УДК 629.56/.5.064:681.51:621.391
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/08

***Хлопенко М. Я.***
Херсонська державна морська академія

# МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В АДАПТИВНІЙ ЧАСТОТНО КЕРОВАНІЙ СИСТЕМІ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СУДНОВОГО ПІДРУЛЮЮЧОГО ПРИСТРОЮ

*У статті розв'язана проблема моделювання перехідних процесів в адаптивній самонастроювальній системи з еталонною моделлю та частотно керованим асинхронним електродвигуном (АД) суднового підрулюючого пристрою зі спостерігачем стану та параметричною невизначеністю осьових моментів інерції гребного гвинта фіксованого кроку з приєднаною масою води до його лопатей, а також деталей рухомих мас (вхідного і вихідного валів конічної зубчастої передачі редуктора, муфти та упорного диску підшипника), що з'єднують гвинт із ротором електродвигуна. Математичний опис об'єкта та еталонної моделі надається у просторі станів. Моменти інерції рухомих мас деталей, що обертаються навколо нерухомих осей вхідного та вихідного валів конічної передачі приводяться до осі обертання ротора електродвигуна. За фазові координати приймаються крутний момент, кутова швидкість ротора двигуна та швидкість обертання магнітного поля відносно статора. Кожна з цих координат подається в безрозмірній формі. Стан об'єкта описується трьома лінійними диференціальними рівняннями у нормальній формі Коші. Ці рівняння об'єкта були представлені в канонічній керованій та спостережуваній формах Луенбергера у вигляді матриць третього порядку. При цьому елементи матриці канонічної еталонної моделі приймалися рівними відповідним елементам матриці номінального об'єкта і в процесі функціювання системи залишалися незмінними. Вплив зазорів зубчастої передачі на поведінку системи не враховувався. Для оцінки безрозмірних координат об'єкта використовувався спостерігач стану, подібний спостерігачу Луенбергера. Адаптивна структурна схема моделювання перехідних процесів у системі будувалася в пакеті Simulink. Для забезпечення збіжності фазових координат об'єкта і моделі використовувався прямий метод Ляпунова. За цим методом знайдено алгоритм адаптації та на його основі встановлено зворотний зв'язок та побудовано адаптивний регулятор, що з'єднує вихід системи зі входом об'єкта. Встановлено функціональний зв'язок кутової швидкості ротора АД з вихідним сигналом швидкості блока еталонної моделі, а також крутного моменту і кутової швидкості магнітного поля із кутовою швидкістю цього ротора, що пов'язана із вказаним сигналом блока еталонної моделі. Удосконалено математичну модель, розроблено методологію та схему моделювання адаптивної системи частотного керування асинхронного електропривода з невизначеними осьовими моментами інерції мас, що обертаються навколо нерухомих осей валів конічної зубчастої передачі, та спостерігачем для визначення оцінок фазових координат об'єкта. Результати моделювання перехідних процесів кутової швидкості ротора, крутного моменту та кутової швидкості обертання магнітного поля відносно статора при пуску АД підтверджують стабілізацію цих параметрів на усталеному режимі та збіг їх оцінок до параметрів еталонної моделі з високою точністю.*

***Ключові слова:*** *судновий підрулюючий пристрій, система адаптивна частотно керована, електродвигун асинхронний, пускові перехідні процеси.*

**Постановка проблеми.** Суднові підрулюючи пристрої (СПП) тунельного типу з асинхронним електродвигуном (АД), зубчастою конічною передачею та гвинтом фіксованого кроку є найбільш відповідальними пристроями, що забезпечують утримання судна при русі за заданою фазовою траєкторією. Тому до ефективності їх роботи пред'являються підвищені вимоги щодо відхилення фазових координат судна від цієї траєкторії.

Сучасні СПП не в повній мірі задовольняють цим вимогам у зв'язку з відхиленнями робочих параметрів АД від номінальних значень. Ці відхилення параметрів обумовлені виникаючими при експлуатації пристрою різного виду параметричних невизначеностей. До них відносяться осьовий момент інерції гвинта з приєднаним моментом інерції маси води, що досягає 25…40 % від моменту інерції матеріалу гвинта, а також невідомі постійні осьові моменти інерції конічної зубчастої передачі з горизонтальним та вертикальним валами, муфти з'єднання ротора АД з вертикальним валом та диску упорного підшип-

ника, що не перевищують 25…35 % від осьового моменту інерції ротора двигуна.

Особливо гостро проблема впливу невизначеностей моментів інерції гвинта з приєднаною масою води, зубчастої передачі, її валів, муфти та упорного диску на якість функціювання АД проявляється на пусковому режимі роботи, як найбільш тяжким серед інших режимів його експлуатації.

