

ВЕРИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПІДПОРЯДКОВАНОЇ СТРУКТУРИ

Островецький М.Я., д.т.н., проф., Бурик М.П. к.т.н., ст. викладач

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Каленчук Я.О., студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Вступ. Сучасний технологічний рівень дозволяє застосувати електропривод змінного струму замість приводу постійного струму, тому що асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором (АД) є більш надійним та дешевим електродвигуном у порівнянні з двигуном постійного струму з незалежним збудженням (ДПС) [1].

Але робочі характеристики двигунів [2] показують, що ДПС корисніше використовувати за АД під час тривалої роботи на низьких швидкостях та для широкого діапазону швидкостей при постійній потужності. Експлуатаційні якості систем підпорядкованого регулювання (СПР) привели до широкого застосування в електроприводах як змінного так і постійного струму. С. Кесслер сформулював основні положення побудови швидкодіючих електромеханічних систем.

Недоліком СПР є менша швидкодія, що пов'язана з послідовним впливом на систему через внутрішні контури, а не відразу на вхідну ланку об'єкта керування [3].

Переваги СПР полягають у можливості реалізації високих динамічних характеристик приводів, у зручній реалізації обмеження регулюючих координат, у простому налагодженні та експлуатації, а також в широкій уніфікації схем та конструкцій елементів [4].

Мета роботи. Дослідження автоматизованого електроприводу постійного струму з підпорядкованим регулюванням, проведення порівняння перехідних процесів електромеханічних координат та параметрів замкнутої системи за допомогою застосування програмного продукту Matlab (Simulink) з експериментальними даними.

Результати досліджень. Верифікація алгоритмів керування СПР вимагає експериментального тестування, тому що автоматична система керування має особливості, що не враховуються при математичному моделюванні, але впливають на якість керування [5-8].

Тому була розроблена експериментальна установка по дослідженню системи з підпорядкованим регулюванням координат електропривода постійного струму на базі серійного тиристорного перетворювача БТУ 3601 та електричної машини постійного струму типу ПН 68.

Загальна функціональна схема експериментальної установки представлена на рис. 1. До її складу входять:

- тиристорний перетворювач типу БТУ 3601 40 А/380 В (UZ) [6];

- електрична машина постійного струму М1, параметри яких наведені в табл. 1;

Таблиця 1 – Паспортні дані електричної машини постійного струму типу ПН-68 (ГОСТ 183-41)

	Умовні позначення	Значення
Потужність	$P_H, кВт$	4,6
Напруга живлення	$U_H, В$	230
Номінальна швидкість ДПС	$n_H, об / хв$	1450
Струм якоря ДПС	$I_H, А$	20

- датчик кутової швидкості BR (ЭТ 7);
- пульт керування;
- джерела живлення обмоток збудження ОЗМ ДПС.
- навантажувальна машина М2 (АД), параметри яких наведені у табл. 2.

АД живиться від перетворювача частоти;

Таблиця 2 – Паспортні дані АД типу АИР112М4У2 (ГОСТ 183-74)

	Умовні позначення	Значення
Номінальна потужність	$P_H, кВт$	5.5
Номінальна напруга живлення	$U_H, В$	380
Номінальна швидкість ДПС	$n_H, об / хв$	1430
Номінальний струм	$I_H, А$	11.4
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	$\eta, \%$	84
Коефіцієнт потужності	$\cos(\varphi)$	0.87

