


**ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»**

**МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ**

методичні вказівки до виконання індивідуальних
завдань

Запоріжжя 2025



УДК 621.311.22:620.91:622/669 (072)
Х45

Рекомендовано Науково-методичною
радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол № 9 від 25.08.2025 р)

Автор:

Хілов В. С., докт. наук, професор, професор кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем.

Рецензент:

Рогоза М. В. – канд. техн. наук, професор кафедри електроенергетики НТУ «Дніпровська політехніка».

Х45 Хілов В. С. Моделювання електротехнічних та електромеханічних систем : методичні вказівки до виконання індивідуальних завдань. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2025. 42 с.

Методичні вказівки включають пояснення щодо процедури підготовки, виконання і захисту індивідуальної роботи, а також рекомендації і вимоги до її змісту та оформлення. Призначено для здобувачів освіти спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка другого (магістерського) рівня освіти ОПП «Енергоефективні технології в системах електрозабезпечення гірничих та металургійних підприємств».

УДК 621.311.22:620.91:622/669 (072)



ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. СИНТЕЗ СИСТЕМИ ПІПОРЯДКОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	5
1.1 Основні теоретичні відомості.....	5
1.2 Порядок виконання індивідуального завдання.....	12
1.3. Приклад виконання індивідуального завдання.....	12
1.4. Варіанти першого індивідуального завдання.....	14
1.5. Питання для самоперевірки.....	15
2. СИНТЕЗ СИСТЕМИ АСИНХРОННОГО ПРИВОДУ З ВЕКТОРНИМ УПРАВЛІННЯМ.....	17
2.1. Обґрунтування вибору та розрахунок параметрів структурної схеми асинхронного двигуна.....	17
2.2. Обґрунтування вибору структурної схеми асинхронного приводу з векторним керуванням.....	23
2.3. Синтез регуляторів структурної схеми асинхронного приводу з векторним керуванням зі стабілізацією потокозчеплення ротора.....	26
2.3.1. Синтез регулятора контуру струму.....	26
2.3.2. Синтез регулятора контуру стабілізації потокозчеплення ротора.....	26
2.3.3. Синтез регулятора контуру моменту.....	31
2.3.4. Синтез регулятора контуру швидкості.....	34
2.4. Варіанти другого індивідуального завдання.....	41
2.5. Питання для самоперевірки.....	41



ВСТУП

Методичні вказівки розроблені для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», G3 Електрична інженерія та призначені для виконання індивідуальних завдань з дисципліни «Моделювання електротехнічних та електромеханічних систем».

Мета методичних вказівок полягає у наданні теоретико-практичної підтримки студентам під час самостійного виконання індивідуальних завдань, формуванні в них навичок застосування сучасних методів математичного та комп'ютерного моделювання для аналізу й синтезу електротехнічних та електромеханічних систем різного призначення.

Виконання індивідуальних завдань впливає на формування у майбутніх фахівців знань і навичок, необхідних для математичного та комп'ютерного моделювання складних електротехнічних і електромеханічних систем, аналізу їхніх динамічних характеристик, оптимізації режимів роботи, а також застосування сучасних програмних засобів для дослідження функціонування цих систем.

Індивідуальні завдання передбачають самостійне виконання студентами практичних робіт, спрямованих на поглиблення теоретичних знань та розвиток практичних навичок моделювання. Завдання розроблені з урахуванням сучасних вимог до професійної підготовки магістрів та передбачають використання програмних продуктів, таких як MATLAB/Simulink, ANSYS, PSpice, LabVIEW та інші.

У процесі вивчення дисципліни здобувачі опановують методи побудови математичних моделей, чисельного розв'язання задач динаміки систем, аналізу сталих і перехідних процесів, а також використовують прикладне програмне забезпечення для імітаційного моделювання. Індивідуальні завдання сприяють розвитку аналітичного мислення, підвищенню професійної компетентності та вмінню приймати обґрунтовані інженерні рішення на основі результатів моделювання.

Методичні вказівки містять опис структури індивідуального завдання, порядок його виконання, вимоги до оформлення результатів, а також приклади вирішення типових задач. Це сприятиме ефективному засвоєнню навчального матеріалу, формуванню професійної компетентності та підготовці до майбутньої інженерної діяльності.

Методичні вказівки містять загальні вимоги до оформлення індивідуальної роботи, рекомендації щодо виконання типових завдань, приклади побудови моделей та інтерпретації отриманих результатів. Вони можуть бути використані як при аудиторному навчанні, так і при самостійній роботі здобувачів освіти.

1. СИНТЕЗ СИСТЕМИ ПІПОРЯДКОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

При проектуванні систем управління електроприводом нижнього рівня, що формує властивості власне електроприводу, використовуються різні способи управління. Найбільшого поширення набули системи, виконані за принципами підлеглого регулювання. Відмінна особливість цього принципу - каскадне включення регуляторів, кількість яких відповідає кількості контрольованих параметрів електроприводу, таких як струм і напруга якоря, швидкість обертання двигуна, положення валу приводного механізму.

Мета роботи: розрахунок двоконтурної системи керування електроприводом постійного струму з підлеглим регулюванням координат.

1.1 Основні теоретичні відомості

На рис.1 зображено узагальнена структурна схема системи підпорядкованого регулювання. Об'єкт регулювання представлений у вигляді трьох складових $W_1(s)$, $W_2(s)$, $W_3(s)$. Кожна з них характеризується щодо "великої" постійної часу та вихідною координатою, за якою і організовано зворотний зв'язок.

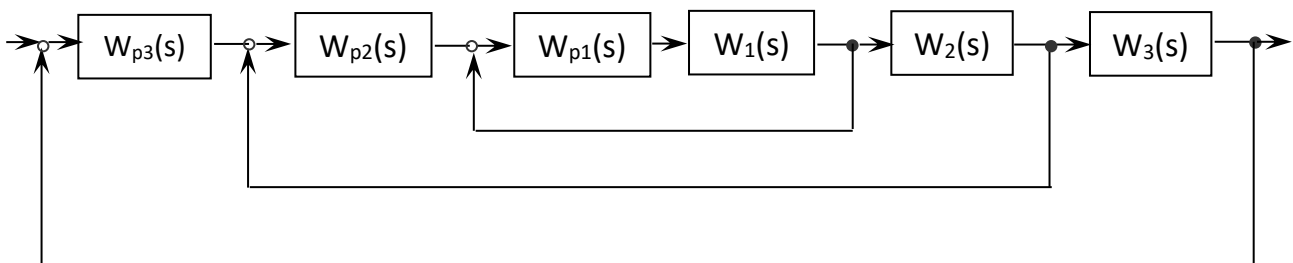


Рис.1.1 – Узагальнена структурна схема багатоконтурної системи підпорядкованого регулювання

На схемі регулятори $W_{p1}(s)$, $W_{p2}(s)$, $W_{p3}(s)$ включені каскадно, причому на вході регулятора кожного з контурів порівнюються сигнали, пропорційні заданому і дійсному значенням вихідної координати даного контуру, а вихідна напруга регулятора служить задаючим сигналом для подальшого контуру. Оскільки кожен наступний контур отримує завдання (підпорядкований) від попереднього контуру, то системи, побудовані за цим принципом, отримали назву систем підлеглого регулювання.

У ряді практичних випадків реальні контури регулювання можуть бути зведені до найпростіших контурів, які налаштовують по технічному (модульному) або симетричному оптимуму. На рис.2 представлена функціональна схема електроприводу з подібною системою регулювання.

Двигун Д з обмоткою збудження ОЗД отримує живлення від керованого тиристорного перетворювача ТП.

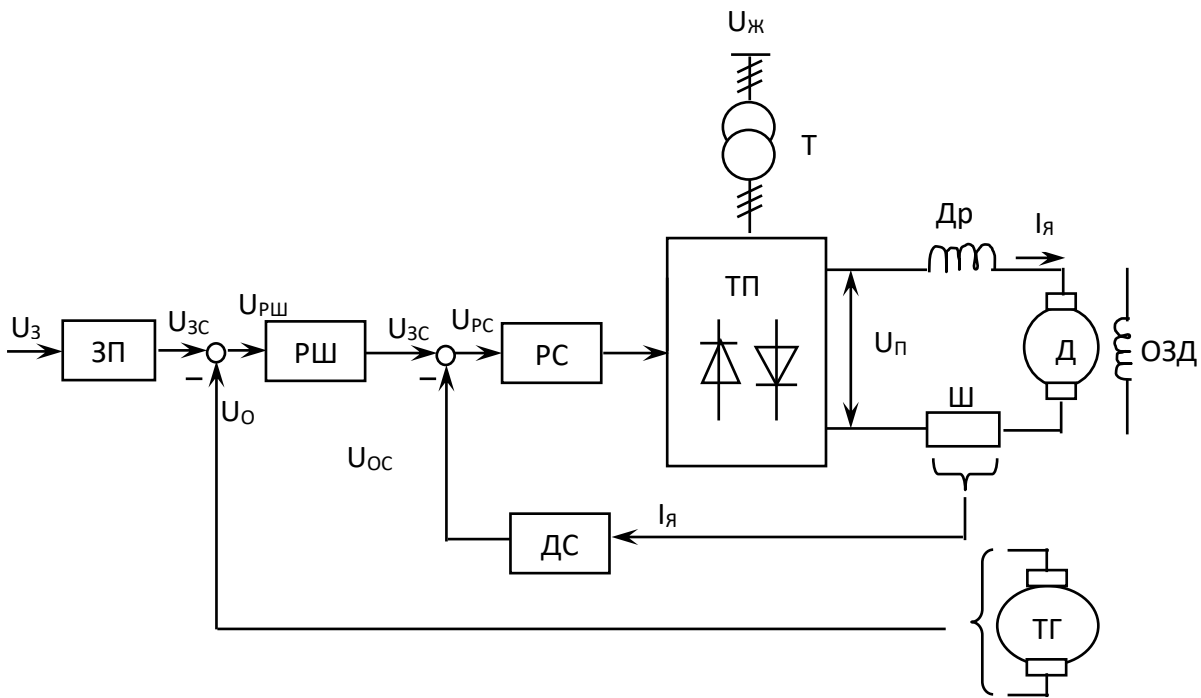


Рис.1.2 – Функціональна схема двоконтурної системи керування електроприводом

Узгодження номінальних значень напруги живильної ТП мережі $\sim U_{ж}$, з напругою якоря двигуна забезпечується трансформатором Т. При необхідності поліпшення умов комутації струму якоря за рахунок обмеження швидкості його зміни в колі якоря двигуна встановлюється дросель Др. Система управління електроприводу містить два контури регулювання: внутрішній контур струму (КС) і зовнішній контур швидкості (КШ).

Контур струму включає силову частину електроприводу з виходом по струму якоря $I_{я}$, коло негативного зворотного зв'язку по струму якоря і регулятор струму якоря РС. На вході РС порівнюються напруги завдання струму якоря $U_{зс}$ і напруга зворотного зв'язку $U_{ос}$, що надходить з датчика струму ДС. На вхід ДС подається напруга з шунта Ш, пропорційне струму якорної кола двигуна. Блок БО обмежує вихідну напругу $U_{рш}$ регулятора швидкості РШ.

Контур швидкості двигуна включає замкнений КС, коло негативного зворотного зв'язку по швидкості двигуна і регулятор швидкості. На вході РШ порівнюються напруга завдання швидкості $U_{зш}$, що подається з виходу задаючого пристрою ЗП, і напруга зворотного зв'язку $U_{ош}$ за швидкістю двигуна, що надходить від тахогенератора ТГ. Регулятор швидкості може бути як пропорційним (при невисоких вимогах до точності регулювання швидкості), так і пропорційно-інтегральним (при необхідності

абсолютної статичної точності регулювання). Заданий пристрій формує бажаний закон зміни швидкості електроприводу.

Структурну схему електроприводу з передатними функціями відповідних елементів представлено на рис.1.3.

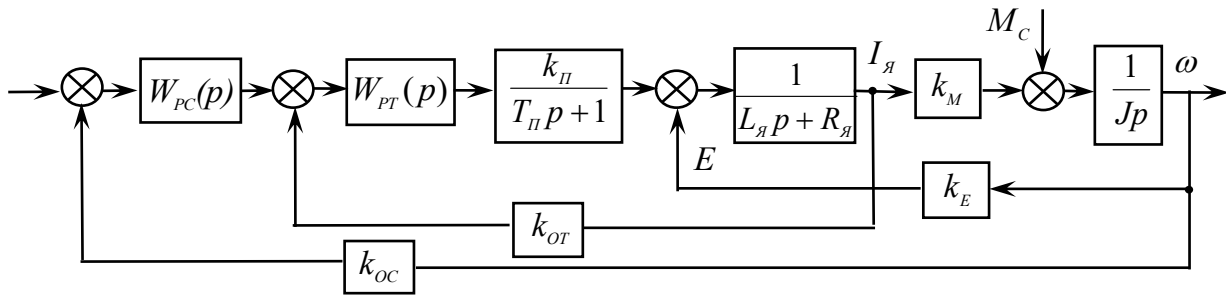


Рис.1.3 – Структурна схема електроприводу

Дана схема не відповідає каскадній структурі підлеглого регулювання (рис.1.1) через додатковий зв'язок по ЕРС двигуна, що впливає на контур струму. За допомогою відомих правил перетворення структурних схем можна привести дану схему до виду (рис.1.4).