У цьому режимі вказана параметрична невизначеність породжує такі невизначеності АД, як крутний момент, кутова швидкість ротора та кутова швидкість магнітного поля відносно статора при функціюванні СПП. Тому проблема компенсації параметричної невизначеності частотно регульованого підрулюючого пристрою на пусковому режимі роботи АД є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найбільш важливішими теоріями, які можуть бути застосовані для вирішення проблеми компенсації параметричної невизначеності, є робастне та адаптивне керування. Основна відмінність робастної системи керування від адаптивної полягає у тому, що в неї не використовується інформація про невизначеність об'єкта в процесі його експлуатації. В адаптивній системі керування з еталонною моделлю, що розглядається, та спостерігачем стану інформація про стан об'єкта присутня і компенсується при його експлуатації за рахунок автоматичної настройці регулятора.

В даної роботі для моделювання адаптивної самонастроювальної автоматичної системи керування з еталонною моделлю служили метод простору стану [1, с. 6] та другий метод функцій Ляпунова. Задача керування полягала у виконанні двох умов. Перша з них заключалася у компенсації параметричної невизначеності осьових моментів інерції гвинта з приєднаною масою води та деталей, що приводяться до руху електродвигуном, при забезпеченні збіжності оцінок фазових координат об'єкта і еталонної моделі на нескінченому відрізку часу, а друга – в забезпеченні слідкування вихідної координати об'єкта за виходом еталонної моделі.

За виконанням першої з цих умов та із застосуванням методу Ляпунова знайдено, як і в роботі [2, с. 262], алгоритм адаптації. На його основі встановлений зворотний функціональний зв'язок між виходом об'єкта та входом системи, що замикається через адаптивний процес, і, таким чином, отримано адаптивний регулятор. Виконання другої умови здійснювалося в процесі спостереження за кривими перехідних процесів фазових координат еталонної моделі та оцінок фазових координат об'єкта спостерігачем [2, с. 262].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз ефективності досліджень проводився за збіжністю отриманих кривих цих координат. Однак у цій роботі залишилася невирішеною проблема встановлення функціонального зв'язку фазових координат об'єкта та їх оцінок спостерігачем з вихідними координатами еталонної моделі, яка розв'язується у даній роботі. Також усуваються деякі недоліки, які були допущені в роботі, та уточнюються математична модель, схема моделювання та розрахунки перехідних процесів.

Удосконалення системи керування комплексом підрулюючих пристроїв, яка автоматично контролює положення судна в заданому положенні при хвилюванні моря, а також рухом на ходу за заданим курсом, розглянуто в роботі [3, с. 45]. В ній запропоновано новий практичний метод побудови систем керування цим комплексом, а в роботі [4, с. 39] – схему оптимізації математичної моделі зазначеного комплексу. Схема моделі основана на застосуванні електронних регуляторів в системах автоматичного регулювання і управління підрулюючим пристроєм. Однак отримані у цих роботах результати відносяться до суден спеціального призначення, обладнання яких автоматичною системою регулювання комплексу підрулюючих пристроїв дозволяє забезпечити утримання суден в режимі динамічного позиціонування при активному використанні суднових рушіїв.

Проблема адаптивного керування судновим пропульсивним комплексом із синхронним електродвигуном з постійними магнітами обговорюється в роботі [5, с. 1]. В ній на базі представленої теорії стабілізації скорості електродвигуна розраховано та спроектовано оптимальний адаптивний контролер. Відзначається, що запропонована система забезпечує хорошу реакцію на зовнішній обурювальний вплив і не потребує складних корегувань.

Багато робіт зарубіжних вчених присвячено моделюванню адаптивного керування асинхронних електродвигунів із параметричною невизначеністю. Серед них слід відзначити роботу [6, с. 3193], в якій розглядається модель еталонної адаптивної системи для скалярного керування асинхронного двигуна без застосування датчиків. Однак її використання в системах керування підрулюючим пристроєм обмежується відомими труднощами.

Таким чином, короткий огляд останніх зарубіжних та вітчизняних робіт з адаптивного керування

АД дозволяє встановити, що проблема керування судновим підрулюючим пристроєм з гребним гвинтом фіксованого кроку, спостерігачем стану оцінок фазових координат та з параметричною невизначеністю об'єкта є незавершеним дослідженням. Вона в нелінійній постановці відсутня, а в лінійній постановці розглядається вперше.