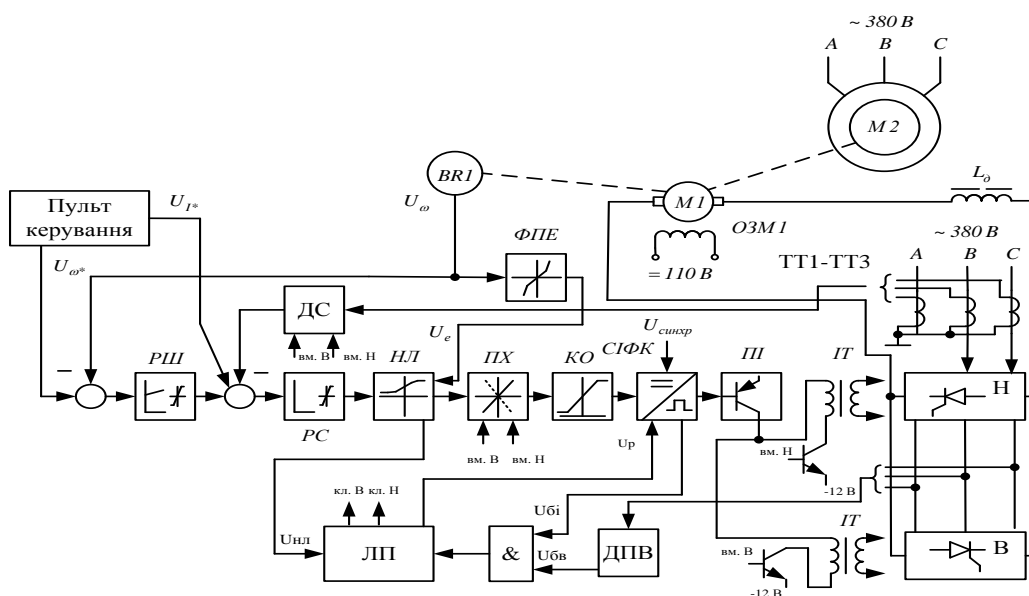
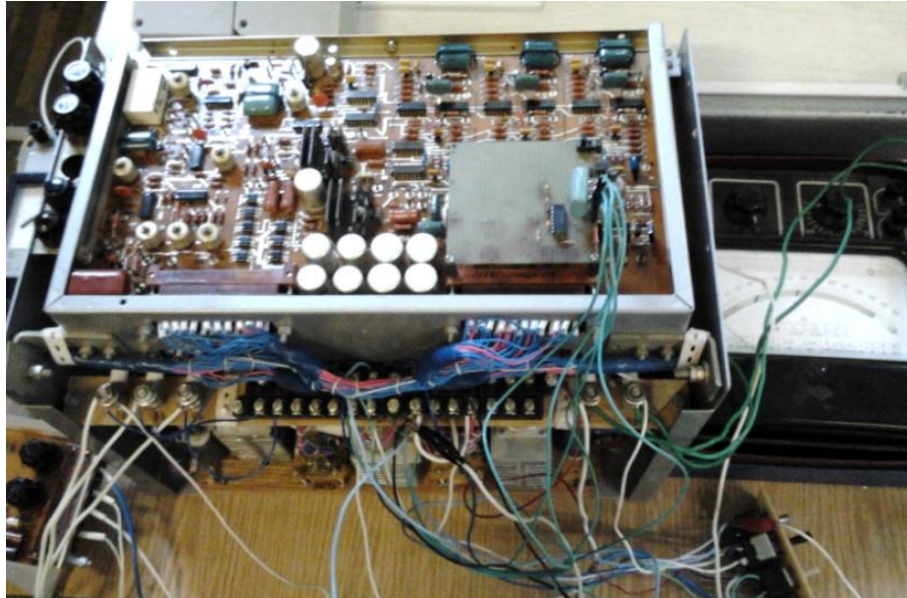
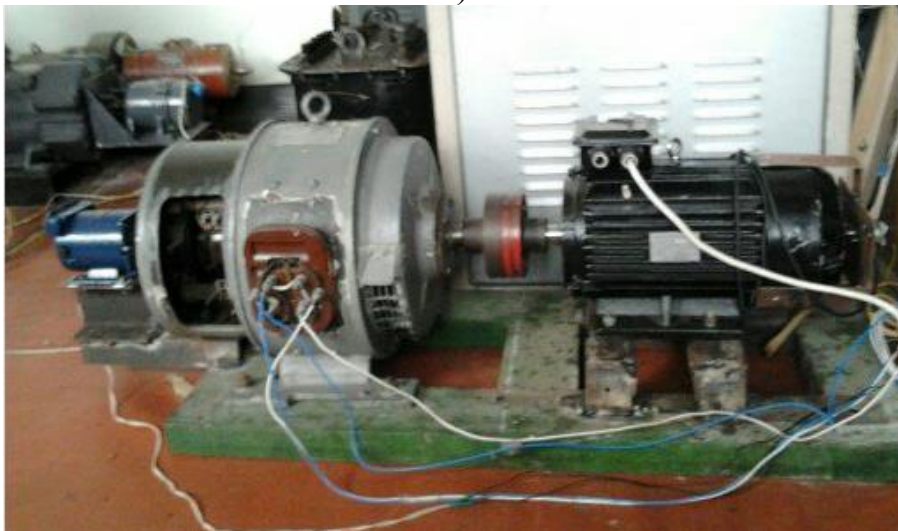


Рисунок 1 – Функціональна схема експериментальної установки

Зовнішній вигляд реалізованої експериментальної установки по дослідженню систем з підпорядкованим регулюванням координат електропривода постійного струму на базі серійного тиристорного перетворювача представлено на рис. 2, де: а) серійний перетворювач БТУ 3601 та пульт керування; б) електромеханічна пара експериментальної установки.



а)



б)

Рисунок 2 – Експериментальна установка по дослідженню СПР координат електропривода постійного струму

Теоретичний розрахунок параметрів електричної машини типу ПН-68 виконано за паспортними даними, що наведені у табл. 1. Активний опір якірного кола R_{β} визначено за наступною формулою

$$R_{\beta} = 0.5 \cdot \frac{U_H}{I_H} (1 - \eta) = 0.5 \cdot \frac{230}{20} (1 - 0,85) = 0.86, \text{ Ом.} \quad (1)$$

Номінальна кутова швидкість обертання ротору М1 ω_f дорівнює

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{\pi \cdot 1450}{30} = 151.84, \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2)$$

Добуток конструктивної сталої машини на номінальний потік збудження

$$c\Phi_H = \frac{U_H + I_H R_{я}}{\omega_H} = \frac{230 + 20 \cdot 0.86}{151.84} = 1.63, \text{ Вс}. \quad (3)$$

Індуктивність якiрного кола розраховано за формулою

$$L_{я} = \frac{\gamma \cdot U_H}{p \cdot \omega_H \cdot I_H} = \frac{0.6 \cdot 230}{2 \cdot 151.84 \cdot 20} = 0.0227, \text{ Гн}, \quad (4)$$

де $\gamma = 0.6$ – під час відсутності компенсаційної обмотки.

Розраховано сталу часу якiрного кола за виразом

$$T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}} = \frac{0.0227}{0.86} = 0.0264, \text{ с}. \quad (5)$$

Проведено уточнення параметрів М1 експериментальним шляхом, тому що на показники якості керування електромеханічними координатами автоматичної системи впливають точні значення параметрів об'єкта.

Визначено активний опір обмотки якора за допомогою вимірювання постійного струму якора для декількох кутових положень валу, з метою зменшення впливу щiтково-колекторного вузла на точність вимірювань. Результати вимірювання представлено у табл. 3, де $\Delta U_{щ} = 3.2$ напруга на щiтково-колекторному вузлі В.