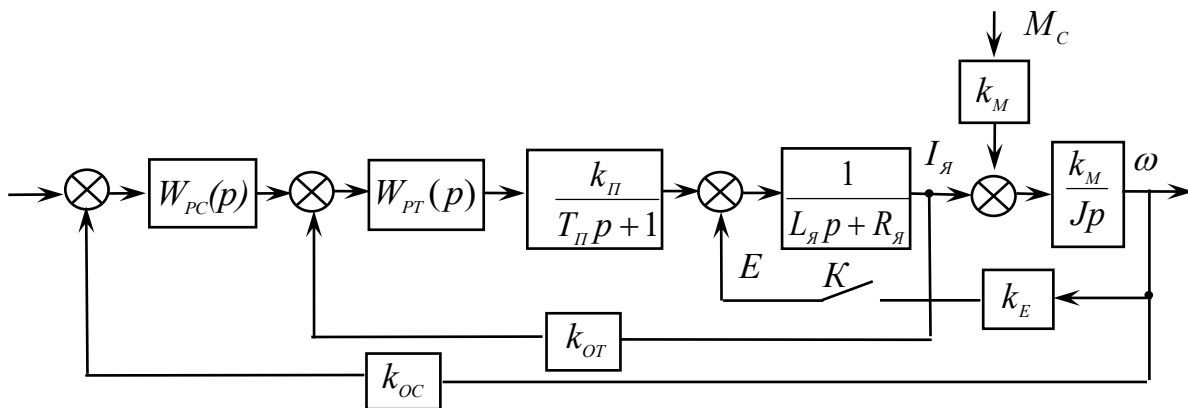


Рис.1.4 – Перетворена структурна схема електроприводу

Якщо двигун є частиною системи регулювання замкнутої, наприклад, за швидкістю, то паралельно зворотної зв'язку по ЕРС підключається сильніший зворотний зв'язок і наближено можна знехтувати змінами ЕРС двигуна в порівнянні зі змінами напруги. Тоді, розмикаючи ключ К, відключається зворотний ЕРС і система набуває вигляду каскадного включення.

Введемо позначення постійних часу двигуна. Електромагнітна T_E та механічна T_M постійна часу відповідно:

$$T_E = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}, \quad (1.1)$$



$$T_M = \frac{JR_{я}}{(K\Phi)^2}, \quad (1.2)$$

де $R_{я}$ – активний опір якорного кола, Ом;
 $L_{я}$ – індуктивність якорного кола, Гн;
 J – сумарний момент інерції якоря та навантаження, кг м²;
 $K\Phi$ – конструктивний коефіцієнт двигуна (Н м А⁻¹).

Допоміжний коефіцієнт k_0 :

$$k_0 = \frac{1}{R_{я}}, \quad (1.3)$$

Конструктивний коефіцієнти $K\Phi$ є або довідковою величиною, або розраховується за наведеними нижче формулами, виходячи з номінальних параметрів двигуна:

$$K\Phi = \frac{U_{ян} - R_{я}I_{ян}}{\omega_H} \quad (1.4)$$

З урахуванням введених позначень та відключеного зворотного зв'язку по ЕРС структурна схема набуває вигляду, представленого на рис.1.5.

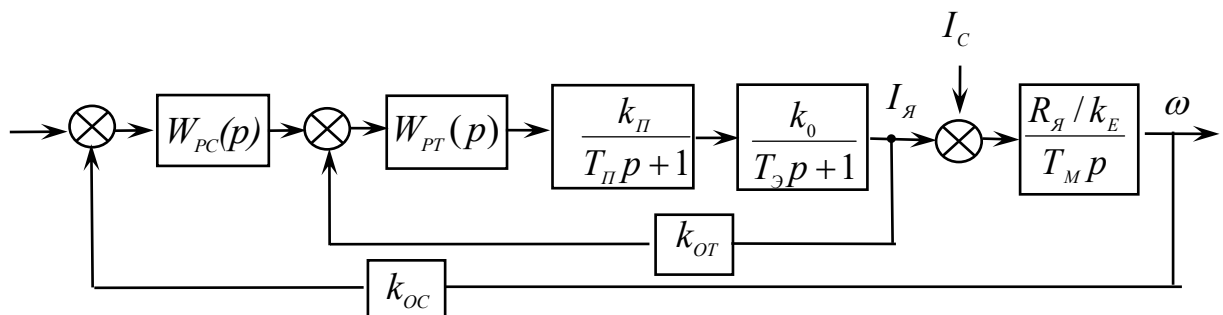


Рис.1.5 – Структурна схема двоконтурної системи з підлеглим регулюванням

Таким чином, отримали, що двигун постійного струму незалежного збудження в найпростішому випадку характеризується послідовним з'єднанням аперіодичного та інтегруючого ланки. Аперіодична ланка описує електромагнітні процеси в двигуні і характеризується постійною часу T_E , а інтегруюча ланка описує механічні процеси в двигуні і характеризується електромеханічною постійною T_M . У системі підлеглого регулювання внутрішній контур струму компенсує електромагнітну постійну часу, а зовнішній – постійну електромеханічну часу. Як некомпенсированою (малої) постійної часу T_{μ} приймається постійна часу тиристорного перетворювача $T_{\Pi} = T_{\mu}$.

Налаштуємо внутрішній контур струму на технічний оптимум (ТО).

Сенс налаштування на технічний оптимум полягає в тому, що в найбільш широкій смузі частот зробити модуль часткової характеристики близьким до одиниці, тобто щоб система рівномірно пропускала сигнал у найбільш широкому діапазоні частот. Чим ширша смуга пропускання, тим менше час перехідного процесу контуру.

При налаштуванні на технічний оптимум передатна функція розімкнутої системи повинна мати вигляд:

$$W_P(s) = \frac{1}{2T_\mu s(T_\mu s + 1)}, \quad (1.6)$$

У цьому випадку перехідний процес не залежить від постійного часу об'єкта, а визначається величиною T_μ (0,01-0,001с). Перерегулювання при цьому складає $\sigma=4,3\%$, а час першого узгодження $t_c \approx 4,7T_\mu$.

Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика має нахили -20,-40 дб/дек із частотою зрізу $\omega_{зр}$ і частотою сполучення ω_c :

$$\omega_{зр} = \frac{1}{2T_\mu}, \quad \omega_c = \frac{1}{T_\mu} \quad (1.7)$$

Передатна функція внутрішнього контуру на основі рис. 1.5:

$$W_P(s) = W_{PC}(s) \frac{K_\Pi}{T_\Pi s + 1} \frac{K_0 K_{OC}}{T_E s + 1}, \quad (1.8)$$

Об'єктом регулювання (компенсації) є аперіодична ланка з постійної T_E . Прирівнюючи вирази (1.6) і (1.8) отримуємо вираз для розрахунку передавальної функції регулятора струму:

$$W_{PC}(s) = \frac{(T_\mu s + 1)(T_E s + 1)}{2T_\mu s(T_\mu s + 1)K_\Pi K_0 K_{OC}} = \frac{T_E s + 1}{2T_\mu K_\Pi K_0 K_{OC} s} = \frac{\frac{T_E}{2T_\mu K_\Pi K_0 K_{OC}} + \frac{1}{2T_\mu K_\Pi K_0 K_{OC} s}}{1}, \quad (1.9)$$

Отримуємо, що при налаштуванні системи на ТО з об'єктом регулювання у вигляді аперіодичного ланки в систему повинен бути включений пропорційно-інтегральний регулятор (ПІ-регулятор). Передаточна функція замкнутого внутрішнього контуру після спрощення має вигляд:

$$W_3(s) = \frac{K_\Pi}{T_\Pi s + 1} \frac{1/K_{OC}}{2T_\mu^2 s^2 + 2T_\mu s + 1}, \quad (10)$$

Так як T_μ мала величина ($T_\mu \ll 1$), то можна приблизно записати:



$$W_3(s) = \frac{1/k_{OC}}{2T_{\mu} s + 1}, \quad (1.11)$$

Тоді зовнішній контур швидкості має вигляд, поданий на рис.1.6. Некомпенсованою постійною є постійна часу $T_{\mu ш} = 2T_{\mu}$, а об'єктом для компенсації - ланка, що інтегрує.

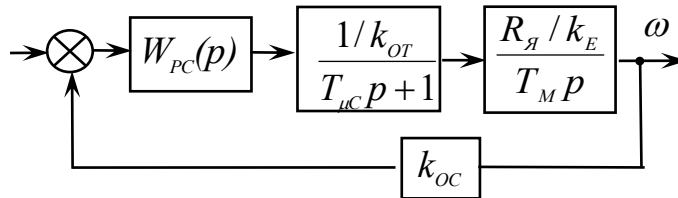


Рис.1.6 – Зовнішній контур швидкості

Передатна функція розімкнутої системи згідно з рис.1.6:

$$W_P(s) = W_{Pш}(s) \frac{1/k_{OC}}{T_{\mu ш} s + 1} \frac{R_Я / k_E}{T_M s} K_{Oш}, \quad (1.12)$$

При налаштуванні на технічний оптимум передатна функція регулятора швидкості, з урахуванням виразів (6) та (12) має вигляд:

$$W_{Pш}(s) = \frac{(T_{\mu ш} s + 1) T_M K_{OC} K_{\Phi} s}{2 T_{\mu ш} R_Я s (T_{\mu ш} s + 1)} = \frac{T_M K_{OC} K_{\Phi}}{2 T_{\mu ш} R_Я} = \frac{T_M K_{OC} K_{\Phi}}{4 T_{\mu} R_Я}, \quad (1.13)$$

Тобто, регулятор повинен бути підсилувальною ланкою (П-регулятор), а регулювання виявляється статичним, що може призвести до появи статичної похибки.

Для отримання астатичного регулювання швидкості може бути використаний симетричний оптимум. Цій назві відповідає симетрична щодо частоти зрізу $\omega_{зр}$ ЛАЧХ оптимізованого розімкнутого контуру з передавальною функцією:

$$W_P(s) = \frac{4 T_{\mu ш} s + 1}{8 T_{\mu ш}^2 s^2 (T_{\mu ш} s + 1)}. \quad (1.14)$$

Перерегулювання при даному налаштуванні становить $\sigma = 43\%$, а час першого узгодження $t_c \approx 3,1 T_{\mu}$. Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика має нахили $-40, -20, -40$ дБ/дек з частотою зрізу $\omega_{зс}$ і частотами сполучення $\omega_{с1}, \omega_{с2}$ відповідно:

$$\omega_{зс} = \frac{1}{2 T_{\mu}}, \quad \omega_{с1} = \frac{1}{4 T_{\mu}}, \quad \omega_{с2} = \frac{1}{2 T_{\mu}} \quad (1.15)$$

Налаштуємо зовнішній контур на симетричний оптимум. З урахуванням (12) та (14) передатна функція регулятора набуде вигляду:

$$W_{PШ}(s) = \frac{(4T_{\mu ш}s+1)(T_{\mu ш}s+1)T_M K_{OC} K_{\Phi} s}{8T_{\mu ш}^2 s^2 (T_{\mu ш}s+1)R_{Я} K_{OШ}} = \frac{T_M K_{OC} K_{\Phi}}{2T_{\mu ш} R_{Я} K_{OШ}} + \frac{T_M K_{OC} K_{\Phi}}{8T_{\mu ш}^2 R_{Я} K_{OШ} s} = \frac{T_M K_{OC} K_{\Phi}}{4T_{\mu ш} R_{Я} K_{OШ}} + \frac{T_M K_{OC} K_{\Phi}}{16T_{\mu ш}^2 R_{Я} K_{OШ} s}. \quad (1.16)$$

Тобто як регулятор швидкості при налаштуванні на симетричний оптимум використовується ПІ-регулятор.

У фізичних системах регулятори, як правило, реалізуються на операційних підсилювачах (рис.7), передатна функція яких визначається як відношення операторних опорів зворотного зв'язку до вхідного опору:

$$W(s) = \frac{X_{ВВХ}(s)}{X_{ВХ}(s)} = \frac{Z_{OЗ}(s)}{Z_{ВХ}(s)} = -\frac{R_2 + \frac{1}{Cs}}{R_1} = -\left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{R_1 Cs}\right). \quad (1.17)$$

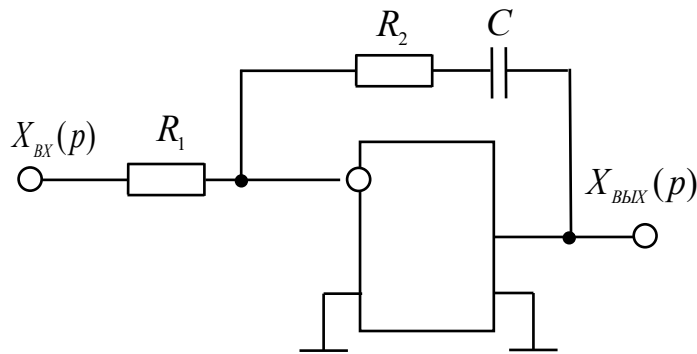


Рис.1.7 – Принципова схема ПІ-регулятора

Вираз (1.17) показує, що ПІ-регулятор складається з паралельного з'єднання підсилювального та інтегруючого ланок, параметри яких визначаються рівняннями:

$$K_{\Pi} = \frac{R_2}{R_1}, T_I = R_1 C. \quad (1.18)$$

де K_{Π} – коефіцієнт підсилення регулятора;
 T_I - стала часу інтегрування регулятора.

Задавшись одним із параметрів, наприклад ємністю, за заданими значеннями K_{Π} та T_I визначаються резистори опору. Причому ємність C слід вибрати такої величини, щоб опори знаходилися в певних межах: нижній - визначається допустимим навантаженням операційних підсилювачів (сумарний опір навантаження не повинен бути більше 2,4 кОм), верхній - заводостійкістю схеми (понад 100 кОм чутливість схеми до перешкод зростає). Оптимальна величина опорів лежить у межах 10...60 кОм.

1.2 Порядок виконання індивідуального завдання

1. Ознайомитись із теоретичним матеріалом.
2. На підставі вихідних даних розрахувати відсутні параметри.
3. Дослідити внутрішній контур струму, налаштований на технічний оптимум. Розрахувати ПФ регулятора, побудувати перехідні процеси та ЛАЧХ без регулятора та з ним. Зробити висновки.
4. Дослідити зовнішній контур швидкості, налаштований на технічний оптимум. Розрахувати ПФ регулятора, побудувати перехідні процеси та ЛАЧХ без регулятора та з ним. Зробити висновки.
5. Дослідити зовнішній контур швидкості, налаштований на симетричний оптимум. Розрахувати ПФ регулятора, побудувати перехідні процеси та ЛАЧХ без регулятора та з ним. Зробити висновки.
6. Визначити параметри ПІ-регуляторів, реалізованих на операційному підсилювачі, ємності та опорів.
7. Скласти звіт про роботу.

1.3. Приклад виконання індивідуального завдання

Початкові дані.

Силова частина електроприводу є системою тиристорний перетворювач - двигун постійного струму з незалежним збудженням.