**Постановка завдання.** Ціллю роботи є моделювання перехідних процесів в адаптивній самонастроювальній системі з еталонною моделлю та частотно керованим АД суднового підрулюючого пристрою з гребним гвинтом фіксованого кроку і спостерігачем стану, який призначений для визначення оцінок фазових координат об'єкта, що утворюють сумісно з вихідними сигналами еталонної моделі зворотний зв'язок керування адаптивним процесом.

**Виклад основного матеріалу.** Математичний опис об'єкта і еталонної моделі надається в просторі станів. Асинхронний електропривод, як об'єкт керування, описується за аналогією з роботою [2, с. 32] трьома лінійними диференціальними рівняннями в нормальній формі Коші:

$$\dot{x}_1 = \frac{M_n}{J\omega_n}x_2 - \frac{M_n}{J\omega_n}x_1;$$
$$\dot{x}_2 = 2z_p M_{cr}\left(\frac{\omega_{0n}}{M_n}x_3 - \frac{1}{\beta}x_2 - \frac{\omega_n}{M_n}x_1\right); \qquad (1)$$
$$\dot{x}_3 = -\frac{1}{T_{fc}}x_3 + \frac{K_{fc}}{T_{fc}K_{fcn}}u.$$

де

$$\beta = \frac{2M_{cr}}{\omega_{0n}s_{cr}}; \quad T_e = \frac{1}{z_p\omega_{0n}s_{cr}};$$

$x_1 = \omega/\omega_n$; $x_2 = M/M_n$; $x_3 = \omega_0/\omega_{0n}$ – безрозмірні фазові координати; $u = U/U_n$ – безрозмірний керуючий вплив; $\omega$, $M$, $\omega_0$ – відповідно кутова швидкість ротора, крутний момент АД та кутова швидкість магнітного поля, що обертається відносно статора; $U$ – керуючий вплив; $M_{cr}$, $s_{cr}$ – відповідно критичний момент та критичне ковзання двигуна; $\beta$ – жорсткість лінеаризованої механічної характеристики АД; $T_e$ – еквівалентна електромагнітна постійна часу двигуна; $K_{fc}$, $T_{fc}$ – відповідно коефіцієнт передачі та постійна часу частотного перетворювача; $z_p$ – число пар полюсів; $J$ – приведений до осі ротора двигуна момент інерції усіх мас, що обертаються двигуном; $n$ – індекс номінальних величин. Точка над кожною безрозмірною фазовою координатою означає похідну за часом.

Другій доданок праворуч в першій формулі системи рівнянь (1) отримано із рівності моментів навантажень за квадратичним та лінійним законами від кутової швидкості $\omega$, що діють на ротор при обертанні гребного гвинта, причому коефіцієнти при цих законах навантаження визначаються за номінальними значеннями крутного моменту та кутової швидкості АД.

Записану систему рівнянь (1) представимо в матричній формі:

$$\dot{x} = Ax + Bu;$$
$$y = Cx, \qquad (2)$$

де

$$A = \begin{bmatrix} -a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ -a_{21} & -a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & -a_{33} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$a_{11} = \frac{M_n}{J\omega_n}; \quad a_{12} = \frac{M_n}{J\omega_n}; \quad a_{13} = 0;$$

$$a_{21} = 2z_p M_{cr}\frac{\omega_n}{M_n}; \; a_{22} = 2z_p\frac{M_{cr}}{\beta}; \; a_{23} = 2z_p M_{cr}\frac{\omega_{0n}}{M_n};$$

$$a_{31} = a_{32} = 0; \quad a_{33} = \frac{1}{T_{fc}}; \quad b = \frac{K_{fc}}{T_{fc}K_{fcn}} = \frac{1}{T_{fc}},$$

$x$ – вектор фазових координат $x_1$, $x_2$, $x_3$; $y$ – вектор виходу об'єкта.

Перетворимо систему рівнянь (2) об'єкта до канонічної керованої форми Луенбергера (3) [1, с. 65]:

$$\dot{v} = \tilde{A}v + \tilde{B}u;$$
$$y = \tilde{C}v, \qquad (3)$$

де

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}; \quad \tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_3 & -a_2 & -a_1 \end{bmatrix}; \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$a_1 = a_{11} + a_{22} + a_{33};$$

$$a_2 = a_{11}a_{22} + a_{21}a_{12} + a_{11}a_{33} + a_{22}a_{33};$$

$$a_3 = a_{33}(a_{11}a_{22} + a_{12}a_{21}).$$

Тут фазовий вектор $v$ відрізняється від вектора фазових координат об'єкта $x$та пов'язаний з ним матрицею подібності [1, с. 61].

