовнішніх умов. Тобто вантажно-розвантажувальні роботи, приливи і відливи тощо. Зрозуміло, що навантажувальна діаграма може бути й іншою.

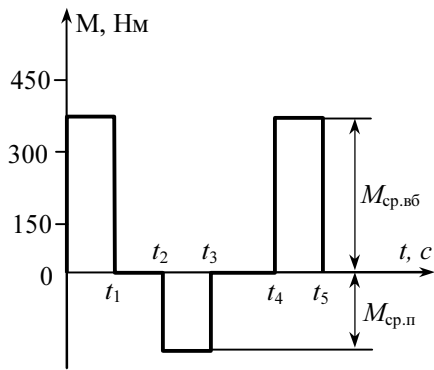


Рис. 2. Діаграма моменту навантаження

$M_{ср.вб}$ – середній момент вибирання; $M_{ср.п}$ – середній момент попускання.

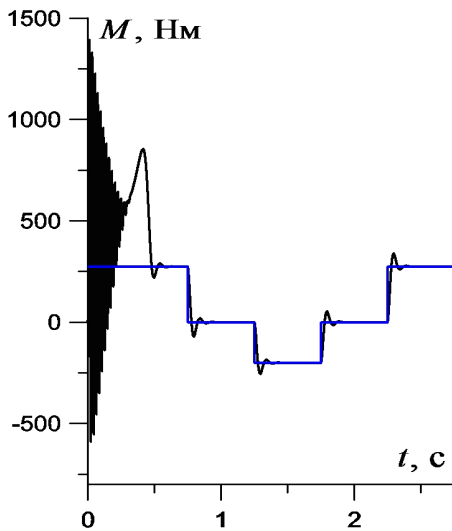


Рис. 3. Реакція електромагнетного моменту на стрибкоподібну зміну механічного навантаження

Рисунок 3 демонструє відповідність між електромагнетним і механічним навантаженням. Тобто при зміні електромагнетного моменту електромеханічний має невеликий перехідний стан і при усталенні того жно рівний першому.

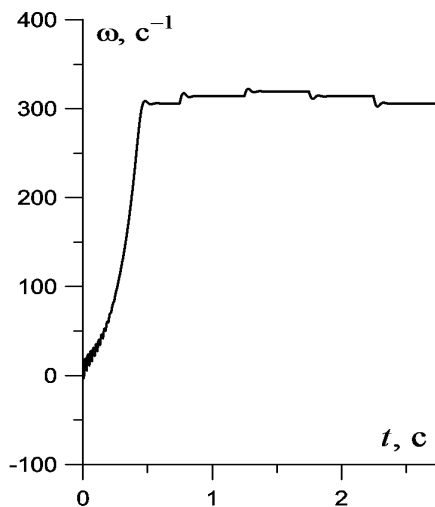


Рис. 4. Пуск досліджуваного пристрою при відповідних моментах навантаження рис. 2

Як видно з рисунків автоматична швартова лебідка з електричним приводом успішно запускається при нульовій початковій кутовій швидкості. Перехідний процес досліджуваного пристрою триває близько 0,75 с. Очевидно, що при зміні моменту в кожен конкретний часовий проміжок маємо зміну як кутової швидкості так і струму обмотки статора.

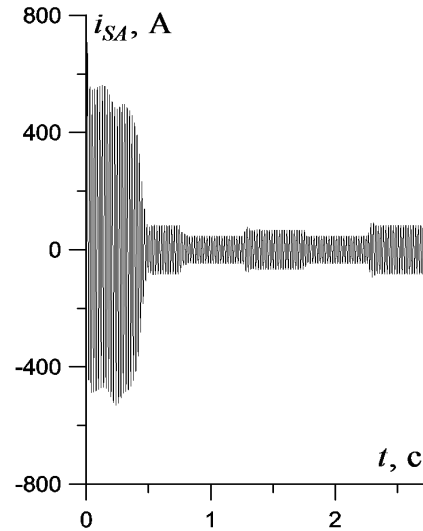


Рис. 5. Залежність $i_{SA} = i_{SA}(t)$, що відповідає кривій рис. 4

Висновок

Побудована математична модель дає можливість здійснювати розрахунок перехідних станів системи не вдаючись до реальних експериментів. Її адекватність підтверджена всесторонніми експериментами.

- [1]. Чабан В. Математичне моделювання в електротехніці. – Л.: Вид-во Тараса Сороки, 2010, 508 с.
- [2]. Tchaban V. Auxiliary model of parametric sensitivity / Vasil Tchaban, Serhiy Kostyuchko, Zorana Tchaban // Computational Problems of Electrical Engineering. – Lviv, 2012. – V. 2, № 2. – P. 105-111.
- [3]. Чабан В. Алгоритм розрахунку перехідних і усталених процесів асинхронного мотора / В. Й. Чабан, З. І. Гоголь, С. М. Костючко // Електротехніка і електромеханіка. – Харків, 2011. – № 3. – С. 46-48.
- [4]. Чабан В. Побудова матриці монодромії глибокопазних асинхронних моторів / Чабан В., Гоголь З., Костючко С. // Електроенергетичні та електромеханічні системи: Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Л.: Вид-во Національного університету "Львівська політехніка", 2010. – № 671. – С. 124-128.
- [5]. Khusainov D. Introduction in modeling of dynamical systems (in Ukrainian) – Kyiv, 2010. – 130 p.
- [6]. Козоріз В. Транспорт майбутнього // Технічні вісті, 2005 / 1(20), 2(21). – С. 29-34.
- [7]. Lyashko S.I. Generalized Optimal Control of Linear Systems with Distributed Parameters / Dordrecht, Boston, London. – Kluwer Academic Publishers. – 2002. – 455 p.
- [8]. Aprile T.I. A computer algorithm to determine the steady-state response of non linear oscillators / Aprile T.I., Trick T.N. // IEEE, Trans. Circuit Theory. – 1972. – vol. 19. – P. 354-360.
- [9]. Korn G. Mathematical handbook for scientists and engineers / Korn G., Korn T. Toronto, London: Mc. Graw-Hill book comp. – 1996. – 720 p.