Номинальна напруга, струм, момент і швидкість двигуна:

$$U_H = 220 \text{ В}, I_H = 21 \text{ А}, M_H = 23,5 \text{ Н} \cdot \text{м}, \omega_H = 162 \text{ рад/с}.$$

Опір, індуктивність якоря та момент інерції двигуна:

$$R_{\text{я}} = 1,8 \text{ Ом}, L_{\text{я}} = 0,019 \text{ Гн}, J = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Коефіцієнт посилення та стала часу перетворювача:

$$K_{\text{П}} = 25, T_{\text{П}} = T_{\mu} = 0,005 \text{ с}.$$

Передавальний коефіцієнт тахогенератора (зворотний зв'язок за швидкістю):

$$k_{\text{ТГ}} = k_{\text{ОШ}} = 0,035 \cdot \text{с} / \text{рад}.$$

Передавальний коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом:

$$k_{\text{ОС}} = 0,16 \text{ В/А}.$$

Розв'язок.

1) Розрахуємо відсутні параметри.

Коефіцієнт ЕРС КФ:

$$K_{\text{Ф}} = \frac{U_{\text{ян}} - R_{\text{я}} I_{\text{ян}}}{\omega_H} = 1,125 \text{ , В} \cdot \text{с}.$$

Електромагнітна стала часу двигуна:

$$T_{\text{Е}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = 0,011 \text{ , с}$$

Механічна стала часу двигуна:

$$T_{\text{М}} = \frac{J R_{\text{я}}}{(K_{\text{Ф}})^2} = 0,071 \text{ , с}$$

Допоміжний коефіцієнт k_0 :

$$k_0 = \frac{1}{R_{\text{я}}} = 0,556, \text{ , A/B.}$$

2) Налаштуємо внутрішній контур струму на технічний оптимум. Передатна функція регулятора струму згідно (9):

$$W_{PC}(s) = \frac{T_E}{2T_{\mu}K_{\Pi}K_0K_{OC}} + \frac{1}{2T_{\mu}K_{\Pi}K_0K_{OC}s} = 0,495 + \frac{44,964}{s}.$$

Передатна функція замкнутого контуру, згідно (1.11):

$$W_3(s) = \frac{1/K_{OC}}{2T_{\mu}s+1} = \frac{0,625}{0,01s+1},$$

Дослідження внутрішнього контуру з регулятором і без, здійснюється самостійно, шляхом побудови перехідних процесів і логарифмічних амплітудно-частотних характеристик.

3) Налаштуємо зовнішній контур швидкості на технічний і симетричний оптимум. Передатна функція регулятора швидкості, налаштованого на ТО, згідно (1.13):

$$W_{Pш}(s) = \frac{T_M K_{OC} K_{\Phi}}{4T_{\mu} R_{\text{я}}} = 11,094,$$

Передатна функція регулятора швидкості, налаштованого на СО, згідно (16):

$$W_{Pш}(s) = \frac{T_M K_{OC} K_{\Phi}}{4T_{\mu} R_{\text{я}} K_{Oш}} + \frac{T_M K_{OC} K_{\Phi}}{16T_{\mu}^2 R_{\text{я}} K_{Oш} s} = 11,094 + \frac{554,687}{s}.$$

4) Досліджуємо систему керування електроприводу. На рис.8 представлені перехідні процеси системи (1 - без регулятора швидкості, 2 - з регулятором, налаштованим на ТО, 3 - з регулятором, налаштованим на СО). На рис.1.9 відповідно представлені логарифмічні амплітудно-частотні характеристики (ЛАЧХ). За побудованими графіками визначаються всі характеристики і робляться висновки про вплив на якість процесів регуляторів, налаштованих на технічний і симетричний оптимум.

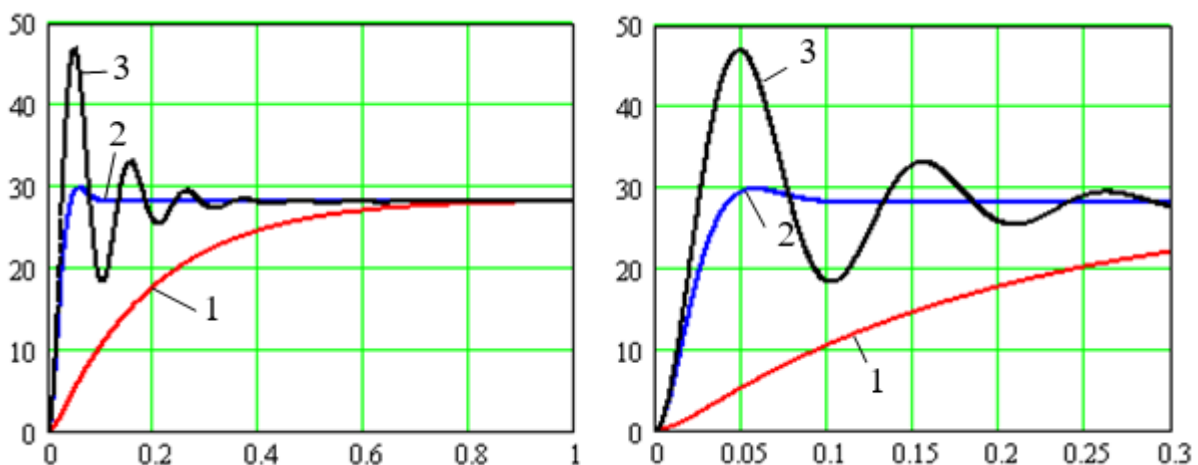


Рис.1.8 – Перехідні процеси зовнішнього контуру швидкості

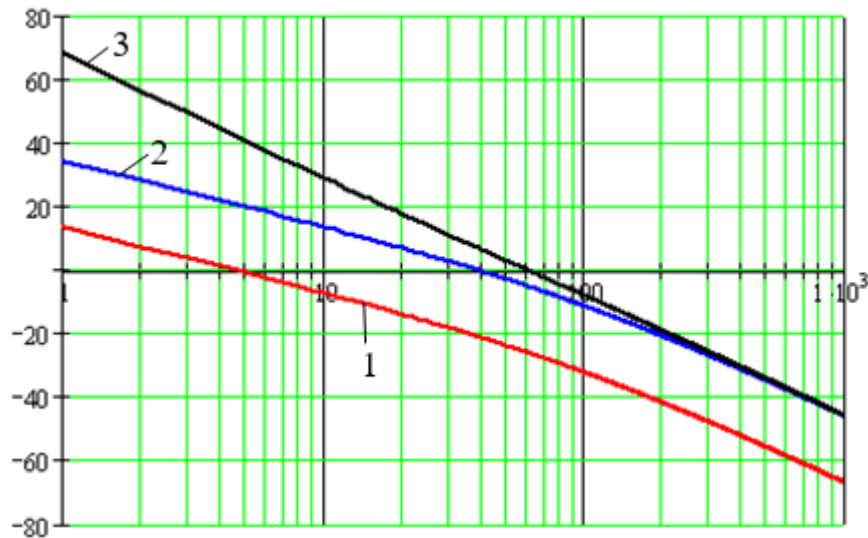


Рис.1.9 – ЛАЧХ зовнішнього контуру швидкості

5) Визначимо параметри ПІ-регуляторів.

Параметри підсилювальної та інтегруючої ланок ПІ-регулятора струму, рівні відповідно: $k_{\text{П}}=0,495$, $T_{\text{І}}=0,022$. Задамо значення ємності $C=1$ мкФ, тоді з урахуванням (1.18):

кому, кому.

Параметри підсилювального та інтегруючої ланок ПІ-регулятора швидкості, рівні відповідно: $K_{\text{П}}=11,094$, $T_{\text{І}}=1,8 \cdot 10^{-3}$ – $31,8 \cdot 10^{-3}$. Задамо значенням ємності $C = 0,5$ мкФ, тоді з урахуванням (1.18):

$$R_1 = \frac{T_{\text{І}}}{C} = 3,6 \text{ Ком}, R_2 = K_{\text{П}}R_1 = 40 \text{ кОм}.$$

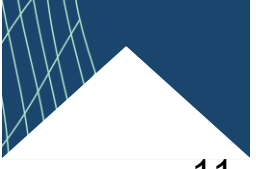
1.4. Варіанти першого індивідуального завдання

№	$U_{\text{н}}$	$I_{\text{н}}$	$M_{\text{н}}$	$\omega_{\text{н}}$	$R_{\text{я}}$	$L_{\text{я}}$	J	$K_{\text{П}}$	$T_{\text{П}}$	$K_{\text{ош}}$	$K_{\text{ос}}$
1	60	2,86	0,39	314	0,46	0,02	$15,3 \cdot 10^{-4}$	25	0,009	0,016	1,17
2	60	2,27	0,49	209	0,94	0,038	$15,3 \cdot 10^{-4}$	50	0,008	0,024	1,47
3	110	1,53	0,39	314	1,48	0,069	$15,3 \cdot 10^{-4}$	25	0,009	0,016	2,18
4	110	1,22	0,49	209	3,0	0,129	$15,3 \cdot 10^{-4}$	50	0,009	0,024	2,73
5	60	4,57	0,65	314	0,23	0,013	$20,4 \cdot 10^{-4}$	25	0,011	0,016	0,73
6	60	2,72	0,585	209	0,52	0,032	$20,4 \cdot 10^{-4}$	50	0,012	0,024	1,23
7	110	2,46	0,65	314	0,765	0,043	$20,4 \cdot 10^{-4}$	25	0,011	0,016	1,36
8	110	1,46	0,585	209	1,74	0,108	$20,4 \cdot 10^{-4}$	50	0,012	0,024	2,28

9	60	5,6	0,81	314	0,284	0,01	$35,7 \cdot 10^{-4}$	25	0,007	0,016	0,60
10	60	4,3	0,97	209	0,645	0,02	$35,7 \cdot 10^{-4}$	50	0,006	0,024	0,78
11	110	3,05	0,91	314	0,945	0,034	$35,7 \cdot 10^{-4}$	25	0,007	0,016	1,09
12	110	2,33	0,97	209	2,2	0,068	$35,7 \cdot 10^{-4}$	50	0,006	0,024	1,43
13	110	8,2	2,96	262	0,237	0,015	$135 \cdot 10^{-4}$	25	0,013	0,019	0,41
14	110	5,0	2,92	157	0,605	0,042	$135 \cdot 10^{-4}$	50	0,014	0,032	0,67
15	220	4,1	2,96	262	0,85	0,061	$135 \cdot 10^{-4}$	25	0,014	0,019	0,81
16	220	2,5	2,92	157	2,38	0,168	$135 \cdot 10^{-4}$	50	0,014	0,032	1,33
17	110	19,2	6,25	262	0,147	0,006	$408 \cdot 10^{-4}$	25	0,008	0,019	0,17
18	110	13,0	7,15	157	0,42	0,016	$408 \cdot 10^{-4}$	50	0,008	0,032	0,26
19	220	9,5	6,25	262	0,58	0,066	$408 \cdot 10^{-4}$	25	0,023	0,019	0,35
20	220	6,4	7,15	157	1,7	0,027	$408 \cdot 10^{-4}$	50	0,003	0,032	0,52
21	110	36,6	12,5	262	0,06	0,003	$662 \cdot 10^{-4}$	25	0,010	0,019	0,09
22	110	18,2	10,4	157	0,192	0,012	$662 \cdot 10^{-4}$	50	0,013	0,032	0,18

1.5. Питання для самоперевірки

1. У чому полягає принцип підлеглого регулювання?
2. Як розраховуються постійні часи ДПТ?
3. Як виглядає структурна схема системи управління електроприводом постійного струму з підлеглим регулюванням координат?
4. Який контур є внутрішнім та зовнішнім, які постійні часу компенсуються регуляторами у кожному випадку?
5. У чому сенс налаштування на технічний оптимум?
6. Як виглядає передатна функція розімкнутої системи під час налаштування на технічний оптимум.
7. Які параметри перехідного процесу та ЛАЧХ має система при налаштуванні на ТО?
8. Який вигляд має регулятор внутрішнього контуру при налаштуванні на ТО, коли об'єктом регулювання є аперіодична ланка?
9. Як виглядає регулятор зовнішнього контуру при налаштуванні на ТО, коли об'єктом регулювання є інтегруюча ланка?
10. У чому сенс налаштування на симетричний оптимум?



11. Як виглядає передатна функція розімкнутої системи під час налаштування на симетричний оптимум.
12. Які параметри перехідного процесу та ЛАЧХ має система при налаштуванні на СО?
13. Як виглядає схема ПІ-регулятора?
14. За яким принципом здійснюється підбір елементів ПІ-регулятора, реалізованого на операційних підсилювачах?

2. СИНТЕЗ СИСТЕМИ АСИНХРОННОГО ПРИВОДУ З ВЕКТОРНИМ УПРАВЛІННЯМ

2.1. Обґрунтування вибору та розрахунок параметрів структурної схеми асинхронного двигуна

На рис. 2.1 представлена структурна схема асинхронного електродвигуна в системі координат, що обертається з орієнтацією на вектор потокосцеплення ротора [1]. На основі будується система векторного управління асинхронним приводом зі стабілізацією потокосцеплення ротора, має широке застосування у практиці електропривода.

Елементи структурної схеми з індексом «а» відносяться до каналу формування потокосцеплення ротора. Елементи з індексами "b" відносяться до каналу формування швидкості двигуна. Елементи з індексом "с" характеризують перехресні взаємозв'язки. Розрахунок параметрів даної структурної схеми проводиться за каталожними даними двигуна [2].