Для еталонної моделі значення параметрів $a_1$, $a_2$, $a_3$ вважаємо рівними відповідним номінальним значенням параметрів об'єкта. З урахуванням цього та за властивістю матриць запишемо рівняння еталонної моделі в канонічній спосте-

режуваній формі Луенбергера [1, с. 67] таким чином:

$$\dot{v}_m = A_m v_m + B_m g; \quad y_m = C_m v_m, \tag{4}$$

де

$$v_m = \begin{bmatrix} v_{1m} \\ v_{2m} \\ v_{3m} \end{bmatrix}; \quad A_m = \begin{bmatrix} -a_{1n} & 1 & 0 \\ -a_{2n} & 0 & 1 \\ -a_{3n} & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad C_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$B_m = B;$$

$m$ – індекс моделі; $y_m$ – вихід моделі; $g$ – керуючий вплив.

Тут вектор $v_m$ пов'язаний з фазовим вектором об'єкта $x$ теж матрицею подібності, як і в попередньому випадку.

Вектор похибки слідкування об'єкта за еталонною моделлю запишемо у вигляді

$$e(t) = \hat{v}(t) - v_{\mathrm{m}}(t), \tag{5}$$

де $\hat{v}(t) = \begin{bmatrix} \hat{v}_1(t) & \hat{v}_2(t) & \hat{v}_3(t) \end{bmatrix}^T$ – оцінка фазового вектора об'єкта (3) спостерігачем стану.

Складемо цільову умову

$$\lim_{t\to\infty} e(t) = 0. \tag{6}$$

Запишемо рівняння оцінки параметризованого фазового вектора об'єкта, яке подібне спостерігачу Луенбергера, як і в роботі [2, с. 264]:

$$\hat{v} = (pI - A_m)^{-1}\varepsilon y + (pI - A_m)^{-1} u, \tag{7}$$

де $\varepsilon = \begin{bmatrix} a_{1n} - a_1 \\ a_{2n} - a_2 \\ a_{3n} - a_3 \end{bmatrix}$ – матриця параметричної неузгодженості між параметрами моделі та об'єкта; $y = v_1$ – вихід об'єкта.

Структура закону для формування керування $u(t)$ знаходилася за допомогою другого методу Ляпунова, як і в роботі [2, с. 264]:

$$u(t) = \hat{\Theta}^T \hat{v} + g = \hat{\theta}_1 \hat{v}_1 + \hat{q}_2 \hat{v}_2 + \hat{q}_3 \hat{v}_3 + g, \tag{8}$$

де $\hat{\Theta}^T = (\hat{\theta}_1 \quad \hat{\theta}_2 \quad \hat{\theta}_3)$ – оцінка вектора параметричних неузгоджень, що визначається за відомим так званим стандартним алгоритмом адаптації

$$\dot{\hat{\Theta}} = \gamma \hat{v} K^T P e, \tag{9}$$

де $\gamma$ – коефіцієнт адаптації; $K = [0 \;\; 0 \;\; 1]^T$.

В записаній формулі (8) матриця $P$ визначається за рівнянням Ляпунова (10):

$$A_m^T P + P A_m = -Q, \tag{10}$$

де $Q$ – довільна симетрична матриця.

Формула (9) дозволяє визначити за коренями рівняння (10) квадратної матриці $P$ наступні вирази для координат $\hat{\theta}_1$, $\hat{\theta}_2$, $\hat{\theta}_3$ вектора $\hat{\Theta}$:

$$\dot{\hat{\theta}}_1 = q\hat{v}_1; \quad \dot{\hat{\theta}}_2 = q\hat{v}_2; \quad \dot{\hat{\theta}}_3 = q\hat{v}_3, \tag{11}$$

де

$$q = \gamma(p_{31}e_1 + p_{32}e_2 + p_{33}e_3);$$

$p_{31}$, $p_{32}$, $p_{33}$ – корені рівняння Ляпунова (10), що розташовані в третьому рядку квадратної матриці $P$; $e_1$, $e_2$, $e_3$ – координати вектора похибки (5) слідкування об'єкта за еталонною моделлю.