Таблиця 3 – Результати вимірювань активного опору якора М1

$U_{я}, \text{В}$	$I_{я}, \text{А}$	$R_{я} = \frac{U_{я} - \Delta U_{щ}}{I_{я}}, \text{Ом}$
10.6	10	0.74
10.7	10	0.75
10.9	10	0.77
$R_{я\text{CP}} = \frac{\sum_i R_{яi}}{3} = \frac{0.74 + 0.75 + 0.77}{3} = 0.75, \text{Ом}$		

Отриманий у результаті вимірів опор обмотки якора приводяться до умовної робочої температури 75°C

$$R_{75^\circ\text{яCP}} = [1 + 0.004 \cdot (75^\circ - 20^\circ)] R_{я\text{CP}} = [1 + 0.004 \cdot (75^\circ - 20^\circ)] \cdot 0.75 = 0.915, \text{ Ом}. \quad (6)$$

Визначено індуктивність обмотки якора методом осцилографування струму якора нерухомої машини. Перехідний процес струму якора М1 представлено на рис. 3. Значення постійної напруги, яка подавалась на обмотку якора стрибком становить 5 В.

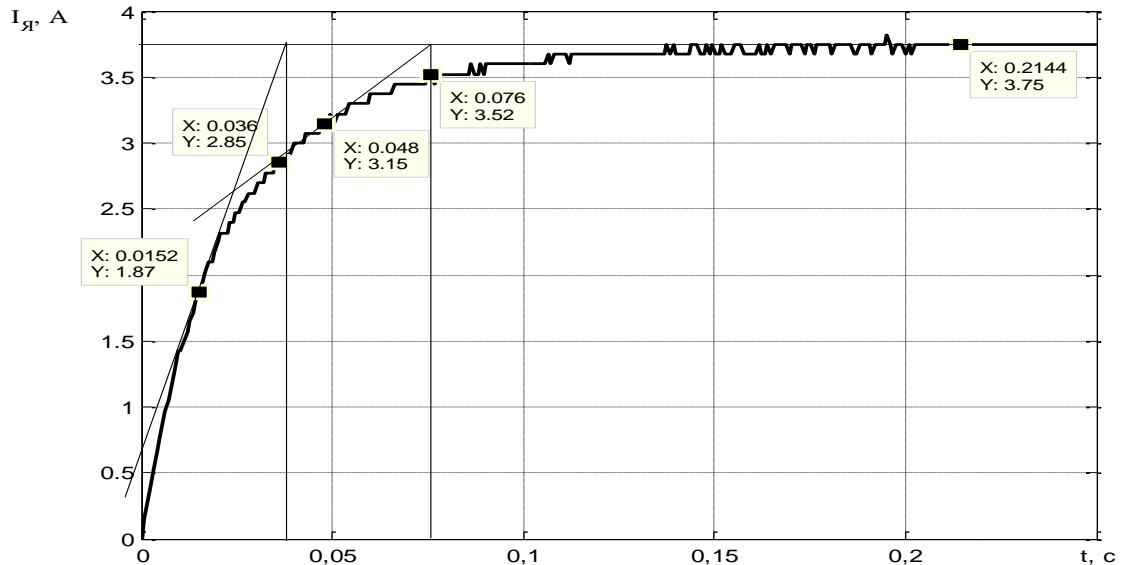


Рисунок 3 – Перехідний процес струму якоря М1 $I_{\beta} = f(t)$

Сталю часу якоря дорівнює $T_{\text{я}} = 0.076 - 0.036 = 0.04, \text{с}$. Визначаємо Індуктивність обмоток якоря за виразом $L_{\text{я}} = T_{\text{я}} \cdot R_{\text{яСР}} = 0.04 \cdot 0.75 = 0.03, \text{Гн}$. Значення сталю часу якоря при температурі обмотки якоря 75°С дорівнює

$$T_{75^{\circ}\text{я}} = \frac{L_{75^{\circ}\text{я}}}{R_{75^{\circ}\text{яСР}}} = \frac{0.03}{0.915} = 0.0328, \text{с}. \quad (7)$$

Визначено коефіцієнт кола збудження М1 під час обертання вала ротора з кутовою швидкістю ω за рахунок обертання вала АД. Вольтметр U_v , що підключений до обмотки якоря, вимірює значення електрорушійної сили (ЕРС).

Отже, коефіцієнт проти ЕРС $\hat{n}\hat{\phi}$ визначено згідно з формулою

$$c\Phi = \frac{U_v}{\omega} = \frac{269}{157.3} = 1.71, \text{Вс}. \quad (8)$$

За методом вільного вибігу визначено момент інерції експериментальної установки. Під час відключення обмоток якоря та збудження електричної машини М1 його ротор та сполучений з ним механізм за рахунок накопиченої кінетичної енергії продовжують обертатися. Внаслідок втрат на тертя частота обертання ротора з часом падає рис. 4. У розглянутих умовах потужність, що витрачається на подолання сил тертя, дорівнює зменшенню у часі кінетичної енергії електроприводу $P_0 = dA/dt = -J\omega(d\omega/dt)$.

За поданою формулою визначено значення моменту інерції

$$J = -\frac{P_0}{\omega \frac{d\omega}{dt}} = -\frac{Mc}{\frac{d\omega}{dt}} = \frac{1.674 \cdot 15.8}{156.5} = 0.169 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (9)$$

де P_0 – втрати неробочого ходу в електроприводі при відключеному від джерела живлення електродвигуна, Вт; Mc – гальмівний момент, що пов'язаний з тертям, Нм.

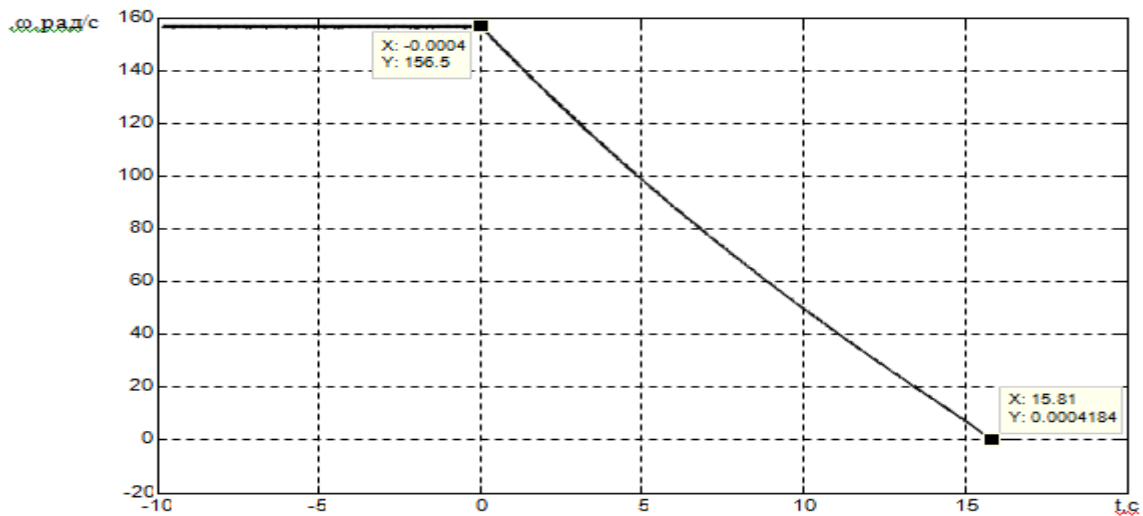


Рисунок 4 – Експериментальний графік вільного вибігу ротору М1

У тиристорному електроприводі дроселя використовують для згладжування пульсацій випрямленого струму, обмеження зони переривчастого струму та струму через вентиля під час короткого замикання [9, 10]. Тому для забезпечення нормальної роботи пульсуюча складова якірною струму двигуна не повинна перевищувати 2% від його середнього значення за рахунок застосування згладжувального дроселя, параметри якого визначалися експериментально.

Активний опір дроселя R_d визначався методом амперметра та вольтметра при підключенні дроселя до джерела постійної напруги, як середнє арифметичне значення від знайдених значень опорів R_{di} . Результати вимірювань занесені до табл. 4.

Таблиця 4 – Результати вимірювань активного опору дроселя R_{di}

$U, В$	$I, В$	$R_{di} = \frac{U}{I}, \hat{I} \hat{i}$
1.765	1	1.765
3.53	2	1.765
5.36	3	1.787
7.18	4	1.795
9.03	5	1.806
$R_{dcp} = \frac{\sum R_{di}}{3} = \frac{1.765 + 1.765 + 1.787 + 1.795 + 1.806}{5} = 1.78 \text{ Ом}$		

Отримані у результаті вимірів опори приводяться до умовної робочої температури 75°C

$$R_{75dcp} = [1 + 0.004(75^\circ - 20^\circ)] \cdot R_{dcp} = [1 + 0.004(75^\circ - 20^\circ)] \cdot 1.78 = 2.2, \text{ Ом.} \quad (10)$$

Індуктивність дроселя визначається шляхом вимірювання активного та повного опору на змінному струмі промислової частоти $f_i = 50$ Гц. При цьому

дросель підключається до джерела змінної напруги достатньої потужності та проводиться вимірювання активної потужності, напруги та струму. За результатами вимірювання визначається індуктивність обмотки дроселя за формулою

$$L_{\phi} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2}}{2\pi f} \quad (11)$$

Зазвичай активна складова падіння напруги набагато менша за індуктивну складову. В наслідок цього значенням активної складової можна знехтувати. Формула для визначення індуктивності обмотки дроселя прийме наступний вигляд

$$L_{\phi} = \frac{U}{I \cdot 2\pi f} \quad (12)$$

Результати вимірювань занесені до табл. 5.

Таблиця 5 – Результати вимірювань індуктивності згладжувального дроселя L_{ϕ} методом амперметра та вольтметра

U, B	I, B	$L_{\phi}, Гн$
24.4	1	0.0774
36.3	1.5	0.0767
48.3	2	0.0766
60.4	2.5	0.0766
71.9	3	0.076
83.4	3.5	0.0755
95.3	4	0.0755
$L_{\phi} = \frac{\sum L_{\phi i}}{7} = \frac{0.0774 + 0.0767 + 0.0766 + 0.0766 + 0.076 + 0.0755 + 0.0755}{7} = 0.0763, Гн$		

Дослідження математичної моделі реверсивного електроприводу постійного струму підпорядкованої структури на основі тиристорного блоку з роздільним керуванням, яка реалізовувався у бібліотечному блоці Simulink для Matlab [11], проводилось за допомогою стандартних тестів (реакція системи на стрибок за завданням) під час налагоджування двоконтурної СПР швидкістю ДПС на симетричний (РШ) та модульний (РС) оптимуми. Також проводилась верифікація перехідних процесів електромеханічних координат СПР за допомогою експериментальної установки.

Структурна схема СПР кутовою швидкістю ДПС з НЗ представлена на рис. 5.

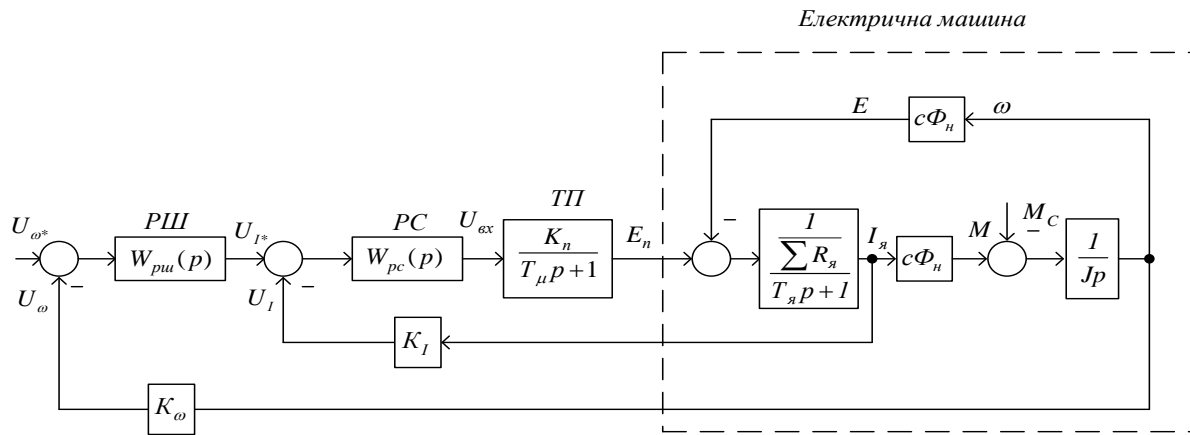


Рисунок 5 – Структурна схема СПР

Загальний активний опір якірного кола дорівнює

$$\sum R_{я} = R_{75я\text{ср}} + R_{75\delta\text{ср}} = 0.915 + 2.2 = 3.115, \text{ Ом.} \quad (13)$$

Загальна індуктивність якірного кола дорівнює

$$\sum L_{я} = L_{я} + L_{\delta} = 0.03 + 0.0763 = 0.1063, \text{ Гн} \quad (14)$$

Стала часу якірного кола дорівнює

$$T_{я} = \frac{\sum L_{я}}{\sum R_{я}} = \frac{0.1063}{3.115} = 0.0341, \text{ с.} \quad (15)$$

Стала часу СІФК тиристорного перетворювача ТП визначається згідно з [12] за наступною формулою

$$T_{\tilde{n}\delta\hat{e}} = \frac{0.5}{m \cdot f} = \frac{0.5}{6 \cdot 50} = 0.0017, \text{ нс,} \quad (16)$$

де m – кількість фаз випрямлення струму, f – лінійна частота мережі живлення, Гц.

Стала часу інерційного фільтру ТП T_{δ} дорівнює

$$T_{\phi} \geq \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{2\pi f} = \frac{152^{\circ} \frac{\pi}{180^{\circ}} - 5^{\circ} \frac{\pi}{180^{\circ}}}{2\pi 50} = 0.0082, \text{ с.} \quad (17)$$

Стала часу тиристорного перетворювача T_{μ} дорівнює

$$T_{\mu} = T_{\text{сіфк}} + T_{\phi} = 0.0082 + 0.0017 = 0.01, \text{ с.} \quad (18)$$

Електромеханічна стала часу T_M дорівнює

$$T_M = \frac{J \sum R_{я}}{c\Phi_n^2} = \frac{0.169 \cdot 3.115}{1.71^2} = 0.18 \text{ с.} \quad (19)$$

Відношення електромеханічної сталої часу T_M до електромагнітної $T_{я}$ дорівнює

$$\frac{T_M}{T_{я}} = \frac{0.18}{0.0341} = 5.3 > 2. \quad (20)$$

Співвідношення (19) показує, що впливом проти - ЕРС двигуна можна знехтувати, так як реальні перехідні процеси майже не відрізняються від розрахункових.

Логарифмічно-амплітудна характеристика (ЛАХ) розімкнутого контуру при налаштуванні на технічний оптимум (МО) зображена на (рис. 6, а). Налаштування контуру струму на модульний оптимум (МО) забезпечує зміну якісного струму за аперіодичним характером з перегулюванням $\sigma = 4.3\%$ (рис. 6, б)

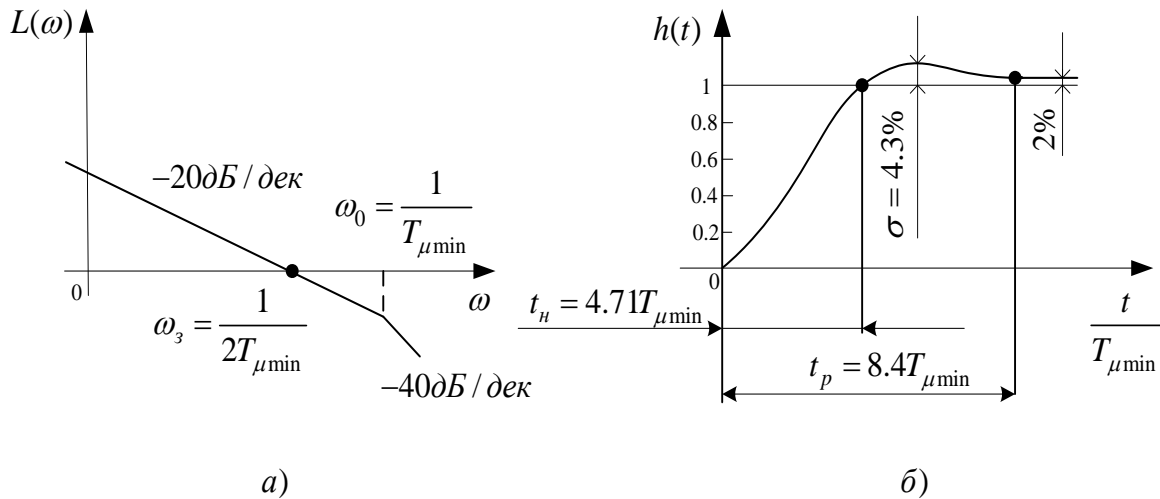


Рисунок 6 – ЛАХ розімкнутого контуру струму та перехідна характеристика замкнутого контуру при налаштуванні на МО