Для наочності подальшого викладу матеріалу скористаємося даними двигуна 6AM200L4, представленими в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Характеристики асинхронного двигуна 6AM200L4

Найменування величини	Позначення	Величина	Одиниці виміру
Частота мережі	f_1	50	Гц
Число фаз мережі	m	3	
Номінальна потужність	P_2	75000	Вт
Фазна напруга	U_{1n}	220	В
Лінійна напруга	U_3	380	В
Синхронна швидкість	n_1	1500	об/хв
Номінальна швидкість	n_2	1470	об/хв
Число пар полюсів	p_p	2	
Номінальний коефіцієнт корисної дії (ККД)	η_n	0,935	
Момент інерції ротору	$J_{дв}$	1	кг·м ²
Номінальний коефіцієнт потужності	$\cos\varphi_n$	0,83	
Кратність пускового струму	λ_k	6,3	
Перевантажувальна здатність за моментом	m_k	2,5	

Номінальне значення фазного струму:

$$I_{1n} = \frac{P_{2H}}{m \cdot U_{1H} \cdot \eta \cdot \cos\varphi} \quad (2.1)$$

$$I_{1n} = \frac{75000}{3 \cdot 220 \cdot 0,935 \cdot 0,83} = 146,4 \text{ A.}$$

Номінальне ковзання:

$$S_{1n} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

$$S_n = \frac{1500 - 1470}{1500} = 0,02.$$

Критичне ковзання:

$$S_k = \frac{\left[m_k + \sqrt{(m_k^2 + 2 \cdot S_n \cdot (m_k - 1) - 1)} \right] \cdot S_n}{1 - 2 \cdot S_n \cdot (m_k - 1)} \quad (2.3)$$

$$S_k = \frac{\left[2,5 + \sqrt{(2,5^2 + 2 \cdot 0,02 \cdot (2,5 - 1) - 1)} \right] \cdot 0,02}{1 - 2 \cdot 0,02 \cdot (2,5 - 1)} = 0,102 \quad (2.3)$$

Безрозмірний коефіцієнт:

$$b_k = 1 + S_n = 1 + 0,02 = 1,02 \quad (2.4)$$

Механічні втрати:

$$\Delta P_M = (U_c \cdot (\sqrt{3} \cdot I_{1n}) \cdot \cos\varphi - P_2) \cdot \left(1 + \frac{n_1^2}{1000^2} \right) \cdot 0,05 \quad (2.5)$$

$$\Delta P_M = (380 \cdot (\sqrt{3} \cdot 146,4) \cdot 0,83 - 75000) \cdot \left(1 + \frac{1500^2}{1000^2} \right) \cdot 0,05 = 808,7 \text{ Вт}$$

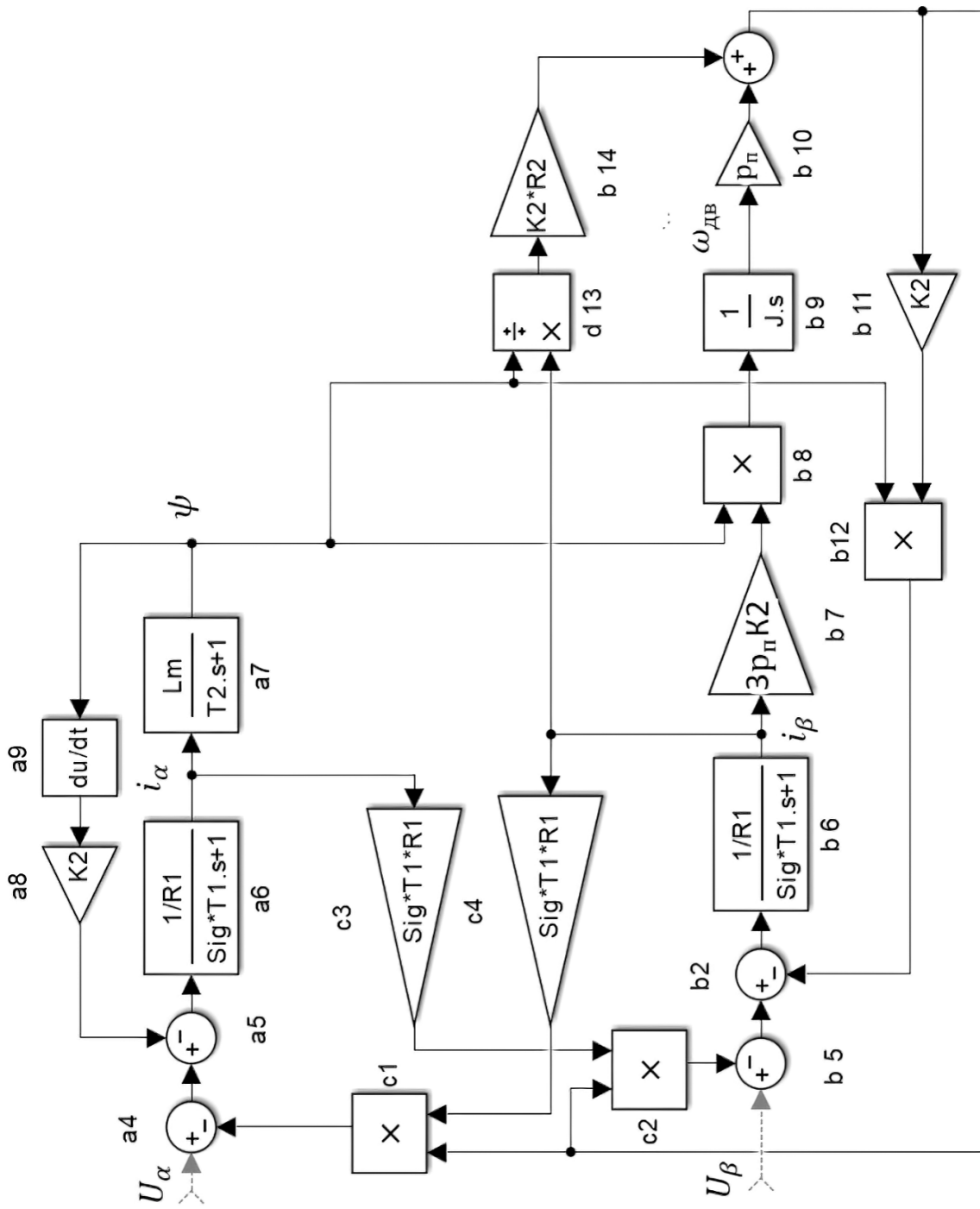


Рис. 2.1.1. – Структурна схема асинхронного електродвигуна при орієнтації обертальної системи координат за вектором потокозчеплення ротору

Параметри структурної схеми. Активний опір обмотки статора:

$$R_1 = \frac{U_c^2 \cdot (1 - S_n)}{2 \cdot b_k \cdot \left(1 + \frac{b_k}{S_k}\right) \cdot m_k \cdot (P_2 + \Delta P_M)}, \quad (2.6)$$

$$R_1 = \frac{380^2 \cdot (1 - 0,02)}{2 \cdot 1,02 \cdot \left(1 + \frac{1,02}{0,102}\right) \cdot 2,5 \cdot (75000 + 808,7)} = 0,0333 \text{ Ом.}$$

Активний опір обмотки ротора:

$$R_2 = \frac{P_2 + \Delta P_M}{3 \cdot (1 - S_n) \cdot \lambda_k^2 \cdot I_{1n}^2} \quad (2.7)$$

$$R_2 = \frac{75000 + 808,7}{3 \cdot (1 - 0,02) \cdot 6,3^2 \cdot 146,4^2} = 0,024 \text{ Ом.}$$

Індуктивність обмотки ротора, що враховує магнітний зв'язок з двома іншими фазними обмотками ротора:

$$L_1 = \frac{U_c}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi \cdot f_1 \cdot I_{1H} \cdot \left[\sqrt{1 - \cos^2 \varphi} - S_n \cdot \cos \varphi / S_k\right]}, \quad (2.8)$$

$$L_1 = \frac{380}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi \cdot 50 \cdot 146,5 \cdot \left[\sqrt{1 - 0,83^2} - 0,02 \cdot 0,83 / 0,102\right]} = 0,012 \text{ Гн}$$

$$L_2 = L_1, \quad (2.9)$$

$$L_2 = 0,012 \text{ Гн.}$$

Індуктивність розсіювання фазної обмотки статора:

$$L_{\sigma c} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_c}{\lambda_k I_{1n} \sqrt{3}}\right)^2 - (R_1 + R_2)^2}}{2 \cdot \pi \cdot f_1}, \quad (2.10)$$

$$L_{\sigma c} = \frac{\sqrt{\left(\frac{380}{6,3 \cdot 146,4 \sqrt{3}}\right)^2 - (0,033 + 0,06024)^2}}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 7,6 \cdot 10^{-4} \text{ Гн.},$$

Індуктивність контуру намагнічування (взаємна індуктивність, що враховує магнітний зв'язок однієї фази статора з трьома обмотками ротора і відповідно однієї обмотки ротора з трьома обмотками статора):

$$L_m = L_1 - L_{\sigma c}, \quad (2.11)$$

$$L_m = 0,012 - 7,6 \cdot 10^{-4} = 0,01124 \text{ Гн.},$$

Коефіцієнти розсіювання двигуна:

$$Sig = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}, \quad (2.12)$$

$$Sig = 1 - \frac{0,01124^2}{0,012 \cdot 0,012} = 0,1227$$

Коефіцієнт:

$$K_2 = \frac{L_m}{L_2}, \quad (2.13)$$

$$K_2 = \frac{0,01124}{0,012} = 0,9367.$$

Стала часу фази обмотки ротора:

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2}, \quad (2.14)$$

$$T_2 = \frac{0,012}{0,025} = 0,5 \text{ с.}$$

Стала часу фази обмотки статора:

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1}, \quad (2.15)$$

$$T_1 = \frac{0,012}{0,0333} = 0,36 \text{ с.}$$

На рис. 2.2 зображена структурна схема двигуна 6AM200L4 у системі координат, що обертається з орієнтацією на вектор потокозчеплення ротора.

Параметри структурної схеми двигуна використовуються при синтезі регуляторів автоматизованого електроприводу.

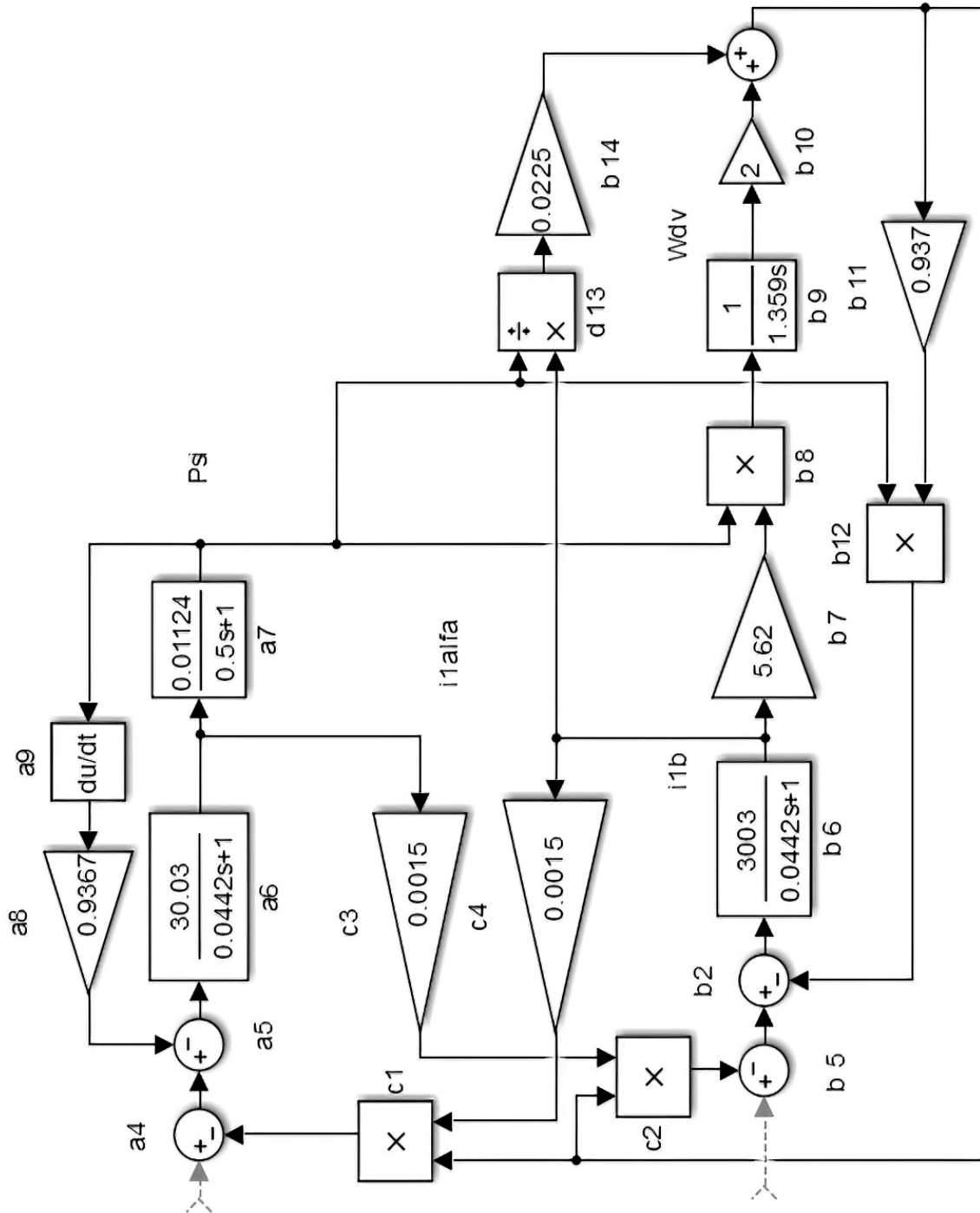


Рис. 2.2 – Структурна схема двигуна 6AM200L4

2.2. Обґрунтування вибору структурної схеми асинхронного приводу з векторним керуванням

Використання методу векторного управління зі стабілізацією потокозчеплення ротора дозволяє при синтезі та аналізі електроприводу використовувати методи, добре опрацьовані в теорії електроприводів постійного струму.

Структурна схема асинхронного приводу з векторним управлінням зі стабілізацією потокозчеплення ротора, запропонована монографії [1], зображена на рис. 2.3.

Система стабілізації потокозчеплення ротора (елементи з індексом "а") та система регулювання швидкості (елементи з індексом "b") побудовані за принципом підлеглого регулювання.

Система стабілізації потокозчеплення, яка містить у прямому каналі ланки

$$W(s)_{p\psi}, W(s)_{pI\alpha}, W(s)_{пч}, \frac{1/R_1}{Sig \cdot T_1s + 1}, \frac{L_m}{T_2s + 1}$$

є двоконтурною. Контур струму внутрішній, а контур потокозчеплення зовнішній.

Система автоматичного керування швидкості, яка містить у прямому каналі ланки

$$W(s)_{p\omega}, W(s)_{pM}, W(s)_{pI\beta}, W(s)_{пч}, \frac{1/R_1}{Sig \cdot T_1s + 1}, 3p_n K_2, \frac{1}{Js}$$

складається з трьох контурів, де контур струму та контур моменту є внутрішніми, а контур швидкості зовнішнім.