Таким чином, запропоновано математичний апарат (1)–(11) для моделювання в пакеті Simulink автоматичної самонастроювальної системи керування з еталонною моделлю частотно керованого асинхронного електроприводу суднового ПП тунельного типу з параметричною невизначеністю осьових моментів інерції гребного гвинта фіксованого кроку з приєднаною масою води, валів, муфти та зубчастої передачі. Структурна схема автоматичної системи моделювання в цьому пакеті представлена на рис. 1. Вона складається із блоків еталонної моделі 1, об'єкта 2, спостерігача 3, 4, трьох блоків 5–7 Demux, трьох блоків Mux 8–10, віртуальних осцилографів 11–14 для графічного зображення безрозмірних фазових координат кутової швидкості $x_1$ (поз. 11), крутного моменту $x_2$ (поз. 12), кутової швидкості магнітного поля $x_3$ (поз. 13) та їх оцінок $\hat{x}_1$, $\hat{x}_2$, $\hat{x}_3$ спостерігачем стану об'єкта, а також похибок (поз. 14) збіжності цих координат до їх оцінок при слідкуванні об'єкта за еталонною моделлю, блоків підсилення, декілька суматорів та блоків множення, вхідного одиничного ступінчастого сигналу, аперіодичної ланки, розташованої за цим сигналом, ліній зв'язків та адаптивного регулятора АР, що утворює від'ємний зворотний зв'язок між виходом системи (сигналами $v_1$, $v_2$, $v_3$ та їх оцінками $\hat{v}_1$, $\hat{v}_2$, $\hat{v}_3$) та входом в об'єкт (сигнал, рівний скалярному добутку $\hat{\Theta}\hat{v}$ векторів $\hat{\Theta}$ та $\hat{v}$).

Вихідні сигнали $v_1$, $v_2$, $v_3$ еталонної моделі, як було замічено вище, не співпадають з фазовими координатами об'єкта $x_1$, $x_2$, $x_3$. Зв'язок між цими сигналами та фазовими координатами об'єкта визначається за матрицею подібності [1 с. 61, 67] або за формулою Аккермана [1 с. 71]. Зворотна матриця цієї матриці подібності, що встановляє зв'язок фазових координат об'єкта із вихідними сигналами еталонної моделі, дозволяє виразити

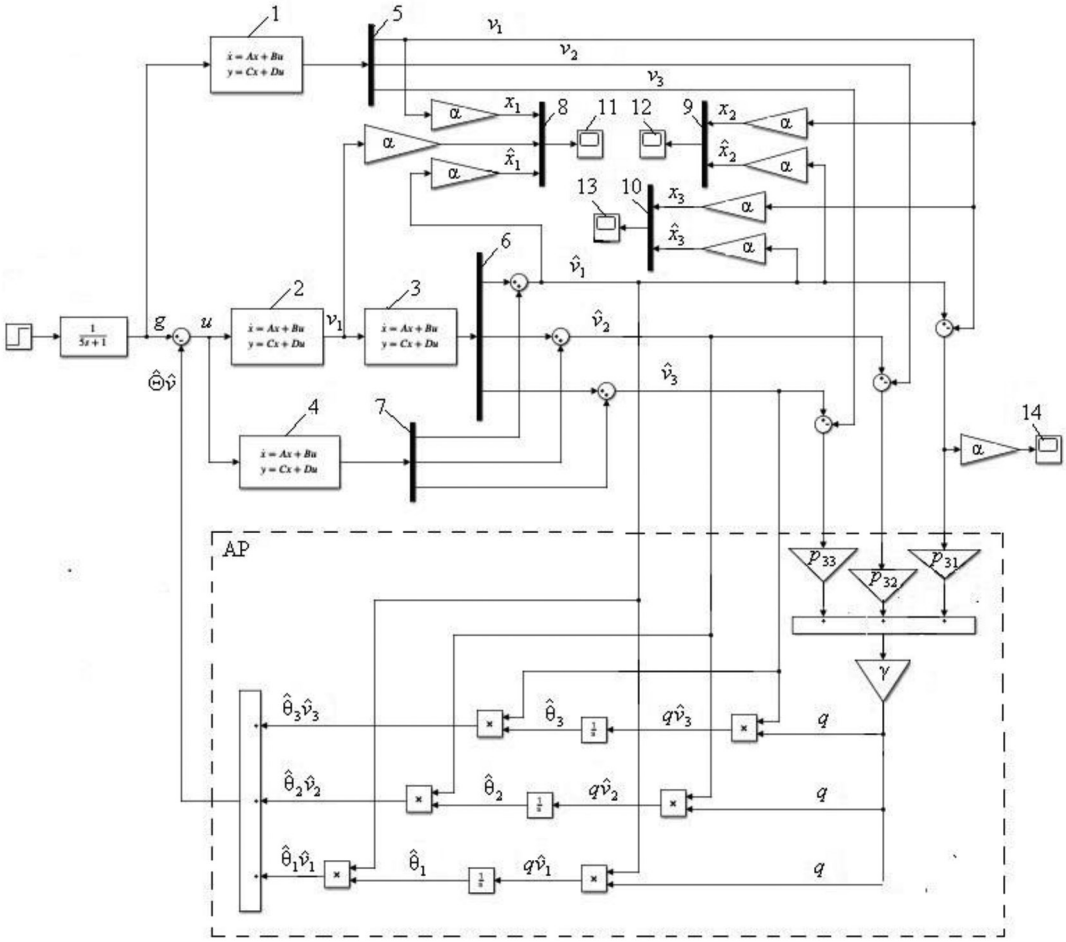


**Рис. 1. Структурна схема моделювання самонастроювальної системи із еталонною моделлю та параметричною невизначеністю:**