Знайдемо передаточну функцію ПІ-регулятора струму

$$\begin{aligned}
 W_{PC}(p) &= \frac{W_{\text{баз}}(p)}{W_{\text{роз}}(p)} = \frac{1}{2T_{\mu}p \cancel{(T_{\mu}p+1)}} \frac{\cancel{(T_{\mu}p+1)} T_{\mu}p+1}{K_n} \frac{1}{\sum R_{\mu}} \frac{1}{K_I} = \\
 &= \frac{T_{\mu} \sum R_{\mu}}{2T_{\mu} K_n K_I} \cdot \frac{T_{\mu}p+1}{T_{\mu}p} = K_{PC} \frac{T_{PC}p+1}{T_{PC}p} = K_{PC} + K_{PC} \frac{1}{T_{\mu}p} = k_{ni} + k_{ii} \frac{1}{p}; \\
 T_{PC} &= T_{\mu}, K_{PC} = \frac{T_{\mu} \sum R_{\mu}}{2T_{\mu} K_n K_I}; \\
 k_{ni} &= K_{PC} = \frac{T_{\mu} \sum R_{\mu}}{2T_{\mu} K_n K_I} = \frac{T_{\mu} \sum R_{\mu}}{2T_{\mu} K_n K_I} = \frac{0.0341 \cdot 3.115}{2 \cdot 0.01 \cdot 41.3 \cdot 0.2} = 0.6435; \\
 k_{ii} &= \frac{\sum R_{\mu}}{2T_{\mu} K_n K_I} = \frac{3.115}{2 \cdot 0.01 \cdot 41.3 \cdot 0.2} = 18.8559.
 \end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
W_{PC}(p) &= \frac{W_{\text{баз}}(p)}{W_{\text{роз}}(p)} = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)} \frac{(T_{\mu}p+1)}{K_n} \frac{T_{\mu}p+1}{\frac{1}{\sum R_{\mu}}} \frac{1}{K_I} = \\
&= \frac{T_{\mu} \sum R_{\mu}}{2T_{\mu}K_nK_I} \cdot \frac{T_{\mu}p+1}{T_{\mu}p} = K_{PC} \frac{T_{PC}p+1}{T_{PC}p} = K_{PC} + K_{PC} \frac{1}{T_{\mu}p} = k_{ni} + k_{ii} \frac{1}{p}; \\
T_{PC} &= T_{\mu}, K_{PC} = \frac{T_{\mu} \sum R_{\mu}}{2T_{\mu}K_nK_I}; \\
k_{ni} &= K_{PC} = \frac{T_{\mu} \sum R_{\mu}}{2T_{\mu}K_nK_I} = \frac{T_{\mu} \sum R_{\mu}}{2T_{\mu}K_nK_I} = \frac{0.0341 \cdot 3.115}{2 \cdot 0.01 \cdot 41.3 \cdot 0.2} = 0.6435; \\
k_{ii} &= \frac{\sum R_{\mu}}{2T_{\mu}K_nK_I} = \frac{3.115}{2 \cdot 0.01 \cdot 41.3 \cdot 0.2} = 18.8559.
\end{aligned} \tag{22}$$

Коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача $K_n = 41$ (експериментальні дані).

Пропорційна складова регулятора струму якоря дорівнює $k_{ni} = 0.64$.

Інтегральна складова регулятора струму якоря дорівнює $k_{ii} = 18.86$.

Реакція внутрішнього контуру на завдання (стрибок 4 В) $I_{\mu}^* = 20 \text{ А}$ у середовищі програмування Matlab Simulink та реального струму якоря ДПС з НЗ зображена відповідно на рис. 7 показує збігання перехідних процесів.

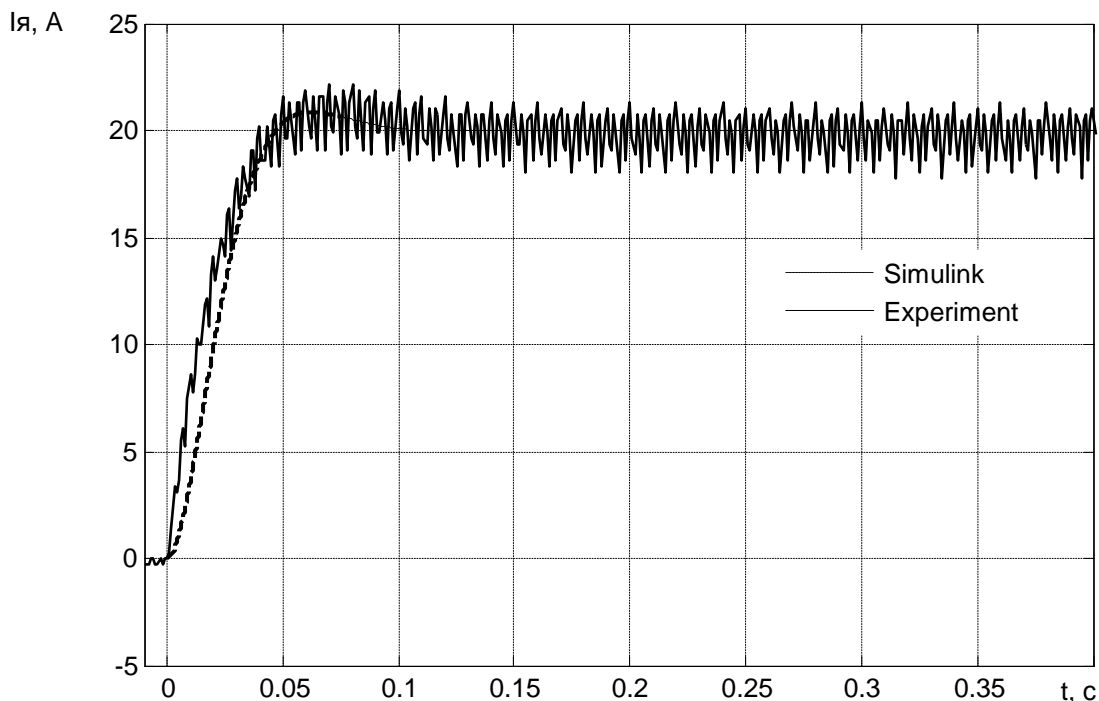


Рисунок 7 – Реакція внутрішнього контуру струму на стрибок 20 А

Показники якості контуру струму якоря налаштованого на (МО) наведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Показники якості контуру струму

Методи	час наростання я $t_n, t/T_{\mu min}$	час регулювання при 2% $t_p, t/T_{\mu min}$	Перерегулювання $\sigma = \frac{\Delta I_{max}}{I_{уст}} 100\%$
Simulink	4.71	8.4	4.3
Experiment	4.71	8.4	4.3

ЛАХ розімкнутого контуру при налаштуванні на СО ображена на (рис. 8, а). Налаштування контуру кутової швидкості на СО забезпечує зміну кутової швидкості за аперіодичним законом другого порядку з перегулюванням $\sigma = 43\%$ (рис. 8, б).

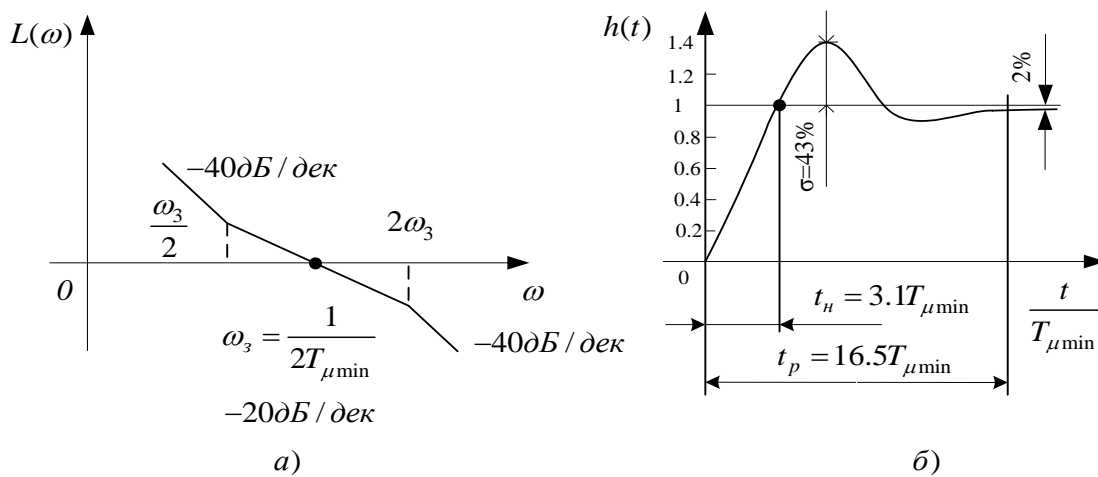


Рисунок 8 – ЛАХ розімкнутого контуру швидкості СПР та перехідна характеристика замкнутого зовнішнього контуру при налаштуванні на СО

При настроюванні контуру кутової швидкості на СО отримаємо ПІ - регулятор

$$\begin{aligned}
 W_{PII}(p) &= \frac{W_{\text{баз}}(p)}{W_{\text{роз}}(p)} = \frac{4T_v p + 1}{4T_v p} \frac{W_{\text{баз}MO}(p)}{W_{\text{роз}}(p)} = \\
 &= \frac{4T_v p + 1}{4T_v p} \frac{1}{2T_v p (T_v p + 1)} \frac{(T_v p + 1)}{\frac{1}{K_I}} \frac{Jp}{cFK_\omega} = K_{PII} \frac{T_{PII} p + 1}{T_{PII} p} = \\
 &= K_{PII} + K_{PII} \frac{1}{T_{PII} p} = \frac{JK_I}{2T_v cFK_\omega} + \frac{JK_I}{2T_v cFK_\omega} \frac{1}{4T_v p} = k_{n\omega} + k_{i\omega} \frac{1}{p}; \tag{23} \\
 T_v &= 2T_\mu; T_{PII} = 4T_v; K_{PII} = \frac{JK_I}{2T_v cFK_\omega}; \\
 k_{n\omega} &= \frac{JK_I}{2T_v cFK_\omega} = \frac{0.169 \cdot 0.2}{2 \cdot 0.02 \cdot 1.71 \cdot 0.1098} = 4.4994; \\
 k_{i\omega} &= \frac{JK_I}{2T_v cFK_\omega} \frac{1}{4T_v} = \frac{0.169 \cdot 0.2}{2 \cdot 0.02 \cdot 1.71 \cdot 0.1098 \cdot 4 \cdot 0.02} = 56.2423.
 \end{aligned}$$

Пропорційна складова регулятора кутової швидкості дорівнює $k_{no} = 4.5$.

Інтегральна складова регулятора кутової швидкості дорівнює $k_{io} = 56.2423$.

Реакція зовнішнього контуру на завдання (стрибок 0,479 В) $\omega^* = 4.3 \frac{rad}{c}$ у середовищі програмування Matlab Simulink та реальної кутової швидкості ДПС з НЗ зображена відповідно на рис. 9 показує збігання перехідних процесів.

Показники якості контуру кутової швидкості налаштованого на (СО) наведені в табл. 7.

Таблиця 7 – Показники якості контуру кутової швидкості

Методи	час наростання я $t_n, t/2T_{\mu min}$	час регулювання при 2% $t_p,$ $t/2T_{\mu min}$	Перерегулювання $\sigma = \frac{\Delta\omega_{max}}{\omega_{ycm}} 100\%$
Simulink	3.1	16.5	41
Experiment	3.1	16.5	39

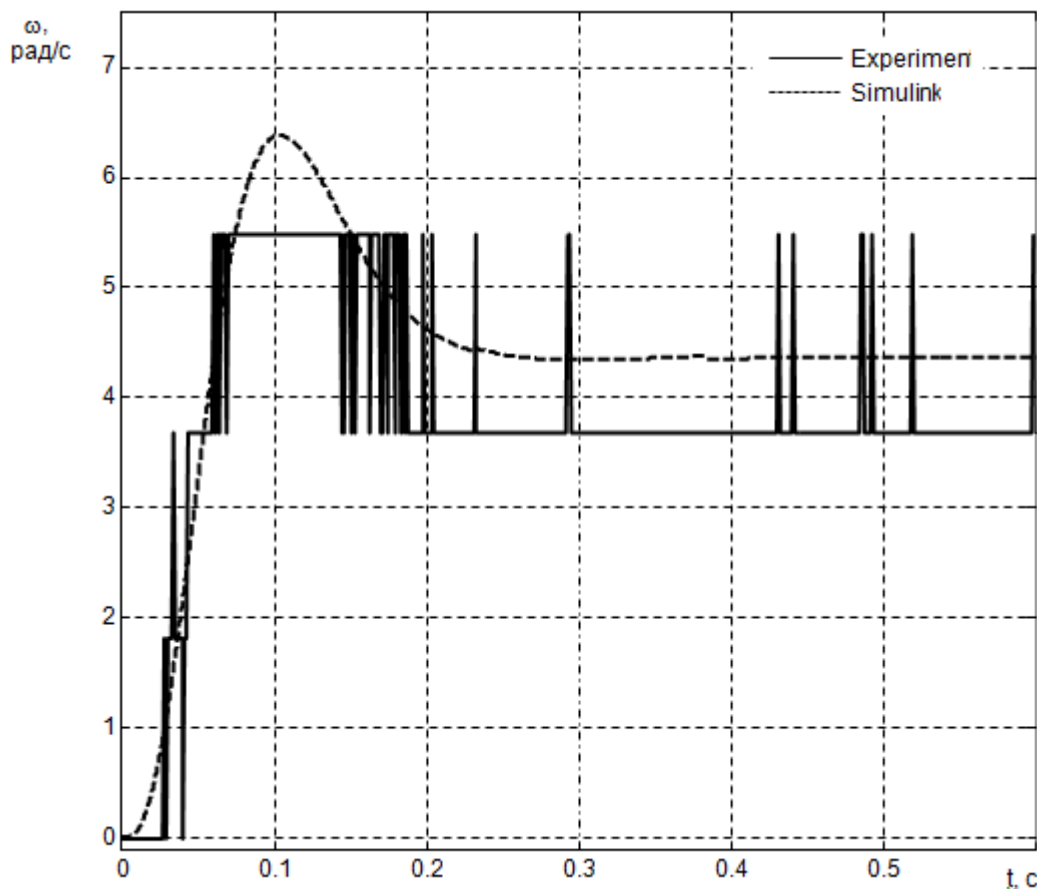


Рисунок 9 – Реакція зовнішнього контуру СПР на стрибок

Висновки. Під час проектування та налагодження систем автоматичного регулювання для правильного розрахунку та оцінки якості перехідних процесів

необхідно знати динамічні параметри. Визначення вказаних параметрів за розрахунковими формулами треба розглядати як попереднє. Тому під час налагодження систем автоматичного регулювання треба експериментально уточнювати динамічні параметри.

Порівняльний аналіз СПР кутовою швидкістю з ПІ – регуляторами проведено за допомогою прямого оцінювання статичних та динамічних характеристик показує збігання перехідних процесів електромеханічних координат математичної моделі електроприводу постійного струму з експериментальними. Різниця між показниками якості керування становить менше 3 %.

Перелік посилань

1. Островерхов М.Я., Бурик М.П. Оптимальна за критерієм мінімуму енергії прискорення система регулювання напору відцентрового насосу // Наукові праці Вінницького національного технічного університету [Електронний ресурс]. – Наукові праці ВНТУ, 30.03. 2018. – № 1 . – С. 1-5.
2. A guide for user of variable-speed drivers DC or AC Drives? ABB Industry. 2011, 12 p. URL:<http://library.e.abb.com/public/8843efec91f93d9fc1257b1300574a3b/3ADW000059.pdf>
3. Решмин Б.И., Ямпольский Д.С. Проектирование и наладка систем подчиненного регулирования электроприводов. – М.: «Энергия», 1975. – 184 с.
4. Коцегуб П.Х. Синтез вентильных приводов постоянного тока: Навч. посібник.– К.: ІЗМН, 1997. – 122 с.
5. Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
6. Чернов Е.А., Кузьмин В.П., Синичкин С.Г. Электроприводы подач станков с ЧПУ: Справочное пособие. – Горький: Волго-Вятское кН. Изд-во, 1986 – 271 с.
7. Бурик М.П., Островерхов М.Я. Моделирование системы подпорядкованого регулювання швидкості, синтезованої на основі концепції зворотних задач динаміки // Наукові праці. Серія: “Електротехніка і енергетика” – Донецьк: ДОННТУ, 2013. – № 1.(14) – С. 36-39.
8. Бурик М. П. Электроприводы подпорядкованогої структури з властивостями слабкої чутливості до параметричних та координатних збурень: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.03 "Електротехнічні комплекси та системи" / Бурик Микола Петрович – Київ, 2015. – 23 с.
9. Ямпольский Д.С., Орлова Т.А., Решмин Б.И. Определение динамических параметров электропривода постоянного тока. – М.: «Энергия», Б-ка электромонтера. Вып. 345, 1972. – 56 с.
10. Радченко Л.А., Гаврилюк В.А., Желдак А.Н. Автоматическое управление электроприводами // Учебное пособие. К.: Киевский политехнический институт, 1979. – 109 с.
11. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1) // учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 320 с.
12. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами // Учебное пособие для вузов.- Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. -392 с.