Внутрішні контури струму та моменту доцільно налаштовувати на оптимум за модулем. Зовнішній контур потокозчеплення також необхідно налаштовувати оптимум по модулю. Однак, зовнішній контур швидкості рекомендується налаштовувати на симетричний оптимум.

Передатна функція силової частини перетворювача частоти є ланкою з чистим запізненням, передатна функція якої

$$W(s)_{пч} = K_{пч} e^{-\tau s} \quad (2.16)$$

де $K_{пч} = 220\text{В}$ — фазна напруга живлячої мережі,

$$\tau = \frac{1}{f_{так}}, \quad (2.17)$$

де $f_{так}$ — тактова частота перетворювача.

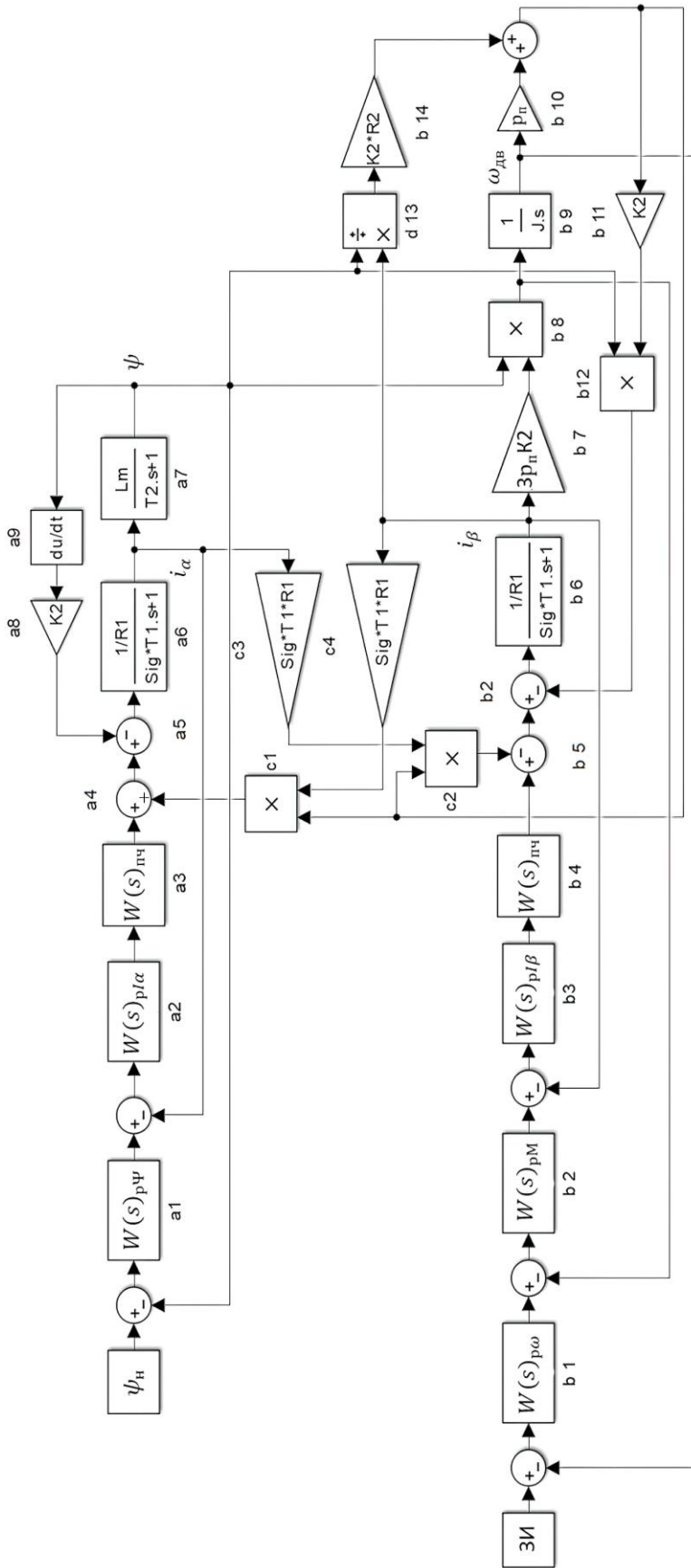


Рис. 2.3 – Структурна схема асинхронного привода при векторному управлінні зі стабілізацією поточкозчеплення ротора в діючих значеннях змінних

Використовуючи перетворення Тейлора вираз (2.16) можна подати у вигляді

$$W(s)_{\text{пч}} = K_{\text{пч}} e^{-\tau s} \approx \frac{K_{\text{пч}}}{T_{\text{пч}} s + 1} \quad (2.18)$$

Отже, силова частина перетворювача частоти може бути представлена аперіодичним ланкою першого порядку з параметрами $K_{\text{пч}} = 220$, $T_{\text{пч}} = 1/f_{\text{так}}$. Значення $f_{\text{так}}$ вказується у паспорті на перетворювач. Для подальших розрахунків приймемо $f_{\text{так}} = 10$ кГц.

Датчик швидкості (енкодер) і датчик струму вважатимемо без інерційними з одиничними коефіцієнтами передачі. Датчик струму вбудований в перетворювач частоти, датчик швидкості встановлюється на вільний кінець ротора двигуна

Фізично датчиків потокозчеплення та моменту не існує. Поточні значення потокозчеплення та моменту визначаються розрахунковим шляхом за моделлю двигуна. Для подальших розрахунків віртуальні датчики потокозчеплення та моменту доцільно вважати безінерційними з коефіцієнтами передачі рівними одиниці.

У цій структурній схемі завдання на швидкість формується задатчиком інтенсивності (3I).

Значення номінального потокозчеплення визначається за формулою:

$$\Psi_H = \sqrt{\frac{2 \cdot M_H \cdot R_2}{3 \cdot p \cdot (\omega_0 - \omega_H)}} \quad (2.19)$$

синхронна кутова частота обертання:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_1}{30}, \quad (2.20)$$

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад/с,}$$

номинальна кутова частота обертання:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_2}{30}, \quad (2.21)$$

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot 1470}{30} = 153,86 \text{ рад/с,}$$

номінальний момент двигуна:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}, \quad (2.22)$$

$$M_H = \frac{75000}{153,86} = 487,46 \text{ Н м.,}$$



Отже,

$$\cdot \psi_H = \sqrt{\frac{2 \cdot 487,46 \cdot 0,24}{3 \cdot 2 \cdot (157 - 153,86)}} = 1,24 \text{ Вб.}$$

2.3. Синтез регуляторів структурної схеми асинхронного приводу з векторним керуванням зі стабілізацією потокозчеплення ротора

2.3.1. Синтез регулятора контуру струму

Структурна схема контуру струму наведено на рис. 2.4.

У зв'язку з тим, що контур струму внутрішній, його налаштовують на оптимум по модулю. Так як в даному контурі як незмінна його частина присутні дві послідовно включені аперіодичні ланки, слід використовувати ПІ - регулятор (рис. 2.5).

Постійна часу регулятора визначається за формулою (2.23), динамічний коефіцієнт посилення за формулою (24)

$$T_{pI} = Sig \cdot T_1 = 0,1227 \cdot 0,36 = 0,04417 \text{ с.} \quad (2.23)$$

$$K_{pI} = \frac{Sig \cdot T_1}{2 \cdot T_{пч} \cdot K_{пч} / R_1} \quad (2.24)$$

$$K_{pI} = \frac{0,1227 \cdot 0,36}{2 \cdot 0,0001 \cdot 220 / 0,0333} = 0,03$$

На рис. 2.6 зображена структурна схема контуру струму, налаштованого на оптимум по модулю.

Для оцінки якості налаштування контуру на рис. 2.7 зображена його перехідна функція.

Аналіз перехідної функції контуру струму показує його точне налаштування на оптимум за модулем.

2.3.2. Синтез регулятора контуру стабілізації потокозчеплення ротора

Структурна схема контуру потокозчеплення із внутрішнім контуром струму представлена на рис. 2.8. Зворотним зв'язком а8, а9 нехтуємо.

Згідно з існуючими рекомендаціями, налаштовувати контур стабілізації потокозчеплення необхідно на оптимум по модулю.

Варто відзначити, що внутрішній контур струму налаштований на оптимум по модулю, його передатна функція є аперіодичною ланкою другого порядку, яку можна замінити на аперіодичну ланку першого порядку з постійною часу, що дорівнює двом малим постійним контуру струму:

$$W_{c.e}(s) = \frac{1}{2 \cdot T_{пч} s + 1}$$

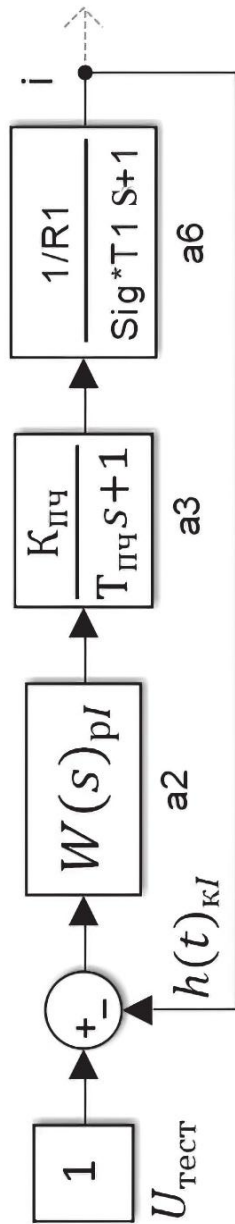


Рис. 2.4. Структурна схема контуру струму

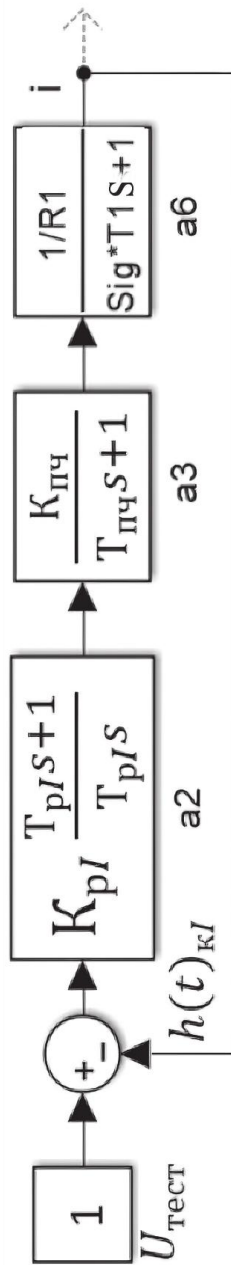


Рис. 2.5 – Структурна схема контуру струму со структурною регулятором, що забезпечив налаштування на оптимальний по модулю

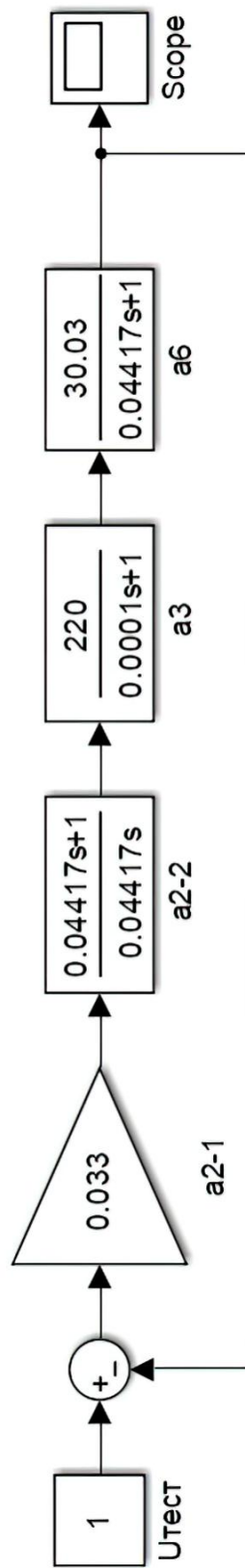


Рис. 2.6 – Структурна схема контуру струму, налаштованого на оптимальний по модулю

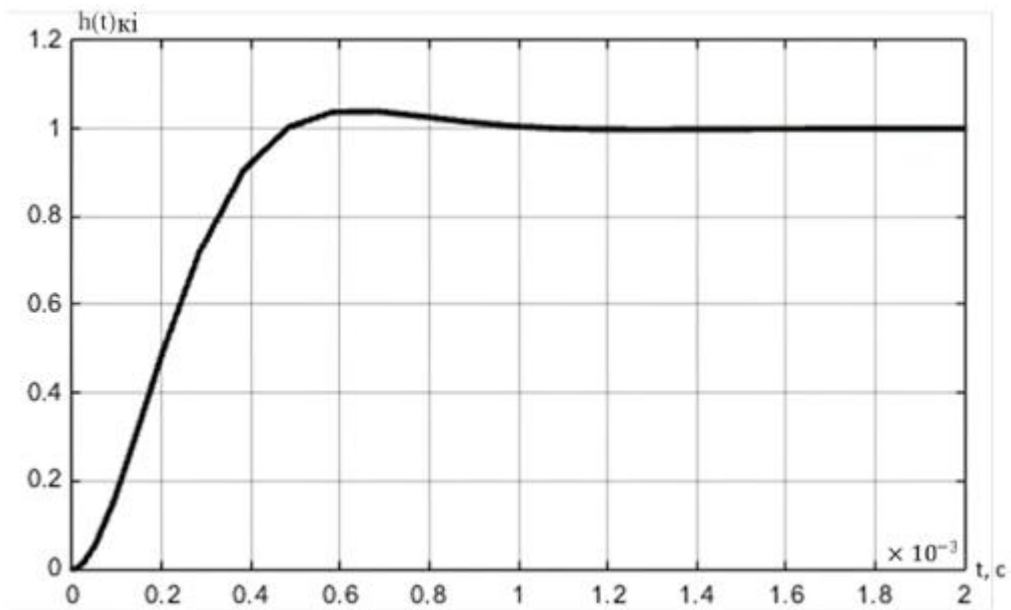


Рис. 2.7 – Перехідна функція контуру струму

Незмінна частина контуру потокозчеплення після прийнятих допущень є два послідовно включених аперіодичних ланки першого порядку (рис.1.9). Отже необхідно використовувати пропорційно-інтегральний регулятор.