кожну координату об'єкта $x_1$, $x_2$, $x_3$ із вихідними сигналами еталонної моделі $v_1$, $v_2$, $v_3$. Однак ця процедура потребує громіздких математичних викладок. Тому в даній роботі за зворотною матрицею матриці подібності розраховується тільки одна фазова координата $x_1$ за формулою

$$x_1 = \alpha v_1. \tag{12}$$

Невідомий коефіцієнт α в цій формулі визначається за елементом зворотної матриці, який знаходиться на перетину першій строки та першого стовпця. Іншими двома дуже малими елементами, що знаходяться в першій строчці, нехтуємо, оскільки вони не впливають на результати обчислень координати $x_1$.

Для визначення залежності фазової координати $x_2$ від координати $x_1$ скористаємося формулою (13):

$$M_p\omega_p = M\omega\eta, \tag{13}$$

де $M_p$, $\omega_p$ – навантаження та кутова швидкість гребного гвинта; $M$, ω – крутний момент та кутова швидкість АД; η – ККД СПП.

Записана формула (13) визначає передачу ефективної потужності від АД до гребного гвинта.

При автоматичному частотному керуванні плавним пуском двигуна за заданим адаптивним алгоритмом та побудованим на його основі зворотним функціональним зв'язком будуть забезпечені достатньо малі прирощення $\Delta M$ крутного моменту $M$ та Δω кутової швидкості ω при неперервній зміні навантаження $M_p$ на величину $\Delta M_p$ та швидкості $\omega_p$ на величину $\Delta\omega_p$. Тому в кожний момент часу формулу (13) можно представити у вигляді (14):

$$(M_p + \Delta M_p)\cdot(\omega_p + \Delta\omega_p) = \\ = (M + \Delta M)\cdot(\omega + \Delta\omega)\eta, \tag{14}$$

де

$$M_p = jM; \quad \Delta M_p = j\Delta M; \\ \omega = j\omega_p; \quad \Delta\omega = j\Delta\omega_p; \tag{15}$$

$j$ – передавальне число конічної передачі редуктора.

Розкривши дужки в обох частинах рівності (14) та нехтуючи достатньо малими квадратич-

ними членами, отримаємо з урахуванням (15) таке рівняння:

$$(M\Delta\omega + \omega\Delta M)(1 - \eta) = 0,$$

або після скорочень на величину$(1 - \eta) > 0$

$$M\Delta\omega + \omega\Delta M = 0. \qquad (16)$$

З рівняння (16) при достатньо малих відхиленнях керованої робочої точки від лінійного участку жорсткої механічної характеристики електродвигуна будемо мати:

$$\frac{\Delta M}{M_n} = -\frac{\Delta\omega}{\omega_n} \quad \text{або} \quad \frac{M_n - M}{M_n} = \frac{\omega_n - \omega}{\omega_n},$$

що випливає з подоби прямокутних трикутників з гіпотенузами із загальною вершиною в номінальній точці механічної характеристики.

Звідси знаходимо:

$$\frac{M}{M_n} = \frac{\omega}{\omega_n},$$

або

$$x_2 = x_1 = \alpha v_1. \qquad (17)$$

Зв'язок фазової координати $x_3 = \frac{\omega_0}{\omega_{0n}}$ із координатою $x_1$, що визначається за формулою (12), можна дістати, якщо поділити чисельник $\omega_0$ на знаменник $\omega_{0n}$ записаного виразу для $x_3$ на величину $(1 - s) \neq 0$ ($s$ – відносне ковзання двигуна). Тоді будемо мати:

$$x_3 = x_1 = \alpha v_1. \qquad (18)$$

Похибка збіжностей оцінок фазових координат до еталонної моделі визначається за формулою

$$\varepsilon = \alpha(\hat{v}_1 - v_1) \qquad (19)$$

та неперервно відображається у вигляді графіка віртуальним осцилографом (див. рис. 1, поз. 14).

