

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt} = U_{1\alpha} - \frac{L_2 R_1}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \psi_{1\alpha} + \frac{L_m R_1}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \psi_{2\alpha} \\ \frac{d\psi_{1\beta}}{dt} = U_{1\beta} - \frac{L_2 R_1}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \psi_{1\beta} + \frac{L_m R_1}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \psi_{2\beta} \\ \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} = \frac{L_m R_2}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \psi_{1\alpha} - \frac{L_1 R_2}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \psi_{2\alpha} - z_n \omega \psi_{2\beta} \\ \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} = \frac{L_m R_2}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \psi_{1\beta} - \frac{L_1 R_2}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \psi_{2\beta} + z_n \omega \psi_{2\alpha} \\ M = 1,5 \cdot z_n \frac{L_m}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} (\psi_{2\alpha} \cdot \psi_{1\beta} - \psi_{1\alpha} \cdot \psi_{2\beta}) \\ \omega = \frac{M - M_c}{J_{1p}} \end{cases} \quad (1)$$

де $U_{1\alpha}, U_{1\beta}$ – проекції векторів напруги статора на координатні осі α, β ; $\psi_{1\alpha}, \psi_{1\beta}, \psi_{2\alpha}, \psi_{2\beta}$ – проекції векторів потокозчеплення статора та ротора на координатні осі α, β ; L_1, L_2 – індуктивність статора та ротора відповідно; L_m – коефіцієнт взаємодування.

Після вираження струмів статора через потокозчеплення ротора система рівнянь має вигляд (2)

$$\begin{cases} \psi_{1\alpha} = L_1 \cdot i_{1\alpha} + L_m \cdot i_{2\alpha} \\ \psi_{1\beta} = L_1 \cdot i_{1\beta} + L_m \cdot i_{2\beta} \\ \psi_{2\alpha} = L_2 \cdot i_{2\alpha} + L_m \cdot i_{1\alpha} \\ \psi_{2\beta} = L_2 \cdot i_{2\beta} + L_m \cdot i_{1\beta} \end{cases} \quad (2)$$

Після підстановки значень потокозчеплень виражених через струми (2) у вираз (1) система рівнянь математичної моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у потокозчепленнях ротора і струмах статора буде мати вигляд (3)

$$\begin{cases} \frac{di_{1\alpha}}{dt} = \frac{L_2}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} U_{1\alpha} - \frac{L_2 R_1}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} i_{1\alpha} - \frac{L_m}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} \\ \frac{di_{1\beta}}{dt} = \frac{L_2}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} U_{1\beta} - \frac{L_2 R_1}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} i_{1\beta} - \frac{L_m}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} \\ \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} \psi_{2\alpha} + \frac{L_m R_2}{L_2} i_{1\alpha} - z_n \omega \psi_{2\beta} \\ \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} \psi_{2\beta} + \frac{L_m R_2}{L_2} i_{1\beta} + z_n \omega \psi_{2\alpha} \\ M = 1,5 z_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2\alpha} \cdot i_{1\beta} - i_{1\alpha} \cdot \psi_{2\beta}) \\ \omega = \frac{M - M_c}{J_{1p}} \end{cases} \quad (3)$$

На основі отриманої системи рівнянь для дослідження процесів при частотному регулюванні у самому електродвигуні і далі у системі регульованого електроприводу насоса було складено структурну схему асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором у нерухомій

системі координат α и β та використано метод імітаційного моделювання [6] двофазної моделі. Імітаційна двофазна модель асинхронного двигуна [7,8] при активному номінальному навантаженні, параметри якої наведені у таблиці 1, представлено на рисунку 2.

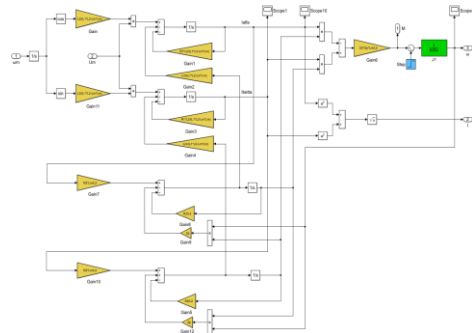


Рис. 2. Імітаційна двофазна модель асинхронного двигуна при активному навантаженні

Таблиця 1
Параметри двофазної імітаційної моделі двигуна

Ланка	Параметри	Значення
Gain	$L_2 / (L_1 \cdot L_2 - L_m \cdot L_m)$	113,662
Gain1	$R_1 \cdot L_2 / (L_1 \cdot L_2 - L_m \cdot L_m)$	75,786
Gain2	$L_m / (L_1 \cdot L_2 - L_m \cdot L_m)$	109,856
Gain3	$R_1 \cdot L_2 / (L_1 \cdot L_2 - L_m \cdot L_m)$	75,786
Gain4	$L_m / (L_1 \cdot L_2 - L_m \cdot L_m)$	109,856
Gain5	R'_2 / L_2	2,12
Gain6	$3/2 \cdot Z_p \cdot L_m / L_2$	1,45
Gain7	$R'_2 \cdot L_m / L_2$	0,387
Gain8	R'_2 / L_2	2,12
Gain9	Z_p	1
Gain10	$R'_2 \cdot L_m / L_2$	0,387
Gain11	$L_2 / (L_1 \cdot L_2 - L_m \cdot L_m)$	113,662
Gain12	Z_p	1
J_1	$1 / J_{1p} \cdot s$	1/0,01·s
M_H	M_H	24,739

Перехідні характеристики вихідних координат (кутова швидкість, момент, струм статора) двофазної моделі асинхронного двигуна при активному номінальному навантаженні показані на рисунку 3.