Стала часу регулятора:

$$T_{p\psi} = T_2 = 0,5 \text{ с.}$$

Динамічний коефіцієнт підсилення

$$T_{p\psi} = \frac{T_2}{2 \cdot (2 \cdot T_{пч}) \cdot L_m}, \quad (2.25)$$

$$T_{p\psi} = \frac{0,5}{2 \cdot (2 \cdot 0,0001) \cdot 0,01124} = 111209,96,$$

Структурні схеми спрощеного та реального контурів потокозчеплення зображені на рис. 2.10.

Перехідні функції, що зображені на рис. 2.10 контурів, надані на рис. 2.11.

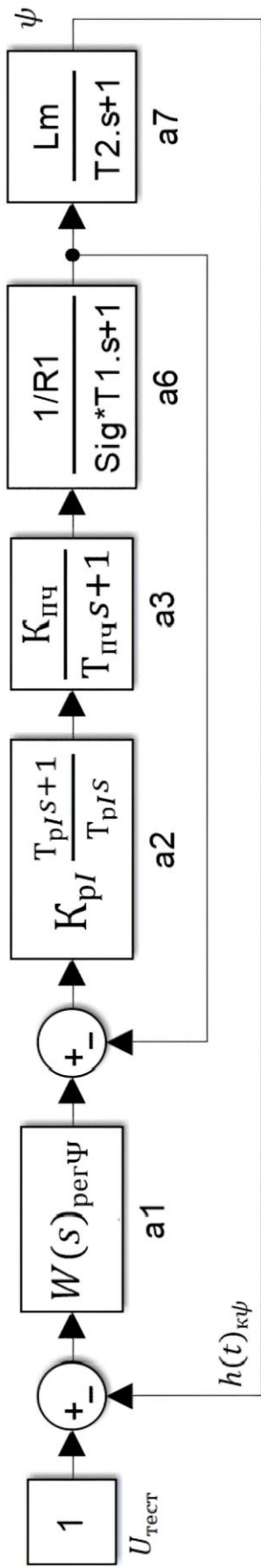


Рис.2. 8 – Структурна схема контуру поточкозчеплення

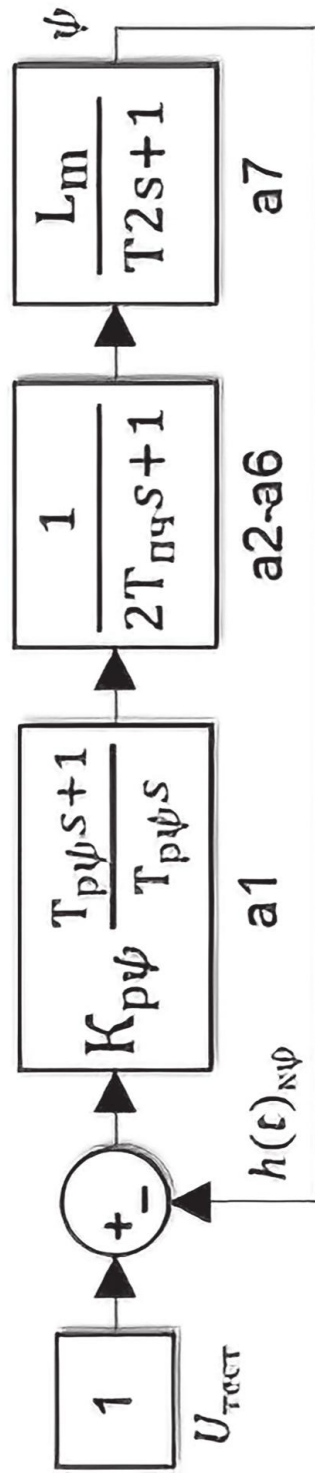
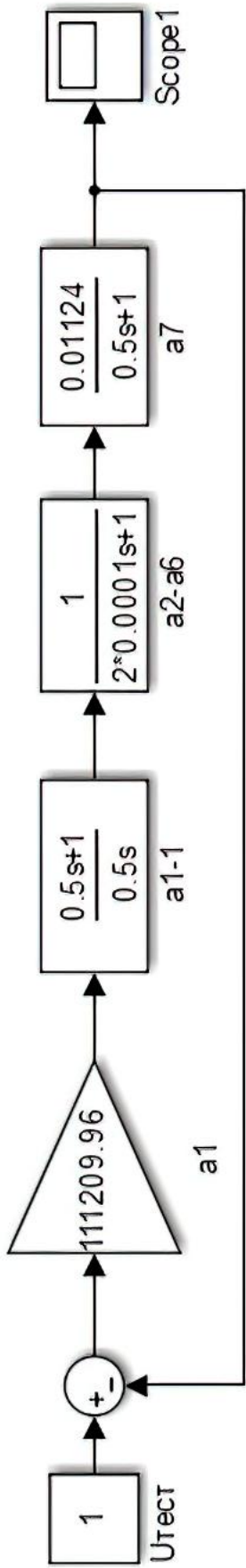
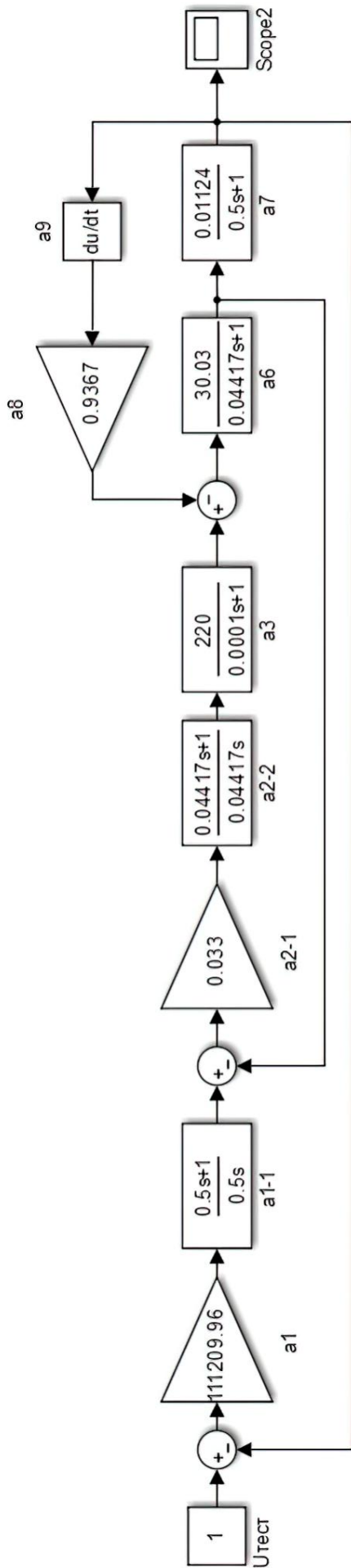


Рис. 2.9 – Структурна схема спрощеного контуру поточкозчеплення



a)



б)

Рис.2.10 – Структурні схеми контурів поточкозчеплення с разрахованими параметрами: а) спрощена, б) повна

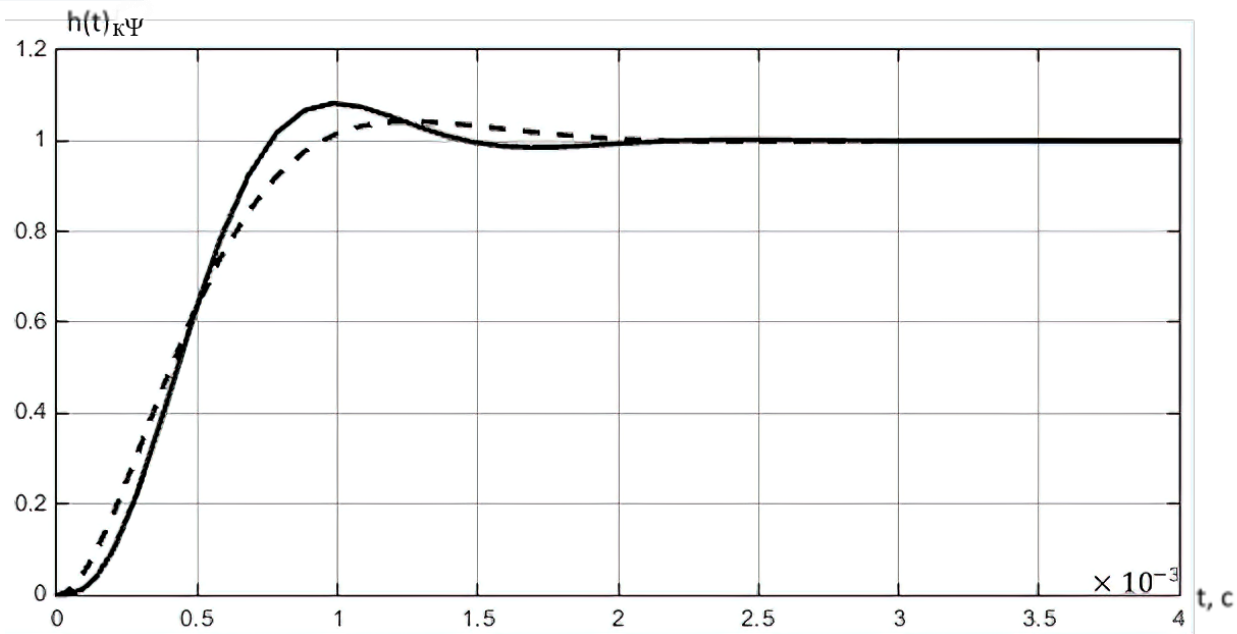


Рис. 2.11– Графіки перехідних функцій контурів потокозчеплення: сплошна лінія — реального, пунктирна — спрощеного

Аналіз цих графіків показує, що перерегулювання і час першого узгодження характеристики реального контуру відрізняються від значень, характерних для ідеального налаштування на оптимум по модулю, але швидкодіючий і стійкий контур.

2.3.3. Синтез регулятора контуру моменту

Структурна схема реального контуру моменту, виділена із структурної схеми на рис. 3 наведена на рис. 2.12.

Контур моменту є внутрішнім по відношенню до зовнішнього контуру швидкості та зовнішнім по відношенню до контуру струму. Отже, контур моменту необхідно налаштовувати на оптимум по модулю. Враховуючи заміну реального контуру струму аперіодичною ланкою першого порядку, регулятор моменту має бути інтегральним.

На рис.2.13 зображено спрощений контур моменту, в якому контур струму представлений ланкою з функцією передавання аперіодичного ланки першого порядку з постійної часу $T_{\mu} = 2T_{пч}$.

Стала часу регулятора:

$$T_{рм} = 2 \cdot T_{\mu} \cdot 3 \cdot p_{п} \cdot K_2 \cdot \psi_H, \quad (2.26)$$

$$T_{рм} = 2 \cdot 0,0001 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 0,9367 \cdot 1,24 = 0,00139 \text{ с.},$$

На рис. 2.14 представлені структурні схеми спрощеного та реального контурів моменту з розрахованими параметрами.