Таким чином, отримані залежності (12), (17)–(19) дозволяють при моделюванні в пакеті Simulink забезпечити неперервну візуалізацію безрозмірних величин кутових швидкостей ротора магнітного поля, моменту, їх оцінок та похибок збіжності цих оцінок до еталонної моделі при адаптивному частотному керуванням процесом пуску АД.

На прикладі асинхронного електропривода суднового підрулюючого пристрою сучасного контейнеровоза з асинхронним двигуном HLA9 632-64Y потужністю 1200 кВт, номінальним крутним моментом 9653,9 Н · м, критичним моментом 24134,7 Н · м, критичним ковзанням 0,05411 та моментом інерції ротора 64 кг · м$^2$, частотою обертання 124,302 рад/с, напругою 440 В на клемах статора, зубчастою передачею з передавальним числом 5,3, гребним гвинтом з моментом інерції 17 кг · м$^2$ та приєднаним невизначеним моментом інерції води 6,8 кг · м$^2$ та іншими параметричними невизначеностями з приведеним до осі ротора АД сумарним моментом інерції 0.82 кг · м$^2$ (з них 0,06 кг · м$^2$ відносяться до вертикального валу); параметрами перетворювача частоти $T_{fc}$ = 1/240 с, $K_{fc}$ = 12,57 рад/(В·с); елементом матриці подібності $\alpha = 5{,}438 \cdot 10^5$; коренями рівняння Ляпунова $p_{31} = 0$, $p_{32} = 0{,}0141 \cdot 10^5$; $p_{33} = 0{,}0141 \cdot 10^5$; коефіцієнтом адаптації $\gamma = 10$ та постійною часу префільтра 5 с розраховані та побудовані криві перехідних процесів кутових швидкостей ротора АД, магнітного поля, що обертається навколо статора, крутного моменту, їх оцінок та збіжностей цих кривих та оцінок до відповідних кривих еталонної моделі (рис. 2–4), причому похибка збіжності кривих не перевищує 0,55 %.

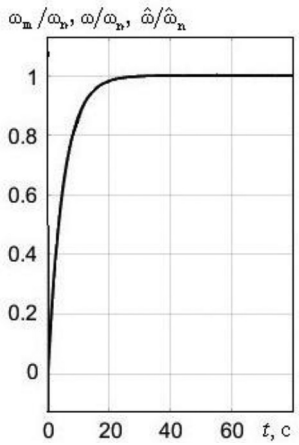


**Рис. 2. Залежність кутових швидкостей моделі $\omega_m$, об'єкта $\omega$ та оцінки $\hat{\omega}$ при пуску двигуна**

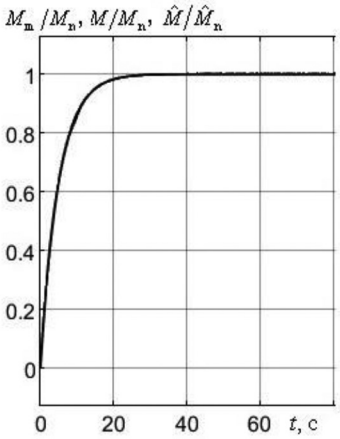


**Рис. 3. Залежність крутних моментів моделі $M_m$, об'єкта $M$ та оцінки $\widehat{M}$ при пуску двигуна**

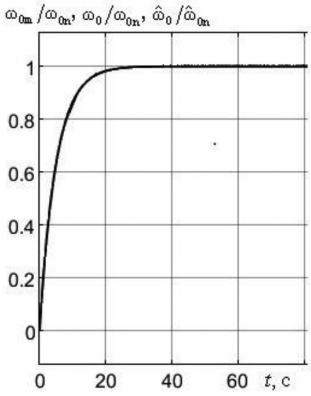


**Рис. 4. Залежність кутових швидкостей магнітного поля моделі $\omega_{0m}$, об'єкта $\omega_0$ та оцінки $\hat{\omega}_0$ при пуску двигуна**

**Висновки.**

1. Удосконалено математичну модель у просторі стану та побудовано структурну схему моделювання перехідних процесів в адаптивній самонастроювальній системі з еталонною моделлю та частотно керованим АД суднового підрулюючого пристрою зі спостерігачем стану та параметричною невизначеністю осевих моментів інерції гребного гвинта та деталей рухомих мас, що з'єднують гвинт із вхідним горизонтальним валом редуктора з конічною зубчастою передачею, а вихідний вертикальний вал – із муфтою, що жорстко з'єднана з ротором асинхронного електродвигуна.

2. Результати моделювання перехідних процесів кутової швидкості ротора, крутного моменту та магнітного поля, що обертається навколо статора, при пуску двигуна підтверджують високу точність стабілізації цих параметрів та збіг їх оцінок до параметрів еталонної моделі з похибкою, що не перевищує 0,55 % на усталеному режимі.

**Список літератури:**

1. Хлопенко М. Я., Білюк І. С., Шевченко В. В. Оптимальне керування об'єктами: навч. посіб. Миколаїв : НУК, 2013. 172 с.

2. Хлопенко М. Я. Моделювання адаптивної системи з еталонною моделлю та частотно керованим асинхронним електродвигуном суднового підрулюючого пристрою. Зб. матеріалів XVI міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2024)» (Одеса, 29–31 травня 2024 р.). Одеса, 2024. С. 262–265.

3. Будашко В. В., Онищенко О. А. Удосконалення системи управління підрулюючим пристроєм комбінованого пропульсивного комплексу. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2014. № 38(1081). С. 45–51.

4. Юшков Є. О. Моделювання режимів роботи суднової енергетичної установки комбінованого пропульсивного комплексу. Електротехніка і електромеханіка. 2016. № 6. С. 39–43. DOI: 10.20998/2074-272X. 2016.6.07

5. Zwierzewicz Z., Tarnapowicz D., Nerc A. Adaptive PMSM Control of Ship Electric Propulsion with Energy-Saving Features. *Energies*. 2024. 17. 2178. P. 1–16. URL: https://doi.org/10.3390/en17092178

6. Prakash R. B. R., Srinivasa Varma P., Pandian A., Prasad Rao K.P. Model Reference Adaptive System (MRAS) Technique for Sensorless Scalar Control of Induction Motor. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2020. Vol. 9. issue 03. P. 3193–3198.URL: https://www.ijstr.org>final-print>mar2020.

**Khlopenko N. J. MODELING OF TRANSIENT PROCESSES IN AN ADAPTIVE FREQUENCY-CONTROLLED SYSTEM WITH AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF A SHIP'S THRUSTER**

*The problem of transient processes modeling in an adaptive self-adjusting system with a reference model and a frequency-controlled asynchronous electric motor (AM) of a ship's thruster with a state observer and parametric uncertainty of the axial moments of inertia of a fixed-pitch propeller with an attached mass of water to its blades, as well as parts of moving masses (input and output shafts of the bevel gear of the gearbox, clutch and thrust disk of the bearing) connecting the propeller with the rotor of the electric motor, was solved in this article. The mathematical description of the object and the reference model is provided in the state space. The moments of inertia of the moving masses of the parts rotating around the fixed axes of the input and output shafts of the bevel gear are reduced to the axis of rotation of the electric mot or rotor. The torque, angular velocity of the motor's rotor and the rotation speed of the magnetic field relative to the stator are taken as phase coordinates. Each of these coordinates is represented in dimensionless form. The state of the object is described by three linear differential equations in Cauchy normal form. These equations of the object were presented in the canonical controlled and observed Luenberger's form as third-order matrices. In this case, the matrix elements of the canonical reference model were taken to be equal to the corresponding elements of the nominal object's matrix, and remain unchanged during the system operation. The impact of gear clearances on the system behavior is not taken into account. A state observer similar to the Luenberger's*

*observer was used to estimate the dimensionless coordinates of the object. An adaptive structural diagram for simulating of the transient processes in the system was built in the Simulink package. To ensure convergence of the phase coordinates of the object and the model, the direct Lyapunov method was used. Using this method, an adaptation algorithm was found and, on its basis, a feedback was established and an adaptive controller, that connects the system output with the object input, was built. A functional relationship between the angular velocity of the AM rotor and the output signal velocity of the reference model block, as well as the torque and angular velocity of the magnetic field from the angular velocity of this rotor associated with the specified signal of the reference model block, was established. The mathematical model was improved, a methodology and a modeling scheme for an adaptive frequency control system of an asynchronous electric drive with uncertain axial moments of inertia of rotating around fixed axes of the shafts of a bevel gear transmission masses, and an observer for determining the estimates of the phase coordinates of the object were developed. The mathematical model was improved, a methodology and a modeling scheme for an adaptive frequency control system of an asynchronous electric drive with uncertain axial moments of inertia of rotating masses and an observer for determining the estimates of the phase coordinates of the object were developed. The results of transient processes modeling of the angular velocity of the rotor, torque and angular velocity of the magnetic field relative to the stator during the start of the AM confirm the stabilization of these parameters in the steady-state mode and the coincidence of their estimates to the parameters of the reference model with high accuracy.*

***Key words:*** *ship's thruster, adaptive frequency-controlled system, asynchronous electric motor, starting transient processes.*