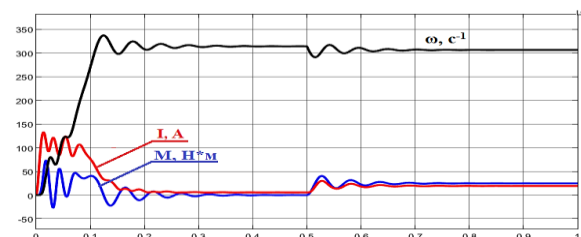


Рис. 3. Графіки перехідних процесів кутової швидкості, струму та крутного моменту двофазної моделі двигуна при активному навантаженні

Результати аналізу графіків перехідних процесів струму статора, моменту та кутової швидкості наведені у таблиці 2.

Таблиця 2
Результати моделювання

Параметр	Величина
Час пуску	$t_n=0,35$ с
Кутова швидкість холостого ходу	$\omega_{уст} = \omega_0 = 314,1$ с ⁻¹
Струм холостого ходу у встановленому режимі роботи	$I_{xx} = \frac{I_{амп}}{\sqrt{2}} = 3,853$ А
Момент навантаження	$M_d = M_H = 24,83$ Н·м
Встановлена кутова швидкість	$\omega_{вст.} = \omega_H = 306,2$ с ⁻¹
Струм статичного навантаження складає	$I_c = \frac{I_{амп}}{\sqrt{2}} = 13,514$ А

Розрахунок параметрів скалярної системи керування

Так як об'єктом, для якого пропонується система частотного регулювання є рециркуляційний насос, функціональна схема електроприводу повинна реалізовувати регулювання за трьома параметрами: натиском, швидкістю та струмом, тобто для повної відповідності заданим вимогам система має бути триконтурною. У даному випадку, функціональна система скалярного керування рециркуляційним насосом буде мати вигляд як на рисунку 4.

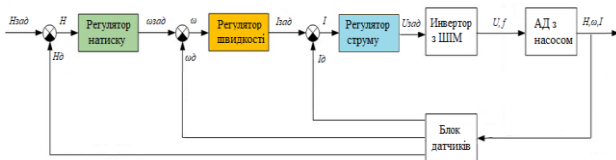


Рис. 4. Структурна схема трьохконтурної скалярної системи керування електроприводу рециркуляційним насосом

Розрахунок необхідних для моделювання параметрів

Передатна функція перетворювача напруги (4)

$$W_{пн}(p) = \frac{k_{пн}}{T_{пн} \cdot p + 1} \quad (4)$$

де $k_{пн}$ – коефіцієнт пропорційності перетворювача напруги; $T_{пн}$ – постійна часу перетворювача напруги.

Коефіцієнт пропорційності перетворювача напруги (5)

$$k_{пн}(p) = \frac{U_{амп}}{U_{зад}} = \frac{310,169}{10} = 31,027. \quad (5)$$

де $U_{зад}$ – максимальна задана напруга, В.
Стала часу перетворювача напруги (6)

$$T_{пн} = \tau = 0,005 \text{ с.} \quad (6)$$

де τ – найменша компенсована стала часу, с.

Передатна функція з підстановкою параметрів (7)

$$W_{пн}(p) = \frac{k_{пн}}{T_{пн} \cdot p + 1} = \frac{31,027}{0,005 \cdot p + 1}. \quad (7)$$

Передатна функція перетворювача частоти (8)

$$W_{пч}(p) = \frac{k_{пч}}{T_{пч} \cdot p + 1}. \quad (8)$$

де $K_{пч}$ – коефіцієнт пропорційності перетворювача частоти; $T_{пч}$ – постійна часу перетворювача частоти; коефіцієнт пропорційності перетворювача частоти

$$k_{пч}(p) = \frac{f_H}{U_{зад}} = \frac{50}{10} = 5; \text{ постійна}$$

часу перетворювача частоти $T_{пч} = \tau = 0,005$ с.

Передатна функція з підстановкою параметрів (9)

$$W_{пч}(p) = \frac{k_{пч}}{T_{пч} \cdot p + 1} = \frac{5}{0,005 \cdot p + 1}. \quad (9)$$

Коефіцієнт перетворювача лінійної частоти в кутову частоту (10)

$$k_{пчк} = 2 \cdot \pi = 2 \cdot 3,1428 = 6,2856 \text{ с}^{-1}. \quad (10)$$

На основі розрахованих параметрів перетворювачів був отриманий відповідний блок (рисунк 5).

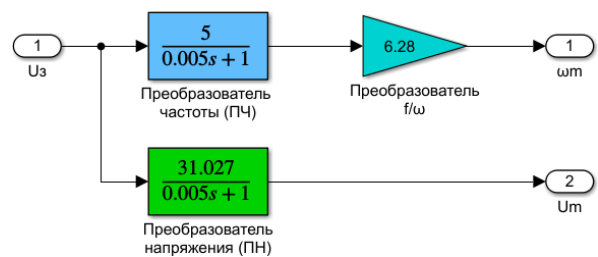


Рис. 5. Схема імітаційної моделі підсистеми «Перетворювач напруги і частоти»

Передатна функція ПІ-регулятора струму (11)

$$W_{pc}(p) = K_{pc} \cdot \frac{R_1 \cdot (T_1 p + 1)}{2 \cdot \tau \cdot K_{пч} \cdot K_{дс} \cdot p}. \quad (11)$$

де T_1 – стала часу статора, с; $K_{дс}$ – коефіцієнт передачі датчика струму.

Стала часу статора (12)

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1} = \frac{0,178}{0,667} = 0,27 \text{ с.} \quad (12)$$

Коефіцієнт передачі датчика струму (13)

$$K_{дс} = \frac{U_1}{2 \cdot I_{фн}} = \frac{10}{2 \cdot 14,799} = 0,338 \text{ с.} \quad (13)$$

Передатна функція ПІ-регулятора струму з підстановкою параметрів (14)

$$W_{рс}(p) = K_{рс} \cdot \frac{R_1 \cdot (T_1 p + 1)}{2 \cdot \tau \cdot K_{пч} \cdot K_{дс} \cdot p} = \frac{39,486}{p} + 10,656. \quad (14)$$

На основі розрахунку параметрів ПІ-регулятора струму було отримано відповідний блок (рисунок 6).

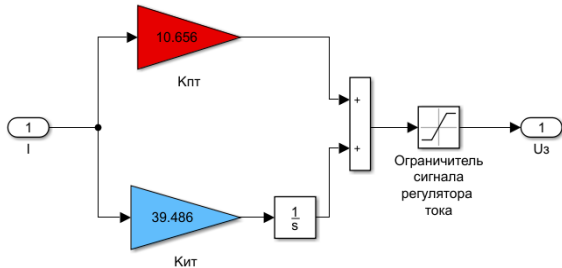


Рис. 6. Схема імітаційної моделі підсистеми «ПІ-регулятор струму»

Передатна функція ПІД-регулятора швидкості (15)

$$W_{рш}(p) = K_{рш} \cdot \frac{(\tau \cdot p + 1) \cdot (T_e p + 1)}{4 \cdot \tau \cdot p}. \quad (15)$$

де $K_{рш}$ – коефіцієнт передачі регулятора швидкості; T_e – електромагнітна постійна часу двигуна, с.

Електромагнітна постійна часу електродвигуна (16)

$$T_e = \frac{1}{\omega_0 \cdot s_k} = \frac{1}{314,159 \cdot 0,3087} = 0,0103 \text{ с.} \quad (16)$$

Коефіцієнт передачі регулятора швидкості (17)

$$K_{рш} = \frac{J_p}{\tau \cdot K_{пч} \cdot K_{дш} \cdot \beta \cdot K_p}. \quad (17)$$

де β – коефіцієнт жорсткості механічної характеристики; $K_{дш}$ – коефіцієнт передачі датчика швидкості.

Жорсткість механічної характеристики (18)

$$\beta = \frac{2 \cdot M_k}{\omega_0 \cdot S_k} = \frac{2 \cdot 69,269}{314,159 \cdot 0,3087} = 1,429. \quad (18)$$

Значення коефіцієнта передачі регулятора швидкості при підстановці значень у вираз (17) має вид (19)

$$K_{рш} = \frac{0,01}{0,005 \cdot 1,429 \cdot 5 \cdot 0,032 \cdot 6,2856} = 1,392. \quad (19)$$

Коефіцієнт передачі датчика швидкості (20)

$$K_{дш} = \frac{U_d}{\omega_0} = \frac{10}{314,159} = 0,032. \quad (20)$$

Вираз передатної функції ПІД-регулятора швидкості при підстановці значень у (15) має вигляд (21)

$$W_{рш}(p) = 0,035 \cdot p + \frac{70}{p} + 1,05. \quad (21)$$

На основі розрахованих параметрів ПІД-регулятора струму було отримано відповідний блок імітаційної моделі (рисунок 7).

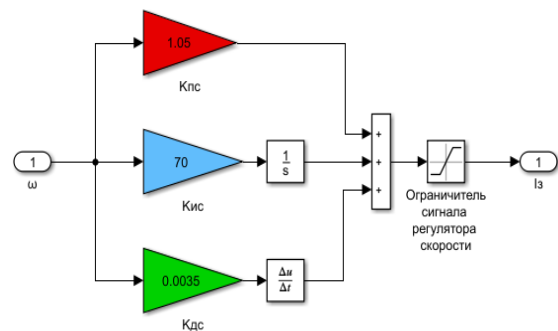


Рис. 7. Схема імітаційної моделі підсистеми «ПІД-регулятор швидкості»

Передатна функції ПІ-регулятора натиску (22)

$$W_{рн}(p) = K_{рн} + \frac{1}{T_{рн} \cdot p} = 10 + \frac{1}{8 \cdot 0,005 \cdot p} = \frac{25}{p} + 10. \quad (22)$$

де $K_{рн}$ – коефіцієнт передачі регулятора натиску; $T_{рн}$ – постійна часу регулятора натиску, с.

Коефіцієнт передачі датчика натиску (23)

$$k_{дн} = \frac{U_d}{H} = \frac{10}{30} = 0,3 \text{ с.} \quad (23)$$

де H – значення натиску, м.

На основі розрахованих параметрів ПІ-регулятора натиску було отримано відповідний блок імітаційної моделі (рисунок 8).

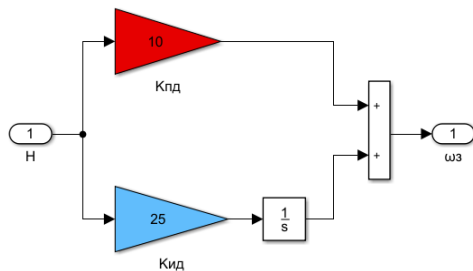


Рис. 8. Схема імітаційної моделі підсистеми «ПІ-регулятор натиску»

Для отримання значень продуктивності та натиску необхідно скласти відповідний для даної задачі блок перетворення, який на основі відомих математичних рівнянь буде розраховувати відповідне значення продуктивності і натиску.

Величина натиску, що створюється насосом описується виразом, що виражає залежність натиску H від об'єму подачі Q [9,10] (24)

$$H = \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 - C \cdot Q^2. \quad (24)$$

де C – конструктивний коефіцієнт насоса, приймається $C=1$.

Магістраль, на яку працює насос, описується, як залежність між об'ємом подачі при роботі насоса Q і тиску H , який є необхідним для оптимальної роботи системи теплопостачання (25)

$$H = \frac{Q^2}{R}. \quad (25)$$

де R – коефіцієнт, що відображає зміну опору мережі.

Для реалізації моделі магістралі, виконано перетворення характеристики магістралі таким чином, щоб вихідним параметром була величина об'єму зворотного потоку теплоносія (26)

$$Q = \sqrt{H \cdot R}. \quad (26)$$

З використанням виразів (24) та (25) було побудовано модель блоку обчислення значень продуктивності та натиску (рисунок 9).

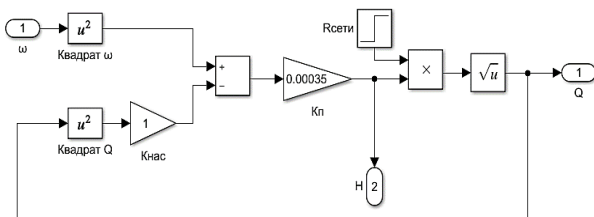


Рис. 9. Схема імітаційної моделі підсистеми «Блок обчислення продуктивності та натиску»

Значення коефіцієнту $R=4$ еквівалентно роботі системи в номінальному, найбільш оптимальному режимі, у якому значення натиску досягає максимуму. При мінімальній продуктивності значення R близько до нуля, але таке не допустиме при роботі системи опалення.

Також, датчики натиску, швидкості та струму для зручності зведені в окрему підсистему «Блок датчиків» (рисунок 10)

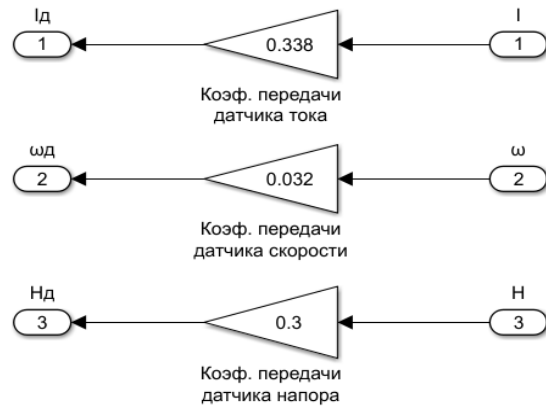


Рис. 10. Схема імітаційної моделі підсистеми «Блок датчиків»

У якості навантаження двофазної схеми асинхронного двигуна було прийнято блок підсистеми «Вентиляторне навантаження», який зображено на рисунку 11.

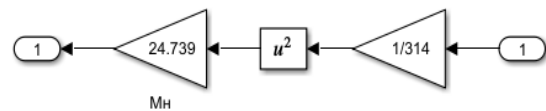


Рис. 11. Схема імітаційної моделі підсистеми «Вентиляторне навантаження»

На рисунку 12 представлені відповідні розрахунки параметрів блоків скалярної системи частотного керування у програмному середовищі Mathcad.

Расчет параметров скалярной системы управления.

Коеф. жесткости механической характеристики: $\beta = 2 \cdot \text{Me} = 2 \cdot 69.269 = 1.429 \left(\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}^{-1}} \right)$ Напор: $H = 30 \text{ (м)}$
 Максимальное напряжение задания: $\omega_0 \cdot \text{Se} = 314.159 \cdot 0.3087 = 0.0103 \text{ (с)}$ Напряжение датчиков: $U_{\text{д}} = 10 \text{ (В)}$
 Мин. некомпенсируемая постоянная времени: $\tau = 0.005 \text{ (с)}$ Пост. времени преобразования напряжения: $T_{\text{ин}} = \tau = 0.005 \text{ (с)}$
 Коеф. передачи преобразователя напряжения: $K_{\text{ин}} = \frac{U_{\text{зад}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{310.269}{310.269} = 31.027$ Пост. времени частотного преобразования: $T_{\text{ин}} = \tau = 0.005 \text{ (с)}$
 Коеф. передачи частотного преобразователя: $K_{\text{оч}} = \frac{\omega_n}{U_{\text{зад}}} = \frac{50}{10} = 5.0$ Пост. времени частотного преобразования: $T_{\text{оч}} = \tau = 0.005 \text{ (с)}$
 Коеф. преобразования линейной частоты в угловую: $K_p = 2 \cdot \pi = 6.283$
 Электромеханическая постоянная времени двигателя: $T_d = \frac{1}{\omega_0 \cdot \text{Se}} = \frac{1}{314.159 \cdot 0.3087} = 0.0103 \text{ (с)}$ Постоянная времени статора: $T_1 = \frac{L_1}{R_1} = \frac{0.178}{0.667} = 0.27 \text{ (с)}$

Передаточная функция ПИД-регулятора тока.

Коеффициент передачи датчика тока: $K_{\text{дт}} = \frac{U_{\text{д}}}{I_{\text{ном}}} = \frac{10}{24.739} = 0.338$
 $W_{\text{дт}}(p) = \frac{(T_1 \cdot p + 1) \cdot R_1}{2 \cdot \tau \cdot K_{\text{дт}} \cdot K_{\text{дт}} \cdot p} = \frac{59.2 \cdot (0.18 \cdot p + 0.667)}{4 \cdot 0.005 \cdot 0.338 \cdot p} = \frac{39.4864}{p} + 10.656$

Передаточная функция ПИД-регулятора скорости.

Коеффициент передачи датчика скорости: $K_{\text{дс}} = \frac{U_{\text{д}}}{\omega_n} = \frac{10}{314.159} = 0.032$
 Коеффициент передачи регулятора скорости: $K_{\text{рс}} = \tau \cdot (\beta \cdot K_{\text{дт}} \cdot K_{\text{дс}} \cdot K_p = 1.392$
 $W_{\text{рс}}(p) = \frac{K_{\text{рс}} \cdot (\tau \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1)}{4 \cdot \tau \cdot p} = \frac{50.0 \cdot (0.007 \cdot p + 1.4) \cdot (0.01 \cdot p + 1.0)}{p} \text{ simplify } \rightarrow 0.0035 \cdot p + \frac{70.0}{p} + 1.05$

Передаточная функция ПИД-регулятора напора.

Коеффициент передачи датчика напора: $K_{\text{дн}} = \frac{U_{\text{д}}}{H} = \frac{10}{30} = 0.33$
 Коеффициент передачи регулятора напора: $K_{\text{рн}} = 10$ Пост. времени регулятора напора: $T_{\text{рн}} = 8\tau = 0.04 \text{ (с)}$
 $W_{\text{рн}}(p) = K_{\text{рн}} + \frac{1}{T_{\text{рн}} \cdot p} = \frac{25.0}{p} + 10.0$

Рис. 12. Розрахунки параметрів скалярної системи частотного керування у програмному середовищі Mathcad

Після складання блоків системи керування, було отримано наступну схему моделі частотно-регульованої трьохконтурної скалярної системи керування (рисунок 13).

Результати моделювання наведені у вигляді графіків перехідних характеристик на рисунку 14.

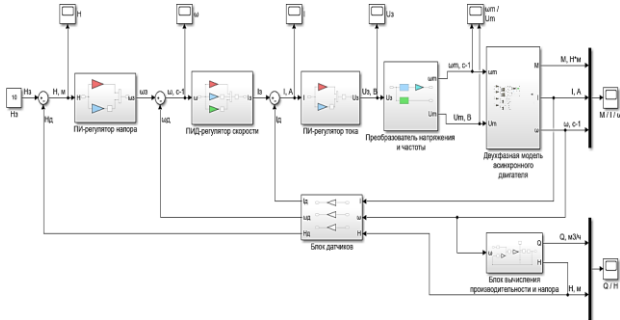


Рис.13. Схема моделі частотно-регульованої триконтурної скалярної системи керування

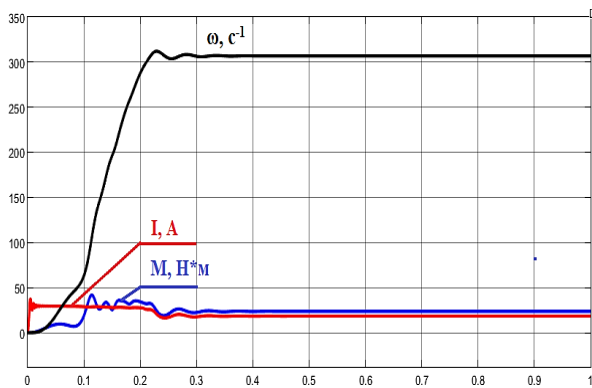


Рис. 14. Перехідні характеристики електроприводу зі скалярною системою керування

Результати аналізу графіків перехідних процесів струму, моменту та швидкості наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Аналіз графіків перехідних характеристик

Параметр	Величина
Час пуску	$t_{п}=0,3$ с
Встановлена кутова швидкість	$\omega_{уст} = \omega_0 = 306,6$ с ⁻¹
Момент навантаження	$M_{Д} = M_{Н} = 23,59$ Н·м
Струм статичного навантаження складає	$I_c = \frac{I_{амп}}{\sqrt{2}} = 12,991$ А

Було отримано також перехідні характеристики натиску та продуктивності (рисунок 15). Q, м³/ч.

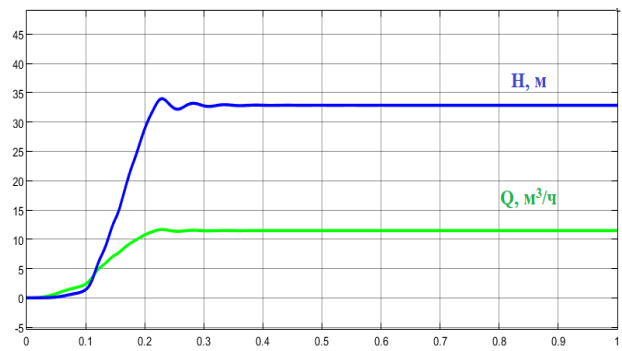


Рис. 15. Перехідні характеристики натиску та продуктивності

Як можна побачити з графіків (рисунок 15), перехідні характеристики мають задовільні показники якості і відповідають заданим вимогам.

Робота системи електроприводу у випадку різкого збільшення опору магістралі теплоносія може бути досліджено шляхом зміни параметру $R_{мережі}$ у підсистемі «Блок обчислення продуктивності та натиску» (рисунок 16).

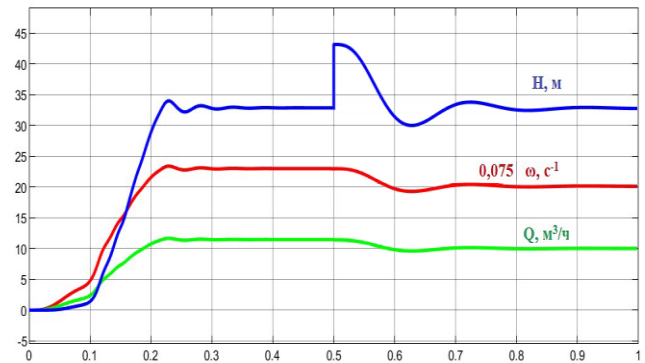


Рис. 16. Перехідні характеристики натиску, кутової швидкості та продуктивності у режимі роботи магістралі теплоносія з підвищеним опором

Як видно з графіків на рисунку 16, при зменшенні об'єму використання теплоносія відбуваються наступні процеси: під час збільшення подачі, величина тиску різко змінюється (так як насос працює на тій же самій частоті обертання), для підтримання тиску система зменшує частоту обертання насосу і, відповідно, його продуктивність, що призводить до відновлення рівня тиску у магістралі.

Загалом, отримані результати моделювання як механічної частини електроприводу, так і еквівалентного імітаційного блоку натиску та продуктивності свідчать про коректне функціонування розрахованої системи скалярного керування.

Висновки

У результаті виконаної роботи була розроблена та промодельована імітаційна математична

модель частотно-регульованого електроприводу рециркуляційного насосу з триконтурною скалярною системою керування.

Структурна модель була отримана на основі функціональної схеми частотного регулювання асинхронного двигуна з регуляторами натиску, швидкості і струму.

Отримані в результаті моделювання динамічні характеристики двигуна та перехідні характеристики натиску та продуктивності як у випадку номінального, так і у випадку підвищеного опору магістралі відповідають заявленим вимогам. Миттєве збільшення опору в трубопроводі система керування компенсує відповідним пропорційним зменшенням продуктивності, а значення натиску при цьому залишається практично незмінним, що обумовлюється ПІ-регулятором зовнішнього контуру і свідчить про коректність розробленої системи скалярного керування.

Список використаної літератури

1. Усольцев А. А. Векторное управление асинхронными двигателями [Текст] / А. А. Усольцев, Учебное пособие по дисциплинам электромеханического цикла Санкт-Петербург 2002, с. 55.

2. Мальцева О. П. Системы управления асинхронных частотно-регулируемых электроприводов: учебное пособие [Текст] / О. П. Мальцева, Л. С. Удут, Н. В. Кояин; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 476 с.

3. Мусиенко Ю. Н. Разработка и исследование двухфазной динамической модели асинхронного электропривода [Текст] / Ю. Н. Мусиенко, В. О. Квашнин; Вісник кафедри «Електротехніка» за підсумками наукової діяльності студентів – Донецьк, ДонНТУ, 2008, с.97–99.

4. Колб Ант. А. Теорія електроприводу [Текст] / Ант. А. Колб, А.А. Колб / Навчальний посібник – Д., Національний гірничий університет, 2006. – 511 с.

5.Квашнин В. О. Разработка динамической модели асинхронного двигателя [Текст] / В. О. Квашнин // Вісник Східноукраїнського Національного університету. Науковий журнал. – Луганськ : – 2006. – Вип. 1(95). – С. 87–91.

6. Семенов А. С. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя в пакете программ Matlab [Текст] / А. С. Семенов // Вестник северо-восточного федерального университета им. М. К. Амосова Якутск: 2014, № 1, с. 51–59.

7. Квашнин В. О. Моделирование асинхронных электродвигателей с использованием пакета

программ DELPHI [Текст] / В. О. Квашнин, А. М. Наливайко // Наукове видання. Одеський національний політехнічний університет, ОНПУ-2006. – Вип. 66. – С. 219–220.

8. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс; СПб.-Питер, 2008. – 288 с.: ил.

9. Гинзбург Я. Н. Внедрение автоматизированных систем регулируемого электропривода в насосные установки [Текст] Гинзбург Я. Н., Лезнов Б. С., Чебанов В. Б.; Автоматизация и управление системами водоснабжения и водоотведения: Тр. ВНИИ ВОДГЕО. – Москва, 1986 – 361 с.

10. Квашнин В. О. Розробка математичної моделі скалярної системи керування електроприводом дуттєвого вентилятора з ШІМ модуляцією [Текст] Квашнин В. О., Бабаш А. В., Деркаченко Б. Л.; Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод : матеріали ІV Всеукраїнської науково-технічної конференції / За заг. ред. О. Ф. Тарасова. – Краматорськ : ДД-МА, 2020, с. 132–135.

References

1. Usoltchev, A. A. (2002) Induction motors' vector control ["Vektornoe upravlenie asinhronnyimi dvigatelyami"] / Uchebnoe posobie po distsiplinam elektromehaničeskogo tsikla, Sankt-Peterburg. – pp. 55. (in Russian)

2. Maltseva, O. P. (2011) Control systems for asynchronous variable frequency drives ["Sistemy upravleniya asinhronnyh chastotno-reguliruemyh elektroprivodov"] / Uchebnoe posobie. Tomskij politekhnicheskij universitet. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2011. – pp. 476. (in Russian)

3. Musienko, YU. N., Kvashnin, V. O. (2008) Development and research of a two-phase dynamic model of an asynchronous electrical drive ["Razrabotka i issledovanie dvuhfaznoj dinamicheskoy modeli asinhronnogo elektroprivoda"] / Visnik kafedri «Elektrotehnika» za pidsumkami naukovoi diyal'nosti studentiv – Donec'k, DonNTU, 2008, pp. 97–99. (in Russian)

4. Kolb, Ant. A., Kolb, A. A. (2006) Electrical drive theory ["Teoriya elektroprivodu"] / Navchal'nij posibnik – D., Nacional'nij girnichij universitet. – pp. 511. (in Russian)

5. Kvashnin, V. O. (2006) Development of a dynamic model of the induction motor ["Razrabotka dinamicheskoy modeli asinhronnogo dvigatelya"] /

Visnik Shidnoukrainskogo Nacionalnogo Universitetu: Naukoviy Jurnal, Lugansk, Ukraine, Vipusk No.1(95), pp. 87–91. (In Russian)

6. Semenov, A. S. (2014) Simulation Modes of Operation of the Induction Motor by using Matlab software [“Modelirovanie rejimov raboti asinhronnogo dvigatelya v pakete programm Matlab”] / Vestnik SeveroVostochnogo Federalnogo Universiteta im. M.K. Ammosova, No. 1(Vol. 11), pp. 51–59 (In Russian).

7. Kvashnin, V. O., Nalivayko, A. M. (2006) Modeling of Induction Motors using a Software Package DELPHI [“Modelirovanie asinhronnih elektrodvigateley s ispolzovaniem paketa programm DELPHI”] / Naukove Vidannya. Odeskiy Nacionalniy Politehnicniy Universitet, ONPU-2006, Vipusk No. 66, pp. 219–220 (In Russian)

8. Chernih, I. V. (2008) Modeling of Electrical Devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink [“Modelirovanie elektrotehnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystems i Simulink”] / Moscow,

Russian Federation, DMK Press; SPb.-Piter, Russian Federation, 288 p. (In Russian)

9. Ginzburg, YA. N., Leznov, B. S., Chebanov, V. B. (1986) Implementation of automated variable electric drive systems in pumping units [“Vnedrenie avtomatiziro-vannyh sistem reguliruemogo elektroprivoda v nasosnye ustanovki”] / Avtomatizaciya i upravlenie sistemami vodosnabzheniya i vodootvedeniya: Tr. VNII VODGEO. – Moskva, – pp. 361. (In Russian)

10. Kvashnin, V. O., Babash, A. V., Derkachenko, B. L. (2020) Blower fans' electrical drive with a PWM modulation scalar control system mathematical model development [“Rozrobka matematichnoi modeli skalyarnoï sistemi keruvannya elektropri-vodom duttevogo ventilyatora z SHIM modulyacieyu”] / Suchasni informacijni tekhnologii, zasobi avtomatizacii ta elektroprivod : materiali IV Vseukraïns'koï naukovo-tekhnicnoi konferencii / Za zag. red. O. F. Tarasova. – Kramators'k : DDMA, 2020, pp. 132–135. (In Russian)

RECIRCULATION PUMP SCALAR CONTROL SYSTEM ELECTRICAL DRIVE MODEL'S DEVELOPMENT AND RESEARCH

V. O. Kvashnin, A. V. Babash, V. V. Kvashnin
Donbass State Engineering Academy

Abstract. *On the basis of the analysis of the used models of the electric motor at synthesis of the asynchronous electric drive with frequency control mathematical and simulation models are received. The structural scheme of the three-circuit scalar control system of the electric drive of the recirculation pump in the form of the simulation model for which the parameters of the scalar control system were calculated is offered and realized. The calculation of parameters and coefficients of the mathematical model of the solar control system of the electric drive is given. The calculations of the pressure of the recirculation pump are presented. The scheme of the simulation model of the subsystem of the unit for calculating the performance and pressure of the recirculation pump is given. Calculations and simulation model of PI current regulator are presented. Calculations and simulation model of PID-speed controller subsystem are given. Calculations and simulation model of PI-pressure regulator subsystem are presented. Calculations of scalar control system parameters in the form of MathCad scripts are presented. On the received model processes of work of the electric drive of the pump in normal and emergency operating modes were considered. Calculations and simulation model of voltage and frequency converter subsystem are given. Calculations of parameters and coefficients of the scalar control system are given. The simulation model of the sensor unit subsystem is given. The calculations of the frequency converter and the voltage converter are given. The transfer functions of the voltage and frequency converter of the scalar control system of the asynchronous electric drive of the recirculation pump are presented. The simulation model of the fan load subsystem of the scalar control system of the boiler's recirculation pump is presented. The table presents an analysis of the transient characteristics of a two-phase mathematical model of an induction motor. The analysis of transient characteristics of the scalar control system of the recirculation pump is presented.*

Keywords: *simulation model, system of equations, block diagram, scalar control system, transient characteristics, productivity, pressure, recirculation pump.*

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО НАСОСА СО СКАЛЯРНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

В. О. Квашнин, А. В. Бабаш, В. В. Квашнин

Донбасская государственная машиностроительная академия

Аннотация. На основании анализа использованных моделей электродвигателя при синтезе асинхронного электропривода с частотным управлением получены математическая и имитационная модели. Предложена и реализована структурная схема трехконтурной скалярной системы управления электроприводом рециркуляционного насоса в виде имитационной модели, для которой были рассчитаны параметры скалярной системы управления. На полученной модели были рассмотрены процессы работы электропривода насоса в штатном и аварийном режимах работы.

Ключевые слова: имитационная модель, система уравнений, скалярная система управления, переходные характеристики, производительность, напор, рециркуляционный насос.

Отримано 14.04.2021



Квашнін Валерій Олегович, Донбаська державна машинобудівна академія, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електромеханічні системи автоматизації», вул. Шкадинова, 76, Краматорськ, Україна, E-mail: v.kvashnin@ukr.net, тел. (0626) 41-68-93, +38 (050) 989-77-01

Valeriy Kvashnin, Donbass State Engineering Academy, Candidate of Technical Sciences, Docent, Lecturer, Department of Electromechanical systems of automation and electric drive, Shkadinova st., 76, Kramatorsk, Ukraine, E-mail: v.kvashnin@ukr.net, тел. (0626) 41-68-93, +38 (050) 989-77-01

ORCID ID: 0000-0001-8171-9794



Бабаш Андрій Владиславович, Донбаська державна машинобудівна академія, асистент кафедр «Комп'ютерні інформаційні технології», «Електромеханічні системи автоматизації», вул. Шкадинова, 76, Краматорськ, Україна, E-mail: babashandrey@gmail.com, тел. (0626) 41-68-93, +38 (095) 538-04-17

Babash Andrey, Donbass State Engineering Academy, assistant Department of Computer Informational Technologies, Shkadinova st., 76, Kramatorsk, Ukraine, E-mail: babashandrey@gmail.com, тел. (0626) 41-68-93, +38 (095) 538-04-17

ORCID ID: 0000-0002-7883-1459



Квашнін Владислав Валерійович, Донбаська державна машинобудівна академія, аспірант кафедри «Автоматизація виробничих процесів», вул. Шкадинова, 76, Краматорськ, Україна, E-mail: kvashnin.vladyslav@gmail.com, тел. (0626) 41-68-93, 0666843123

Kvashnin Vladislav, Donbass State Engineering Academy, post graduate student Department of Automation Industrial Processes, Shkadinova st., 76, Kramatorsk, Ukraine, E-mail: kvashnin.vladyslav@gmail.com, тел. (0626) 41-68-93, 0666843123

ORCID ID: 0000-0002-1730-1403