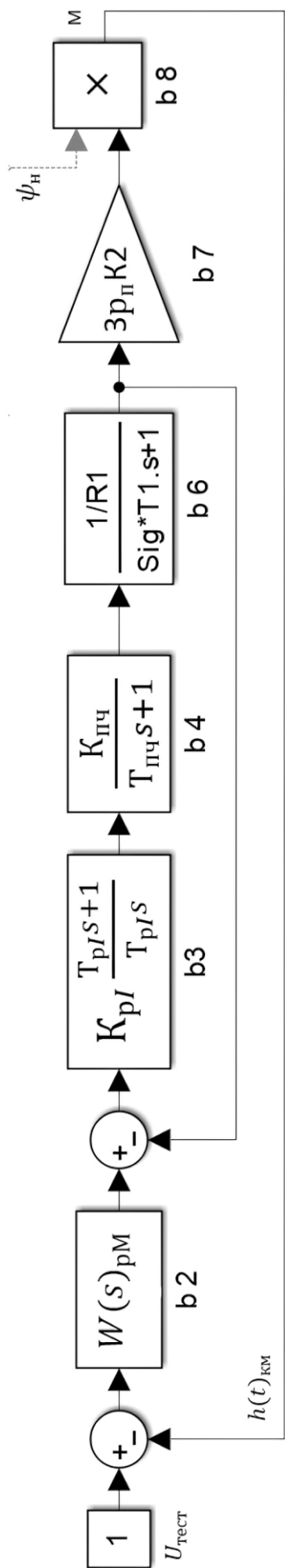


Рис. 2.12 – Структурна схема реального контура моменту

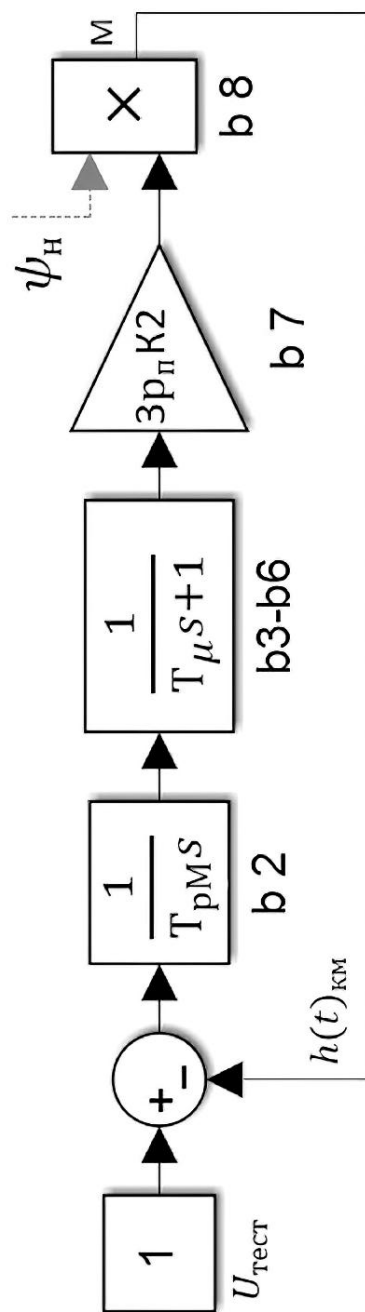
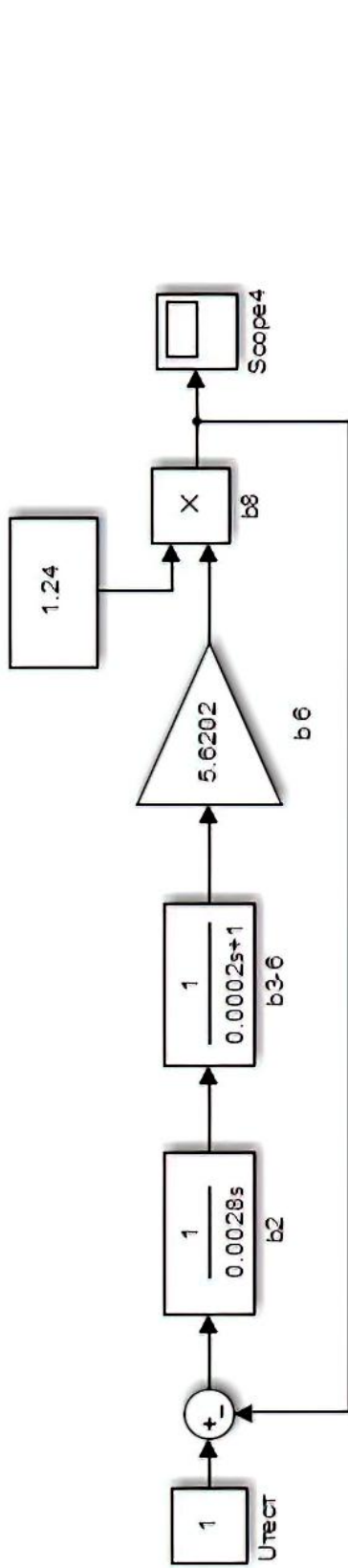
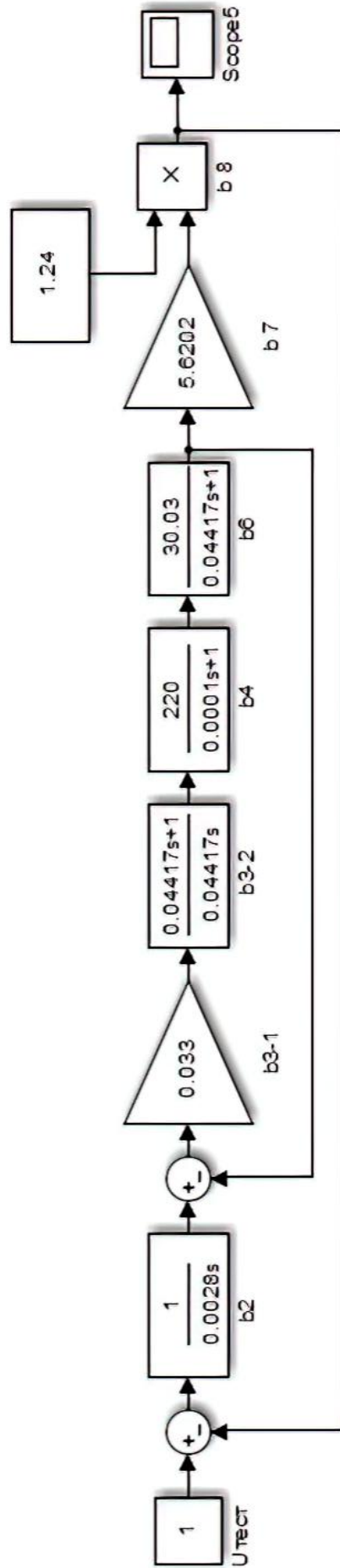


Рис.2.13 – Структурна схема спрощеного контура моменту



a)



б)

Рис. 2.14 – Структурні схеми контуру моменту с розрахованими параметрами: а) спрощена, б) реальна

Для аналізу рівня відмінностей перехідних функцій спрощеного та реального контурів моменту їхньої графіки представлені на рис. 15.

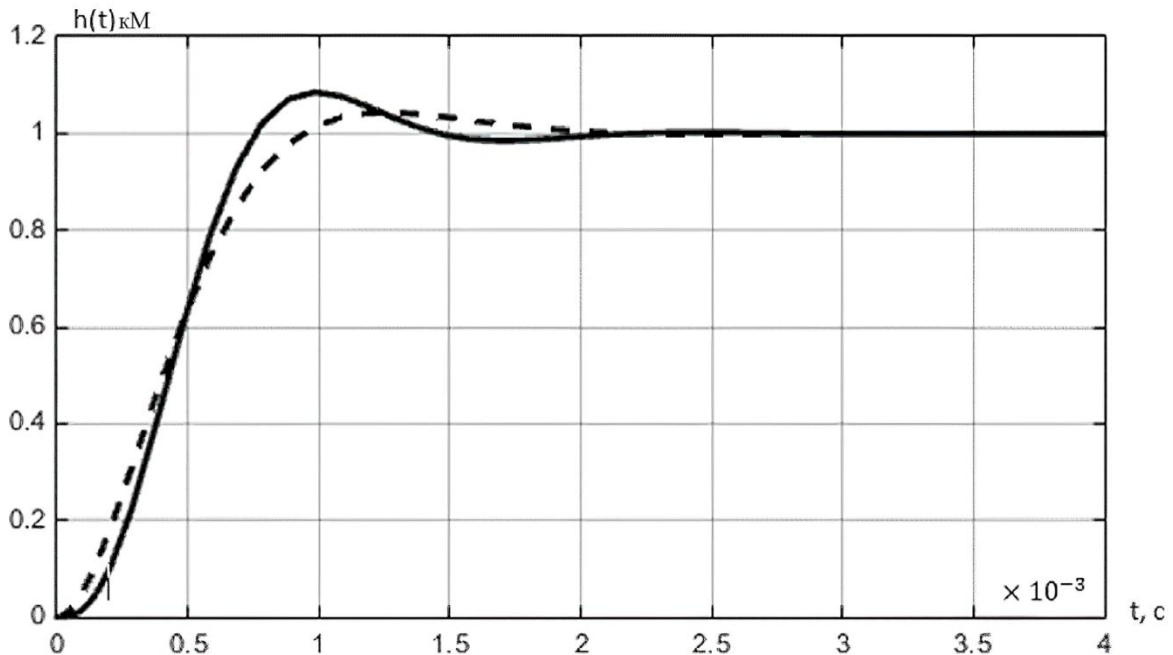


Рис. 2.15 – Графіки перехідних функцій контуру моменту: реального — суцільна лінія, спрощеного — штрихова лінія

Аналіз графіків перехідних функцій реального і спрощеного контурів моменту показує, що перехідна функція реального контуру моменту відповідає перехідній функції ідеально налаштованого на оптимум по модулю контуру. Однак реальний контур моменту стійкий та швидкодіючий.

2.3.4. Синтез регулятора контуру швидкості

Структурна схема реального контуру швидкості при заміні контуру струму аперіодичним ланкою другого порядку наведено на рис. 2.16. Контур швидкості є зовнішнім контуром, тому доцільно його налаштовувати на симетричний оптимум. Це дозволяє при виникненні впливу, що обурює, по моменту виключити помилку по швидкості, тобто зробити її рівною нулю.

Внутрішній контур моменту замінюється на аперіодичну ланку першого порядку з постійного часу $T = 4 \cdot T_{\mu}$. У такому випадку об'єкт управління в контурі швидкості буде виглядати як послідовно з'єднані інтегральне та аперіодичне ланка першого порядку. Структурна схема спрощеного контуру швидкості представлена на рис. 2.17.

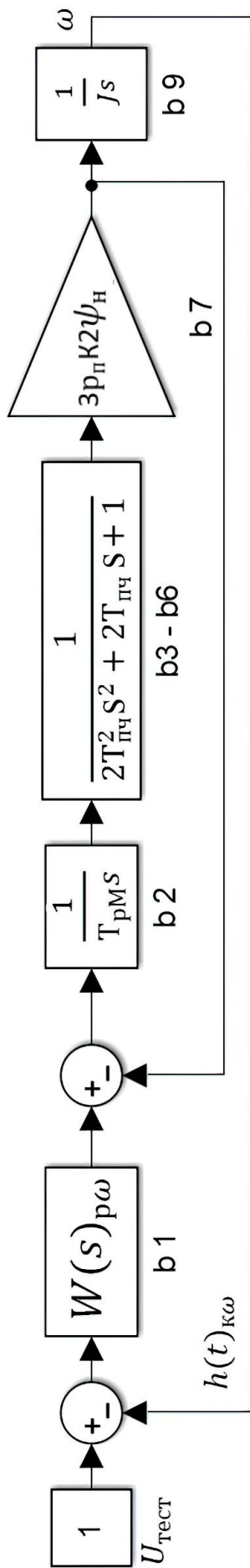


Рис. 2.16 – Структурна схема реального контуру швидкості

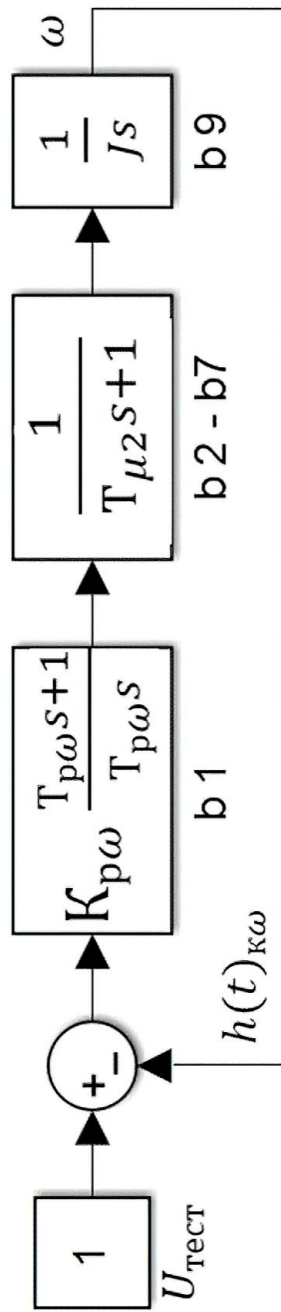
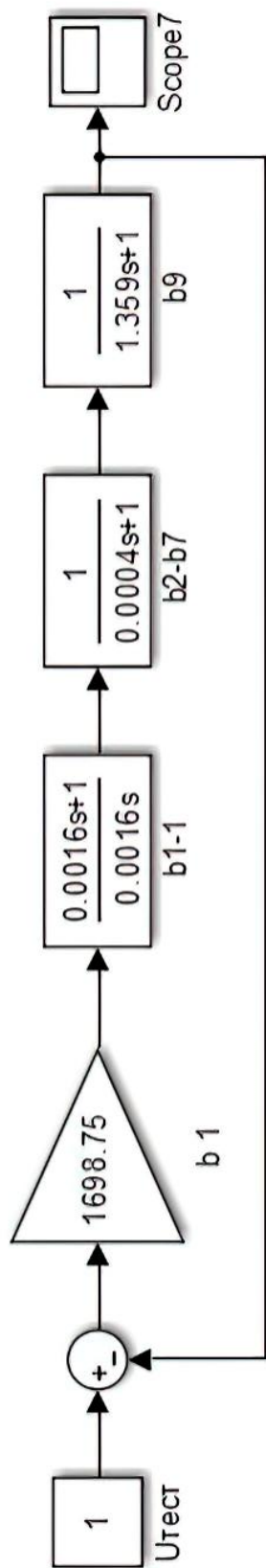
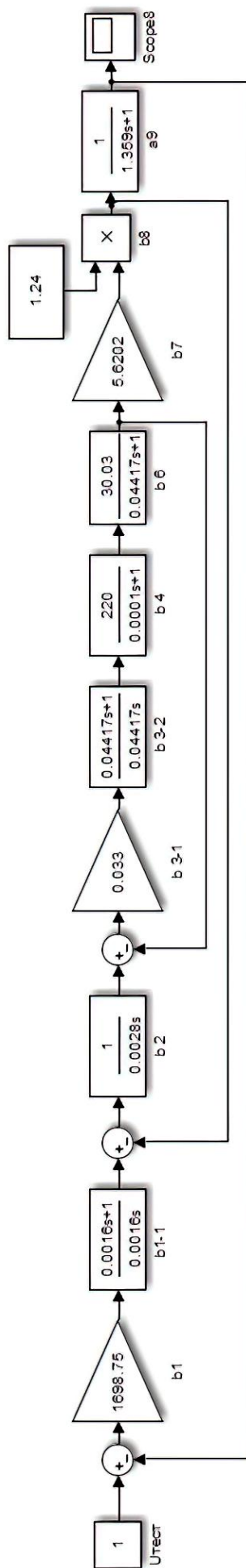


Рис. 2.17 – Структурна схема спрощеного контуру швидкості



a)



б)

Рис. 2.18 – Структурні схеми контуру швидкості з розрахунковими параметрами: а) спрощена, б) реальна

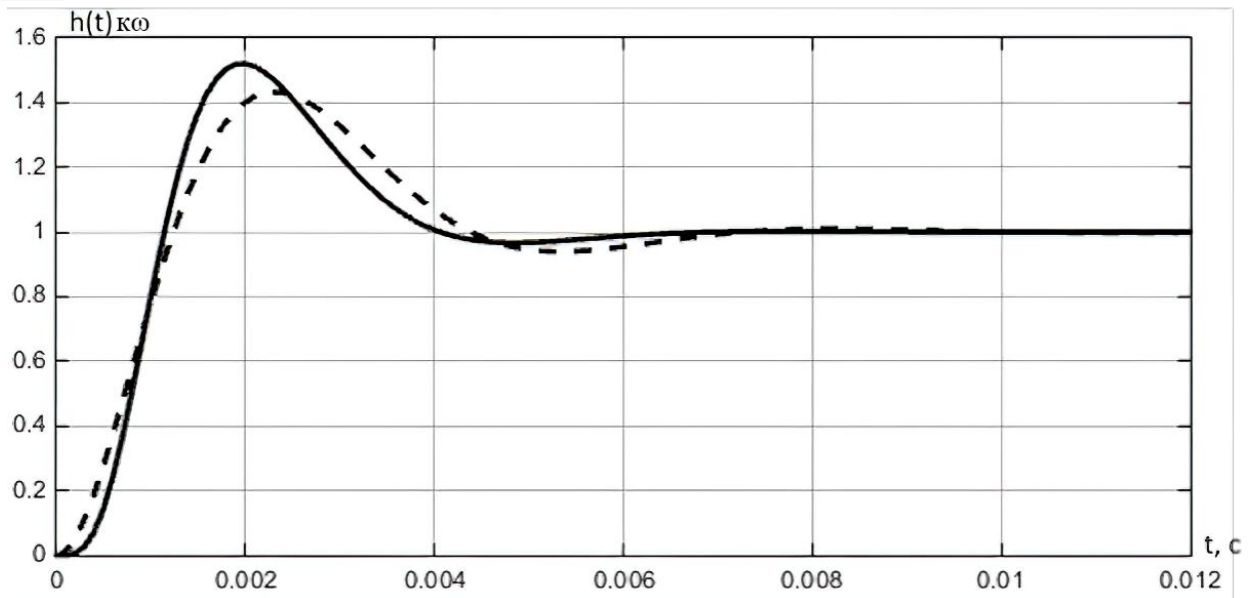


Рис. 2.19 – Графіки перехідних функцій контуру швидкості: суцільна лінія — реального контуру, штрихова лінія — спрощеного контуру

Як регулятор слід використовувати ПІ — регулятор. Динамічний коефіцієнт посилення розраховується за формулою

$$K_{p\omega} = \frac{J}{2 \cdot 4 \cdot T_{\mu} \cdot K_{d\omega}} = \frac{1,359}{2 \cdot 4 \cdot 0,0001 \cdot 1} = 1698675$$

Стала часу регулятора розраховується за

$$T_{p\omega} = 4 \cdot 4 \cdot T_{пч} = 0,0016 \text{ с.}$$


Структурні схеми спрощеного та реального контурів швидкості надані на рис. 2.18.

Для визначення рівня ідентичності спрощеного та реального контурів швидкості на рис. 2.19 наведено графіки їх перехідних функцій

Зображені на рис. 2.19 перехідні функції мають практично рівні швидкодії та перерегулювання. Тому, можна припустити, що заміна структурної схеми, зображеної рисунку 2.18,б, на спрощену структурну схему у складніших структурних схемах електроприводів не внесе значних помилок у результати аналізу працездатності цих приводів.

При досить високій точності стабілізації поточозчеплення структурну схему, зображену на рис. 2.3 можна замінити на структурну схему, зображену на рис. 2.18 (структурна схема аналогічна структурної схеми САР швидкості з двигуном постійного струму з незалежним збудженням).

Для перевірки правильності цього твердження потрібно провести порівняльний аналіз графіків перехідних процесів швидкостей і моментів при пуску електроприводу, при його роботі на холостому ході та при



відпрацюванні збурювального впливу по моменту опору механізму реальної та спрощеної структурних схем.

З метою полегшення процедури порівняльного аналізу реальна структурна схема асинхронного електроприводу з векторним управлінням зі стабілізацією потокозчеплення ротора і спрощена, аналогічна структурній схемі автоматизованого електроприводу постійного струму з двигуном з незалежним збудженням з розрахованими параметрами, одночасно наведені на рис. 2.20.

На рис. 2.21 та 2.22 в одних осях представлені результати моделювання за структурними схемами, наведеними на рис. 2.20.

Усі три графіки на рис. 21 практично злилися воєдино, що свідчить, по-перше, про практичну ідентичність двох моделей, по-друге, - про високу швидкодію контурів швидкості цих моделей (практично немає неузгодженості між графіком сигналу завдання і графіком швидкості).

Аналіз графіків, поданих на рис. 2.22, дозволяє зробити висновок, що результати моделювання по моделям, що розглядаються, практично ідентичні. На відрізку часу від 0 до 20 секунд промодельований динамічний момент, що розвивається двигуном при пуску (момент опору механізму при цьому задається рівним нулю). Відрізок часу від 20 до 25 секунд відповідає роботі приводу в режимі, що встановився на холостому ході. Починаючи з 25 секунд промодельований перехід двигуна від роботи на холостому ході до роботи з моментом опору рівним номінальному моменту двигуна. Короткочасний викид на графіку моменту пояснюється ступінчастим характером зміни моменту опору від нуля до значення, що відповідає номінальному значенню моменту двигуна.

Проведений аналіз графіків, зображених на рис. 2.21 і 2.22, підтверджує, що при застіблізованому потокозчепленні ротора, у багатьох практичних випадках при дослідженні динаміки асинхронного електроприводу з векторним управлінням зі стабілізацією потокозчеплення ротора можна використовувати структурну схему, аналогічну структурній схемі автоматизованого електроприводу постійного струму з двигуном незалежного двигуна.

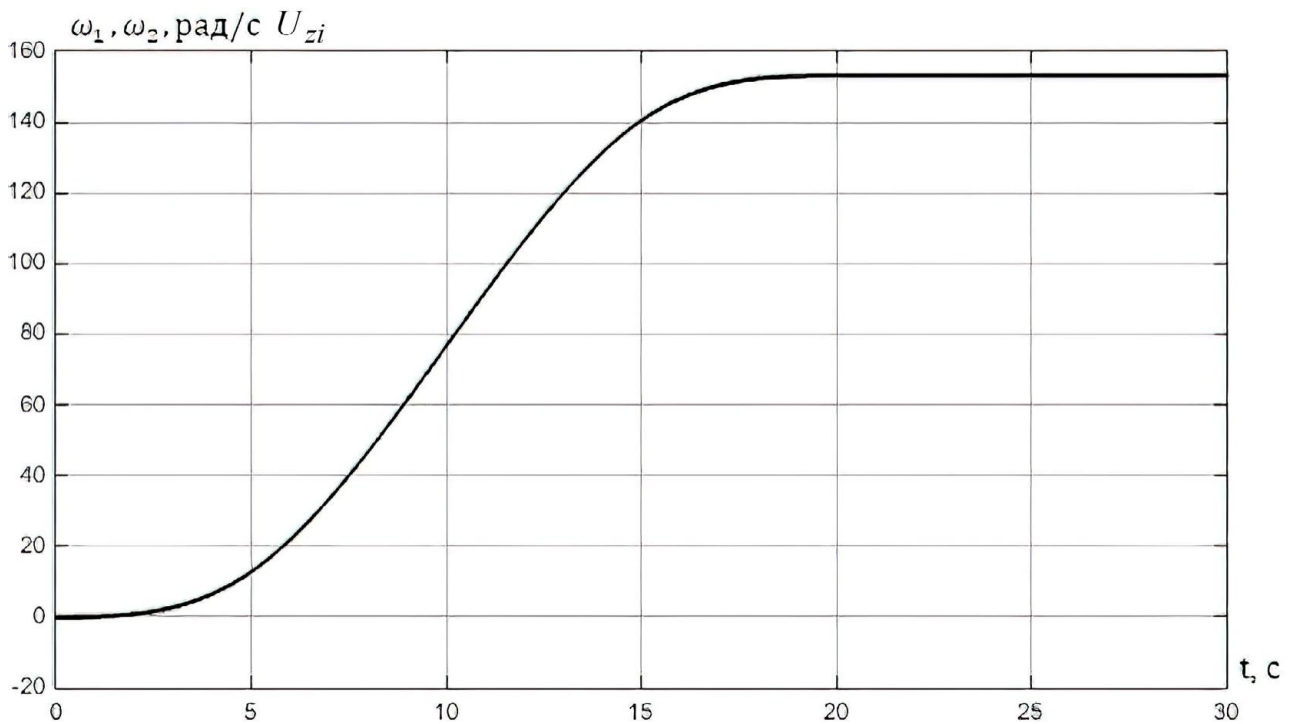


Рис.2.21 – Графіки сигналу завдання на швидкість та швидкості електроприводу за моделлю векторного приводу зі стабілізацією потокозчеплення ротора та за моделлю, аналогічної моделі приводу постійного струму с двигуном незалежного збудження

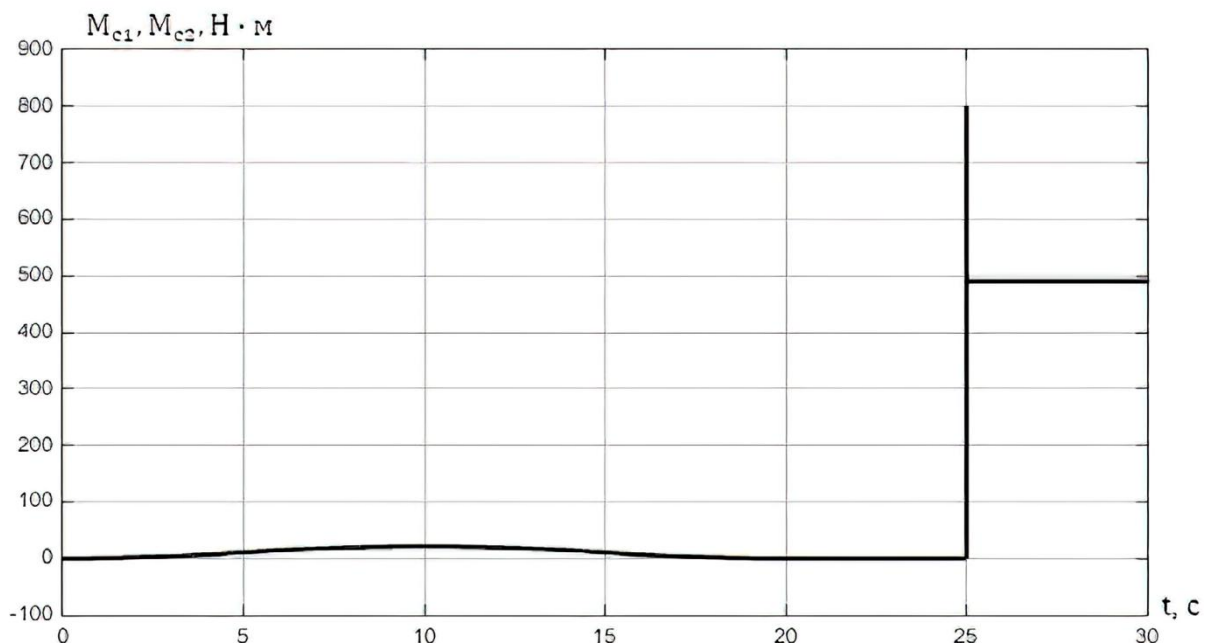



Рис. 22 – Графіки моменту, що розвивається двигуном, отримані за моделлю векторного приводу зі стабілізацією потокозчеплення ротора і за моделлю аналогічної моделі приводу постійного струму з двигуном незалежного збудження

2.4. Варіанти індивідуального другого завдання

Варіант	Тип двигуна	Номинальні параметри						Іп/Ін	Мп/Мн	Ммін/Мн	Мм/Мн	Маховий момент ротору, Нм
		Потужність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	Струм статора, А	ККД, %	Cos φ					
1	4A160S2Y3	15,0	380	2940	28,5	88,0	0,91	7,0	1,4	1,0	2,2	1,9
2	4A180M2Y3	30,0	380	2945	56,0	90,5	0,90	7,5	1,4	1,1	2,5	3,4
3	4A200L2Y3	45,0	380	2945	83,8	91,0	0,90	7,5	1,4	1,0	2,5	6,7
4	4A200S2Y3	75	380	2960	140,0	91,0	0,89	7,5	1,2	1,0	2,5	18,6
5	4A200M2Y3	90,0	380	2960	165	92,0	0,9	7,5	1,2	1,0	2,5	20,8
6	4A160S4Y3	15,0	380	1465	29,3	88,5	0,88	7,0	1,4	1,0	2,3	4,1
7	4A180M4Y3	30,0	380	1470	56,0	91,0	0,89	6,5	1,4	1,0	2,3	9,3
8	4A200L4Y3	45,0	380	1475	82,6	92,0	0,90	7,0	1,4	1,0	2,5	17,8
9	4A200S4Y3	75	380	1480	136	93,0	0,9	7,0	1,2	1,0	2,3	40,8
10	4A200M4Y3	90	380	1480	162	93,0	0,91	7,0	1,2	1,0	2,3	46,7
11	4A160S6Y3	15,0	380	975	30,0	87,5	0,87	6,0	1,2	1,0	2,0	7,3
12	4A180M6Y3	30,0	380	980	56,0	90,5	0,90	6,5	1,3	1,0	2,4	18,1
13	4A200L6Y3	45,0	380	985	84,0	91,5	0,89	6,5	1,2	1,0	2,1	46,8
14	4A200S6Y3	75,0	380	985	139	92,0	0,89	5,5	1,4	1,2	2,2	117
15	4A200M6Y3	90,0	380	985	165	92,5	0,89	5,5	1,4	1,2	2,2	135

2.5. Питання для самоперевірки

1. Що таке асинхронний електропривод і де його застосовують?
2. У чому полягає принцип роботи асинхронного двигуна?
3. Які основні переваги асинхронного двигуна порівняно з іншими типами електродвигунів?
4. Які режими роботи враховуються при проектуванні приводу?
5. Що таке векторне управління асинхронним двигуном?
6. У чому полягає різниця між скалярним і векторним управлінням?
7. Яку роль відіграє орієнтація на магнітний потік ротора у векторному управлінні?



8. Які координатні перетворення використовуються у векторному керуванні (наприклад, Clarke, Park)?

9. Які вихідні дані необхідні для синтезу приводу з векторним управлінням?

10. Як визначається параметр потоку збудження при векторному управлінні?

11. Як обчислюються струми у координатах **d-q**?

12. Як визначаються параметри регуляторів струму та швидкості?

13. Як впливає момент інерції навантаження на динаміку приводу?

14. Які основні блоки містить система векторного управління?

15. Яка функція ПІ-регуляторів у структурі системи?

16. Як реалізується зворотний зв'язок у системі?

17. Які датчики зазвичай застосовують у системі векторного управління?

18. Які параметри аналізуються при моделюванні системи приводу?

19. Як оцінити стійкість і якість перехідних процесів у системі?

20. Як зміниться поведінка приводу при варіації навантаження?

21. Які методи покращення динаміки приводу використовуються?

22. У яких сферах доцільне застосування векторного керування?

23. Які типові помилки виникають при синтезі системи приводу?

24. Як впливає якість параметрів двигуна на ефективність управління?

Навчально-методичне видання

Віктор Сергійович Хілов

**МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ**

методичні вказівки до виконання індивідуальних
завдань

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції