

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ
з дисципліни «Системи керування електроприводами»
для студентів напряму підготовки
6.050702 «Електромеханіка»
денної та заочної форм навчання

Покровськ - 2018

Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Системи керування електроприводами» для студентів напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка» денної та заочної форм навчання / уклад. О.Ю. Колларов, Д.О. Кардаш. – Покровськ : ДонНТУ, 2018. – 56 с.

Приведено завдання до виконання курсового проекту з курсу „Системи керування електроприводами”, яке охоплює 30 варіантів, що відрізняються один від одного структурою системи керування електроприводом постійного струму, яка проектується; вимогами, що висуваються до системи; основною регульованою координатою (швидкість чи положення); кількістю приводних двигунів (один або два).

Сформульовано основні вимоги до оформлення окремих елементів пояснювальної записки і графічної частини курсового проекту.

Викладено методичні рекомендації до виконання окремих розділів проекту, які містять бажану послідовність виконання, деякі теоретичні відомості, методики розрахунку та довідкову інформацію. Зазначені відомості мають використовуватися студентами під час самостійної роботи і при роботі над курсовим проектом.

Укладачі: Колларов О.Ю., зав. кафедри «Електрична інженерія»
Кардаш Д.О., ас. кафедри «Електрична інженерія»

Рецензент: Зінов'єв С.М., доц. кафедри «Електрична інженерія»

Відповідальний за випуск: Колларов О.Ю., зав. каф. «Електрична інженерія»

Затверджено навчально-методичним відділом ДонНТУ,
протокол №14 від 12.06.2018 р.

Розглянуто на засіданні кафедри електричної інженерії,
протокол №14 від 23.05.2018 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ЗАВДАННЯ ДО КУРСОВОГО ПРОЕКТУ	6
2 ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ ТА ВМІСТУ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	11
3 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ОКРЕМИХ РОЗДІЛІВ ОСНОВНОЇ ЧАСТИНИ.....	13
ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	43
ДОДАТКИ.....	49

ВСТУП

Для сучасного промислового виробництва характерним є широке впровадження автоматизованого електропривода (ЕП) – основи механізації і автоматизації технологічного процесу. Удосконалення систем автоматизованого ЕП із використанням новітніх досягнень науки і техніки є однією з обов'язкових умов при вирішенні задач підвищення ефективності виробництва і продуктивності праці, а також покращення якості продукції, що випускається.

Серед основних причин, що обумовлюють необхідність застосування регульованих ЕП для промислових установок, в першу чергу слід вказати на такі:

- підвищення експлуатаційного коефіцієнта корисної дії (к.к.д.) агрегату;
- покращення якості продукції за рахунок оптимізації технологічного процесу;
- перехід до комплексної або повної автоматизації виробничих процесів та ін.

Необхідність поглибленого вивчення курсу "Системи керування електроприводами" (СКЕП) студентами спеціальності «Електромеханічні системи автоматизації і електропривод» спричинено тим різноманіттям задач, з якими доводиться мати справу інженеру-електромеханіку у своїй практичній діяльності. У зв'язку з цим навчальними планами зазначеної спеціальності за курсом СКЕП передбачається виконання курсового проекту, який дає певні навички у вирішенні прикладних задач в одній з найважливіших галузей сучасної техніки.

З урахуванням структури курсу СКЕП, в курсовому проекті передбачається проектування систем автоматичного регулювання (САР) електропривода на базі двигунів постійного струму, застосування яких у вітчизняній промисловості у теперішній час є переважним, до того ж дана обставина найближчі роки також буде спостерігатися.

Досить поширена на практиці аналогова реалізація (повна або часткова) САР, в основі якої лежить застосування спеціальних інтегральних мікросхем – операційних підсилювачів (ОП). Вітчизняною промисловістю випускаються ОП серій К140УД, К153УД, К533УД, К574УД та багато інших.

Отже, метою проекту є закріплення і систематизація знань студентів з курсу СКЕП через самостійне (під контролем викладача – керівника курсового проекту) рішення комплексних задач проектування САР вихідної координати (швидкості або положення) ЕП постійного струму за заданими технологічними вимогами.

Під час виконання курсового проекту студент повинен комплексно застосовувати знання, отримані при вивченні відповідних розділів дисципліни СКЕП, а також знання і навички, які було отримано ним при вивченні інших дисциплін, крім того, отримати необхідні навички у користуванні технічною і довідковою літературою.

В результаті виконання курсового проекту студентом складається пояснювальна записка обсягом машинописного тексту до 40 аркушів формату А4 (210х297 мм) і 2 аркуші графічної частини формату А1 (594х841 мм).

Пояснювальна записка до курсового проекту має складатися з таких частин:

- ввідна частина – титульний аркуш, завдання і календарний план виконання курсового проекту, реферат, зміст, перелік умовних позначень і скорочень;
- основна частина – вступ, сутність проекту, висновки, перелік посилань;
- додатки (за необхідністю).

У графічній частині на першому аркуші представляється повна принципова електрична схема розробленої системи ЕП, на другому – схема з'єднань і структурна схема об'єкта.

1 ЗАВДАННЯ ДО КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

У відповідності з наданим варіантом початкових даних до курсового проекту (номер варіанта повідомляється викладачем – керівником курсового проекту особисто студентові при видачі завдання на курсовий проект) спроектувати САР швидкості (варіанти 1 – 22) або положення (варіанти 23 – 30) тиристорного ЕП постійного струму з двигуном незалежного збудження, яка задовольнятиме вимогам, вказаним у табл.1.1 або 1.2 відповідно. Рішення задачі проектування САР виконати за такою послідовністю:

1. Розробити функціональну схему системи ЕП, що проектується, і дати її характеристику;
2. Розрахувати статичні і динамічні параметри об'єкта регулювання;
3. Синтезувати регулятори та інші вузли САР;
4. Виконати дослідження роботи синтезованої системи регулювання у типових режимах за допомогою перевірочних розрахунків і математичного моделювання;
5. Розробити принципову схему САР і схему з'єднань.

До пояснювальної записки внести розрахунки і короткі пояснення до всіх етапів проектування в порядку їхнього виконання, зробити висновки по результатах проектування із короткою характеристикою системи, її особливостей в роботі і налаштуванні. Застосовані методи розрахунку і формули повинні мати посилання на застосовану літературу, що її перелік наводиться наприкінці записки.

Оформлення пояснювальної записки та аркушів графічної частини виконати у відповідності до вимог стандарту [1].

Таблиця 1.1 – Вихідні дані до проектування систем регулювання швидкості

№ варіанту	Тип системи керування	Керування за колом	Двигун				Кількість двигунів	Діапазон регулювання швидкості	Припустима статична помилка при $\omega = \omega_{min}$ і $M = M_C$ (у долях швидкості ідеального х.х.)	Струм упора (у долях номінального струму якоря)	Умови розгону (гальмування)		Момент інерції механізму (по відношенню до моменту інерції двигуна)	Основний зворотний зв'язок за координатою			
			Тип	Номінальні дані							Момент статичного навантаження (у долях номінального моменту)	Струм якоря двигуна (у долях номінального струму якоря двигуна)					
				Потужність	Напруга	Частота обертання											
															P_H	U_H	n_H
															кВт	В	об/хв.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
1	однозонна (з реверсом за струмом якоря)	якоря	П152-5К	320	440	400	2	1:20	5	2,5	1,0	2,0	0,8	e			
2	однозонна (в другій зоні)	збудження	П142-4К	160	440	400	1	1:3	-	1,8	0,8	1,5	1,0	ω			
3	двозонна (із залежним керуванням)	якоря і збудження	ПБК250/145	3320	700	50	1	1:10 1:2	10	2,0	1,0	1,8	1,5	ω			
4	однозонна (з реверсом за струмом якоря)	якоря	П81	32	220	1500	2	1:20	5	2,2	0,9	1,5	1,0	ω			
5	однозонна (з реверсом за збудженням)	якоря і збудження	ПБК120/45	880	800	400	1	1:5	15	2,0	0,8	1,8	1,4	ω			

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
6	двотонна (із роздільним керуванням)	якоря і збудження	ПБК120/70	1600	750	400	1	1:20 1:2	10	1,8	0,8	1,6	1,5	<i>e</i>
7	однотонна (в другій зоні)	збудження	ПБК285/95	2950	900	60	1	1:2	-	2,0	1,0	0,9	2,0	<i>ω</i>
8	двотонна (із залежним керуванням)	якоря і збудження	П152-5К	320	440	400	1	1:10 1:2	-	2,0	0,9	1,8	1,5	<i>ω</i>
9	однотонна (з реверсом за збудженням)	якоря і збудження	ПБК120/70	1600	750	400	1	1:4	-	2,2	1,1	1,9	1,2	<i>ω</i>
10	однотонна (з реверсом за струмом якоря)	якоря	П131-4К	100	440	500	2	1:15	4	2,0	0,8	1,7	0,8	<i>u</i>
11	однотонна (в другій зоні)	збудження	ПБК120/45	880	800	400	1	1:2	5	2,0	0,7	1,6	2,0	<i>ω</i>
12	двотонна (із залежним керуванням)	якоря і збудження	П133-4К	125	440	400	1	1:8 1:3	10	2,5	1,0	2,0	1,5	<i>ω</i>
13	однотонна (з реверсом за збудженням)	якоря і збудження	ПБК285/95	2950	900	60	1	1:4	-	2,2	0,8	1,5	0,8	<i>ω</i>
14	однотонна (з реверсом за струмом якоря)	якоря	П72	25	220	1500	2	1:40	-	2,0	0,7	1,8	0,9	<i>ω</i>
15	двотонна (із роздільним керуванням)	якоря і збудження	П133-4К	125	440	400	1	1:5 1:3	-	2,0	0,6	1,8	1,0	<i>e</i>
16	однотонна (з реверсом за струмом якоря)	якоря	ПБК250/145	3320	700	50	1	1:10	5	2,5	1,2	2,2	1,5	<i>u</i>

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
17	однозонна (в другій зоні)	збудження	П132-6К	100	220	400	1	1:3	5	2,0	0,8	1,9	1,0	ω
18	двозонна (із залежним керуванням)	якоря і збудження	П142-4К	160	440	400	1	1:10 1:3	5	2,2	0,9	2,0	0,8	ω
19	однозонна (з реверсом за струмом якоря)	якоря	П92	42	220	1000	1	1:100	2	2,0	0,8	1,9	0,5	ω
20	двозонна (із залежним керуванням)	якоря і збудження	П143-6К	160	220	300	1	1:5 1:2	5	2,0	0,7	1,8	0,7	ω
21	однозонна (з реверсом за струмом якоря)	якоря	ПБК120/70	1600	750	400	2	1:20	4	2,5	1,0	2,2	0,8	ω
22	двозонна (із роздільним керуванням)	якоря і збудження	П132-6К	100	220	400	1	1:10 1:2	5	2,2	0,7	2,0	0,6	e

Примітка. В стовпці 15 умовно позначена координата, за якою має організовуватись основний (зовнішній) зворотний зв'язок: швидкість (ω) при можливості встановлення тахогенератора, напруга на якірній обмотці (u) або ЕРС (e) двигуна при необхідності організації непрямого регулювання швидкості.

№ варіанту	Тип системи керування	Двигун				Кількість двигунів	Максимальне переміщення, що відпрацьовується	Струм упора (у долях номінального струму якоря)	Момент статичного навантаження (у долях номінального моменту)	Момент інерції механізму (по відношенню до моменту інерції двигуна)
		Тип	Номінальні дані							
			Потужність	Напруга	Частота обертання					
						N -	$\varphi_{\max}$ рад	I_{yn}/I_H -	M_C/M_H —	$J_{\text{мех}}/J_{\text{дв}}$ -
23	з лінійним регулятором положення	П72	10	220	750	1	10π	2,0	0,9	1,2
24	з параболічним регулятором положення	П81	32	220	1500	1	20π	1,8	0,8	1,5
25	із задатчиком положення	П101	100	220	1500	1	12π	2,2	1,0	0,8
26	з лінійним регулятором положення	П131-4К	100	440	500	2	40π	1,9	1,0	2,0
27	з параболічним регулятором положення	ДП-82	90	440	480	2	60	1,6	0,7	1,8
28	із задатчиком положення	ПБК120/45	880	800	400	1	35π	2,3	0,8	1,2
29	з лінійним регулятором положення	П112	125	220	1000	1	50π	1,9	1,0	0,7
30	з параболічним регулятором положення	П142-4К	200	440	500	1	30π	2,1	0,9	1,4

2 ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ ТА ВМІСТУ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

2.1 Титульний аркуш

Титульний аркуш є першою сторінкою пояснювальної записки і слугує основним носієм бібліографічної інформації, яка є необхідною для обробки і пошуку документів.

На титульному аркуші повинні бути вказані:

- повне найменування документа;
- номер варіанта;
- академічна група, прізвище та ініціали автора проекту;
- посада, прізвище та ініціали керівника проекту;
- місто та рік виконання.

Приклад правильного оформлення титульної сторінки наведено у додатку А.

2.2 Завдання на курсовий проект

Завдання на курсовий проект розміщується відразу після титульного аркуша і представляє собою документ, який визначає обсяг і порядок роботи у конкретному виконанні. Завдання на курсовий проект заповнюється студентом на стандартному бланку після отримання ним варіанту завдання.

Бланк завдання при нумерації сторінок рахується як одна сторінка пояснювальної записки, але не позначається.

2.3 Реферат

Реферат призначений для першого ознайомлення з курсовим проектом.

Він має бути лаконічним і інформативним і містити відомості, які дозволяють представити сутність курсового проекту. Реферат повинен містити:

- відомості про обсяг записки, кількість рисунків, таблиць, додатків, кількість джерел за переліком посилань;
- текст реферату;
- перелік ключових слів.
- текст реферату має відображати інформацію, що представлена у пояснювальній записці і, як правило, подається у такій послідовності:
 - об'єкт розробки;
 - мета роботи;
 - методи досліджень;

- результати проекту;
- основні очікувані техніко-експлуатаційні, конструктивні і технологічні характеристики;
- значимість роботи і короткі висновки.

Реферат слід виконувати в обсязі не більше 500 слів і розміщувати на одній сторінці формату А4. Ключові слова, які є суттєвими для розкриття сутності записки, формують на основі тексту реферату і розміщують після тексту реферату. Перелік ключових слів включає від 5 до 15 слів (словосполучень), зображених великими літерами в іменному відмінку у рядок, розділених комами.

2.4 Зміст

Зміст розміщують безпосередньо після реферату, починаючи з нової сторінки. Тут вказують розташування усіх елементів пояснювальної записки, що наводяться далі:

- скорочення та умовні позначки;
- вступу;
- всіх розділів, підрозділів, пунктів і підпунктів, в яких викладено сутність проекту;
- висновків;
- переліку джерел посилання;
- додатків.

2.5 Скорочення та умовні позначки

Він є обов'язковим елементом пояснювальної записки, але його наявність є рисою „доброго стилю” оформлення, оскільки значно полегшує сприйняття матеріалу особою, яка буде знайомитись із запискою.

У цьому переліку наводяться такі відомості:

- застосовані аббревіатури і їхнє розшифрування (в алфавітному порядку), наприклад:

САР – система автоматичного регулювання;

- літерні скорочення, які були застосовані автором при складанні записки, і їхнє розшифрування (в алфавітному порядку), наприклад:

к.к.д. – коефіцієнт корисної дії;

Для забезпечення лаконічності переліку рекомендується вносити в нього лише ті скорочення і позначення, які зустрічаються в тексті записки частіше, ніж 3 рази.

2.6 Правила оформлення пояснювальної записки.

2.6.1 Загальні положення

Символи в рівняннях і формулах, написи та пояснювальні дані на рисунках, схемах, графіках, діаграмах і в таблицях створюють і вводять у текст з використанням відповідних редакторів комп'ютерної програми.

Пояснювальну записку друкують шрифтом Times New Roman чорного кольору прямого накреслення через півтора міжрядкові інтервали кеглем 14.

Пояснювальну записку друкують з використанням комп'ютера та принтера на одному боці аркуша білого паперу формату А4.

Мова написання – українська.

Рекомендовані береги на сторінках пояснювальної записки: верхній і нижній – не менше ніж 20 мм, лівий – не менше ніж 25 мм, правий – не менше ніж 10 мм.

Окремі слова, формули, знаки можна вписувати в текст звіту чорним чорнилом(пастою).

Структурні елементи: «Реферат», «Зміст», «Скорочення та умовні позначки», «Вступ», «Висновки», «Перелік джерел посилання», — не нумерують, а їхні назви є заголовками структурних елементів.

Для розділів і підрозділів наявність заголовка обов'язкова. Пункти й підпункти можуть мати заголовки.

Заголовки структурних елементів звіту та заголовки розділів треба друкувати без абзацного відступу великими літерами напівжирним шрифтом без крапки в кінці та розміщувати їх посередині рядка.

Заголовки підрозділів, пунктів і підпунктів звіту потрібно друкувати з абзацного відступу з великої літери без крапки в кінці.

Розривати слова знаком переносу в заголовках заборонено.

Абзацний відступ має бути однаковий упродовж усього тексту звіту й дорівнювати 1,25 см.

Відстань між заголовком, приміткою, прикладом і подальшим або попереднім текстом має бути не менше ніж два рядки.

Відстань між основами рядків заголовка, а також між двома заголовками приймають такою, як у тексті звіту.

Не дозволено розміщувати назву розділу, підрозділу, а також пункту та підпункту на останньому рядку сторінки.

2.6.2 Нумерація сторінок

Сторінки звіту нумерують наскрізно арабськими цифрами, охоплюючи додатки. Номер сторінки проставляють праворуч у верхньому куті сторінки без крапки в кінці, шрифтом Times New Roman 14 кегль. Титульний аркуш входить до загальної нумерації сторінок звіту, але номер сторінки на титульному аркуші не проставляють.

2.6.3 Нумерація розділів, підрозділів, пунктів, підпунктів

Розділи, підрозділи, пункти, підпункти нумерують арабськими цифрами.

Розділи звіту нумерують у межах викладення суті звіту і позначають арабськими цифрами без крапки, починаючи з цифри «1».

Підрозділи як складові частини розділу нумерують у межах кожного розділу окремо. Номер підрозділу складається з номера відповідного розділу та номера підрозділу, відокремлених крапкою. Після номера підрозділу крапку не ставлять, наприклад, 1.1, 1.2 тощо.

Пункти нумерують арабськими цифрами в межах кожного розділу або підрозділу. Номер пункту складається з номера розділу та порядкового номера пункту, або з номера розділу, порядкового номера підрозділу та порядкового номера пункту, які відокремлюють крапкою. Після номера пункту крапку не ставлять, наприклад, 1.1, 1.2 або 1.1.1, 1.1.2 тощо.

2.6.4 Рисунки

Усі графічні матеріали звіту (ескізи, діаграми, графіки, схеми, фотографії, рисунки, кресленики тощо) повинні мати однаковий підпис «Рисунок».

Рисунок подають одразу після тексту, де вперше посилаються на нього, або якнайближче до нього на наступній сторінці, а за потреби — в додатках до звіту.

Виконання рисунків має відповідати положенням ДСТУ 1.5.

Рисунки нумерують наскрізно арабськими цифрами в межах кожного розділу, крім рисунків у додатках. У цьому разі номер рисунка складається з номера розділу та порядкового номера рисунка в цьому розділі, які відокремлюють крапкою, наприклад, «Рисунок 3.2» — другий рисунок третього розділу. Рисунки кожного додатка нумерують окремо. Номер рисунка додатка складається з позначки додатка та порядкового номера рисунка в додатку, відокремлених крапкою. Наприклад, «Рисунок В.1 — _____ », тобто перший рисунок додатка В.

Якщо з тексту звіту зрозуміло зміст рисунка, його назву можна не наводити. Назву рисунка друкують з великої літери та розміщують під ним посередині рядка, наприклад, «Рисунок 2.1 — Схема устаткування».

2.6.5 Таблиці

Таблиці оформлюють відповідно до форми, поданої на рисунку 2.1.

Горизонтальні й вертикальні лінії, що розмежовують рядки таблиці, можна не наводити, якщо це не ускладнює користування таблицею.

Таблицю подають безпосередньо після тексту, у якому її згадано вперше, або на наступній сторінці. На кожну таблицю має бути посилання в тексті звіту із зазначенням її номера.

Таблиці треба заповнювати за правилами, які відповідають ДСТУ 1.5.

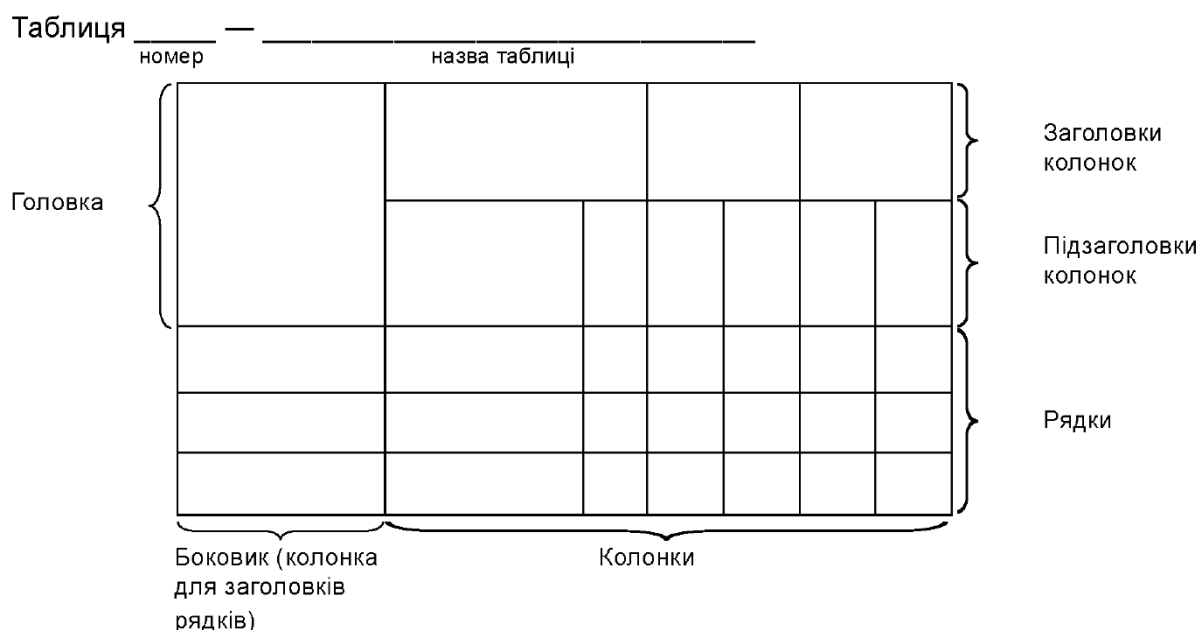


Рисунок 2.1

2.6.6 Формули

Пояснення познач, які входять до формули чи рівняння, треба подавати безпосередньо під формулою або рівнянням у тій послідовності, у якій їх наведено у формулі або рівнянні, без абзацного відступу з нового рядка,

починаючи зі слова «де» без двокрапки. Позначки, яким встановлюють визначення чи пояснення, рекомендовано вирівнювати у вертикальному напрямку.

Приклад оформлення математичної формули:

Дійсна ЕРС:

$$W_{\partial.e}(p) = \frac{U_{DE}(p)}{E_{\partial}(p)} = \frac{k_E}{T_{я\partial}p + 1}, \quad (3.28)$$

де k_E – коефіцієнт передачі датчика ЕРС;

$T_{я\partial}$ – стала часу його інерційності.

2.6.7 Додатки

Додатки позначають послідовно великими літерами української абетки, крім літер Г, Є, З, І, Ї, Й, О, Ч, Ъ, наприклад, ДОДАТОК А, ДОДАТОК Б.

2.6.8 Посилання

Посилання на джерело інформації, наведене в переліку джерел посилання, рекомендовано подавати так: номер у квадратних дужках, за яким це джерело зазначено в переліку джерел посилання, наприклад, «у роботах [2]—[3]».

У разі посилання на структурні елементи самої записки зазначають відповідно номери розділів, підрозділів, пунктів, підпунктів, позицій переліків, рисунків, формул, рівнянь, таблиць, додатків. Посилаючись, треба використовувати такі вирази: «у розділі 4», «див. 2.1», «відповідно до 2.3.4.1», «(рисунок 1.3)», «відповідно до таблиці 3.2», «згідно з формулою (3.1)», «у рівняннях (1.23)—(1.25)», «(додаток Г)» тощо.

Дозволено в посиланні використовувати загальноприйняті та застандартовані скорочення згідно з ДСТУ 3582, наприклад, «згідно з рис. 10», «див. табл. 3.3» тощо. Посилаючись на позицію переліку, треба зазначити номер структурного елемента звіту та номер позиції переліку з круглою дужкою, відокремлені комою. Якщо переліки мають кілька рівнів — їх зазначають, наприклад: «відповідно до 2.3.4.1, б), 2)».

3 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ОКРЕМИХ РОЗДІЛІВ ОСНОВНОЇ ЧАСТИНИ

3.1 Загальні положення про виконання курсового проекту

Курсовий проект виконується у відповідності до завдання на проектування (*варіант завдання узгоджується особисто із викладачем – керівником курсового проекту*) і присвячений розробці системи тиристорного ЕП постійного струму із підпорядкованим регулюванням координат. В залежності від варіанту завдання система має забезпечувати:

- стабілізацію швидкості двигуна із заданою точністю (варіанти 1 – 22) – помилка регулювання швидкості при діапазоні регулювання D і завданні на мінімальну швидкість при дії статичного навантаження M_C не має перевищувати значення, вказаного у завданні (табл.1.1);
- відпрацьовування заданого максимального переміщення $\varphi_{\max}$ і всіх менших переміщень (варіанти 23 – 30) без перерегулювань і дотягувань при дії статичного навантаження M_C (табл.1.2).

Для САР швидкості (табл.1.1) додатково вказується спосіб керування ЕП (однозонний з реверсом за струмом якоря, двозонний залежний і т.д.), а також оордината, за якою організується основний (зовнішній) зворотний зв'язок – швидкість (ω) в системах з тахогенератором, напруга на якірній обмотці (u) або ЕРС якоря (e) двигуна в системах непрямого регулювання швидкості.

Для САР положення (табл.1.2) вважається, що керування організується за колом якоря, а швидкість вимірюється за допомогою тахогенератора, і додатково вказується різновид системи – з лінійним або параболічним регулятором положення або із задатчиком положення.

Система регулювання (як швидкості, так і положення) має забезпечувати обмеження струму якоря на заданому рівні I_{yn} .

Основні положення по проектуванню і синтезу систем підпорядкованого регулювання викладені у лекційному матеріалі [2] з розділу «Системи керування електроприводами постійного струму». Додаткові відомості можуть бути отримані студентами самостійно, зокрема, з літератури [3 – 18].

3.2 Вступ

Вступ призначений для короткого ознайомлення із сутністю курсового проекту, і має відображати такі моменти:

- мета проекту;
- актуальність проекту, зокрема освітлення механізмів і галузей використання системи ЕП, яка буде розроблятися в проекті;
- короткий порядок рішення, задачі проектування;
- очікувані результати курсового проекту.
- Рекомендований обсяг вступу – 1-2 стор.

3.3 Функціональна схема системи керування електроприводом

У відповідності до заданого варіанту вихідних даних (табл.1.1 і табл.1.2) і вказаних вимог до системи ЕП, що проектується, зображується її функціональна схема. Одночасно слід надати необхідні пояснення про призначення окремих елементів та вузлів системи, а також їхню взаємодію.

Рекомендується особливу увагу звернути на такі моменти:

- необхідний склад силовій частини ЕП із виділенням приладів, призначених для вимірювання конкретних регульованих координат;
- необхідний склад вимірювально-перетворювальної частини, елементи якої забезпечують як отримання потрібних координат (наприклад, ЕРС, магнітний потік), так і узгодження рівня сигналів силовій частини із рівнями відповідних сигналів зворотних зв'язків, що заводяться до САР;
- кількість зворотних зв'язків, що застосовуються в САР, і відповідні найменування регуляторів;
- склад елементів, що беруть участь у формуванні задаючих впливів;
- розкрити взаємозв'язок різних елементів у відповідності із застосованим принципом регулювання.

Рекомендований обсяг розділу – 2-4 стор.

3.4 Розрахунок параметрів об'єкта регулювання

В розділі наводяться результати аналізу даних двигуна, вибору тиристорного перетворювача і розрахунку параметрів об'єкта регулювання.

3.4.1 Аналіз даних двигуна

За вказаними у завданні типом та основними номінальними даними двигуна з довідникової літератури [12 – 14] мають бути виписані обмоткові дані машини, номінальні значення струмів обмоток, електромагнітного моменту, а також

максимально припустимо перевантаження за струмом або моментом, момент інерції двигуна і т.ін.

Активний опір кола якоря двигуна розраховується за формулою:

$$R_{\text{я}} = R_{\text{оя}} + R_{\text{оп}} + R_{\text{ко}}, \text{ Ом} \quad (3.1)$$

де $R_{\text{оя}}$ – активний опір власно обмотки якоря;

$R_{\text{оп}}$ – активний опір обмотки додаткових полюсів;

$R_{\text{ко}}$ – активний опір компенсаційної обмотки (за наявності).

Значення активних опорів обмоток у довідниках звичайно дають для деякої нормованої температури навколишнього середовища $\theta_{\text{хол}}$ (звичайно $\theta_{\text{хол}} = 20^\circ\text{C}$). Для подальших розрахунків її слід привести до робочої температури $\theta_{\text{нагр}}$ (звичайно для механізмів металургійної промисловості $\theta_{\text{нагр}} = 75^\circ\text{C}$) за такою формулою:

$$R_{\text{нагр}} = R_{\text{хол}} \left[1 + \alpha_T (\theta_{\text{нагр}} - \theta_{\text{хол}}) \right], \text{ Ом} \quad (3.2)$$

де α_T – температурний коефіцієнт, величина якого залежить від матеріалу; для обмоток електричних машин, які виконуються з міді або алюмінію, значення цього коефіцієнту приблизно становить $\approx 0,004 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Далі виконується розрахунок індуктивностей обмоток машини.

В проектній практиці розрахунок величини індуктивності якоря двигуна здійснюють за емпіричною формулою [3]:

$$L_{\text{я}} = k \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{ян}} p \omega_{\text{н}}}, \quad \text{Гн} \quad (3.3)$$

де k – конструктивний коефіцієнт; для компенсованих машин приймають $k = 0,10 \text{K } 0,25$, для некомпенсованих – $k = 0,5 \text{K } 0,6$;

$U_{\text{н}}$ – номінальна напруга на якорі двигуна, В;

$I_{\text{ян}}$ – номінальний струм обмотки якоря, А;

p – кількість пар головних полюсів;

$\omega_{\text{н}}$ – номінальна частота обертання якоря, рад/с:

$$\omega_{\text{н}} = \pi n_{\text{н}} / 30, \quad (3.4)$$

де значення $n_{\text{н}}$ в об/хв береться з каталогових даних двигуна.

Для визначення індуктивності обмотки збудження в практичних розрахунках застосовують формулу, згідно з якою сумарна індуктивність обмотки збудження обчислюється як сума індуктивності $L_{\text{м}}$ від головного магнітного потоку і індуктивності L_{σ} від потоку розсіювання:

$$L_{зб} = L_m + L_\sigma = 2pw_n \frac{\Phi_H + \Phi_{\sigma H}}{I_{зб.H}} \quad (3.5)$$

де w_n – кількість витків обмотки збудження на полюс;

Φ_H – номінальний магнітний потік, Вб;

$\Phi_{\sigma H}$ – потік розсіювання при номінальному струмі збудження, Вб;

$I_{зб.H}$ – номінальне значення струму збудження.

Значення номінального магнітного потоку Φ_H звичайно наводиться у даних обмоткової записки на двигун. У деяких випадках його можна розрахувати з достатнім ступенем точності за формулою [15]:

$$\Phi_H \approx \frac{60aE_H}{N_{Я}pn_H}, \quad (3.6)$$

де E_H – ЕРС двигуна при номінальному навантаженні, В:

$$E_H = U_H - R_{Я}I_{ЯH}; \quad (3.7)$$

$R_{Я}$ – активний опір обмотки якоря (у гарячому стані), Ом;

$2a$ – кількість паралельних гілок обмотки якоря, залежить від застосованого в двигуні типу обмотки якоря;

$N_{Я}$ – кількість ефективних провідників в обмотці якоря:

$$N_{Я} = \frac{2a\pi DA}{I_{ЯH}}; \quad (3.8)$$

D – діаметр якоря, мм; обирається при проектуванні двигуна в функції відносного параметру $\mu = (2h - 0,01 - D) / D$, який, в свою чергу, залежить від кількості головних полюсів p (рис.3.1) [15];

h – висота осі обертання двигуна, м;

A – лінійне навантаження якоря, А/м; рекомендовані усереднені залежності лінійного навантаження в функції діаметру якоря, які застосовуються при проектуванні машин постійного струму [15], наведені на рис.3.2.

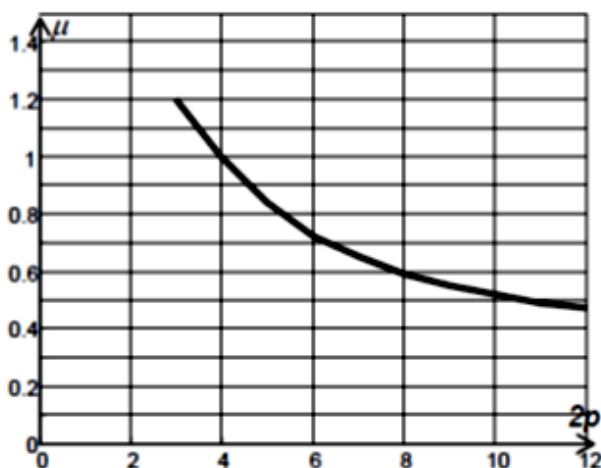


Рисунок 3.1

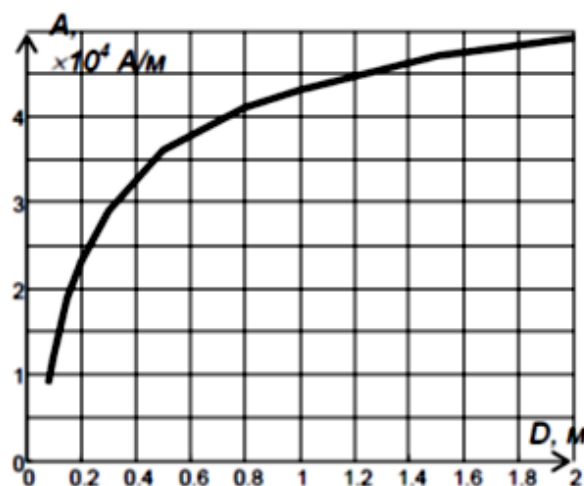


Рисунок 3.2

Значення потоку розсіяння $\Phi_{\sigma H}$ орієнтовно складає:

$$\Phi_{\sigma H} = \sigma \Phi_H / (1 + \sigma), \text{Вб}, \quad (3.9)$$

де $\sigma = 0,05$ К 0,18 – коефіцієнт розсіяння;

3.4.2 Вибір тиристорного перетворювача і розрахунок його параметрів

За довідником [16] до наявного двигуна обирається потрібний тиристорний перетворювач (ТП) з елементами захисту і комутації, а також живильний силовий трансформатор та, якщо це є потрібним, струмообмежувальний реактор, і розраховуються параметри ТП, приведені до кола протікання спрямованого струму.

3.4.2.1 Вибір тиристорного перетворювача

В якості вихідних даних застосовуються вид системи регулювання [керування по колу якоря або (та) по колу збудження, реверс за колом якоря або за колом збудження] та номінальні значення напруги двигуна U_H , струму якоря I_H , напруги $U_{зб.H}$ та струму $I_{зб.H}$ обмотки збудження. Вибір ТП (комплектного електропривода) полягає у виборі:

- номінальної напруги електропривода, яка обирається з умови $U_{dH} = U_H$, фактична припустима напруга електропривода є на 5К 10% більшою, що забезпечує необхідний запас на регулювання;
- номінального струму електропривода $I_{d.H}$, який має бути рівним або перевищувати максимальний струм двигуна у перехідних режимах, для

двودвигунних ЕП струм $I_{d.H}$ обирається в залежності від сумарного струму двигунів;

- збудника, що входить до складу комплектного ЕП, має забезпечувати живлення обмотки збудження напругою $U_{зб.H}$ і струмом $I_{зб.H}$ при керуванні по колу якоря, при керуванні по колу збудження у разі необхідності має забезпечуватися потрібне форсування збудження у перехідних режимах.

На підставі вихідних даних за даними довідника [16] виконується вибір ТП (комплектного електропривода), в результаті якого записується його тип (наприклад, КТЭУ-25/220-13212-УХЛ4) і розшифрування типу.

Далі зображується і аналізується силова частина ЕП [16] – виконується опис усіх елементів, що входять до неї. Особливу увагу слід звернути на наявність пристроїв, що дозволяють виміряти регульовані координати, а також можливість заведення відповідних сигналів до системи керування.

За матеріалами довідника [16] виконується вибір мережевого силового трансформатора (або анодного реактора), а також комутаційної і захисної апаратури – автоматичних вимикачів, лінійних контакторів, рубильників). Виписуються типи приладів і їхні технічні характеристики, які оформлюються у вигляді таблиць. Якщо застосовується ТП із сумісним керуванням, виконується також вибір зрівнювального реактора.

3.4.2.2 Розрахунок параметрів тиристорного перетворювача

В результаті розрахунку визначаються активний опір $R_{ТП}$ і індуктивність $L_{ТП}$ перетворювача в колі якоря та (або) в колі збудження.

Активний опір ТП може бути представлений у вигляді суми [8]:

$$R_{ТП} = R_{mp} + R_K + R_{дин} + R_{ор}, \text{ Ом}, \quad (3.10)$$

а індуктивність – у вигляді суми

$$L_{ТП} = L_{mp} + L_{ор} + L_p, \text{ Гн}, \quad (3.11)$$

У формулах (3.10), (3.11):

R_{mp} – активний опір фази трансформатора (або реактора), який за відомими втратами потужності в режимі короткого замикання $\Delta P_{mp.к.з.}$ і номінальним

струмом вторинної обмотки трансформатора $I_{mp2.H} \frac{m}{3\pi\sqrt{2}} I_{dH}$ визначається як

$$R_{mp} = \frac{\Delta P_{mp.к.з.}}{3I_{mp2.H}^2}; \quad (3.12)$$

R_K – опір ТП, що обумовлений явищем комутації [8]: для трифазної нульової схеми – $R_{K.3н} \approx \frac{3}{2\pi} \omega_c L_{mp}$, для трифазної мостової – $R_{K.3м} \approx \frac{3}{\pi} \omega_c L_{mp}$

$\omega_c = 2\pi f_c = 314,16$ рад/с – кутова частота напруги мережі промисловою частотою $f_c = 50$ Гц;

L_{mp} – індуктивність трансформатора, яка визначається із досліду короткого замикання при відомій напрузі короткого замикання $u_K\%$, вираженій у відсотках:

$$L_{mp} = \frac{1}{\omega_c} \sqrt{\left(\frac{u_{K\%} E_\phi}{100 \cdot I_{mp2.H}} \right)^2 - R_{mp}^2}; \quad (3.13)$$

E_ϕ – діюче значення номінальної фазної ЕРС вторинної обмотки трансформатора;

$R_{дин}$ – динамічний опір тиристорів, зазвичай враховується приблизно, виходячи з того, що падіння напруги в тиристорах $\Delta u_{дин} = R_{дин} i_d$ (для різних типів тиристорів) складає 0,5...1,5 В;

L_p – індуктивність зрівняльного реактора.

Якщо в системі передбачається керування за колом якоря, для подальшого розрахунку необхідно виконати перевірку на предмет можливості виникнення режиму переривчастих струмів. Якщо така небезпека існує, за даними [16] обирається згладжувальний дросель необхідної індуктивності з параметрами $R_{др}$, $L_{др}$, після чого коректується розрахунок параметрів якорного кола ТП за виразами (3.10), (3.11).

При визначенні необхідності встановлення згладжувального дроселя $L_{др}$ попередньо слід визначити максимальний кут регулювання α_{max} , при якому забезпечується отримання мінімальної швидкості $\omega_{min} = \omega_H / D$, що відповідає нижній межі заданого діапазону регулювання швидкості D [3]:

$$\alpha_{max} = \arccos \frac{c_H \omega_{min} + I_H R_{я\Sigma}}{E_{d0}}, \quad (3.14)$$

де $R_{я\Sigma} = R_{я} + R_{ТП}$ – повний активний опір кола якоря (без дроселю);

$c_H = k\Phi_H$ – електромагнітна стала машини постійного струму при номінальному потоці; може бути обчислена як відношення номінального

моменту M_H до номінального струму I_H якоря двигуна, або як відношення номінальної напруги U_H до номінальної швидкості ω_H двигуна:

$$c_H = \frac{M_H}{I_H} = \frac{U_H}{\omega_H} ; \quad (3.15)$$

k – конструктивна стала двигуна:

$$k = \frac{pN_{\text{я}}}{2\pi a} ,$$

E_{d0} – ЕРС холостого ходу перетворювача при куті керування $\alpha = 0$:

$$E_{d0} = k_{cx} E_{\phi} ; \quad (3.16)$$

– коефіцієнт схеми ТП:

$$k_{cx} = \frac{E_{d0}}{E_{\phi}} = \frac{m}{\pi} \sqrt{2} \cdot \sin \frac{\pi}{6} ; \quad (3.17)$$

m – пульсність схеми ТП (для трифазної мостової схеми $m = 6$, отже, $k_{cx} = 2,34$).

Повна індуктивність якірного кола, яка необхідна для забезпечення режиму гранично-неперервного струму $I_{d.zp}$ на швидкості $\omega_{\min}$ [3]

$$L_{\Sigma \text{необх}} = \frac{0,46 E_{\phi} \sin \alpha_{\max}}{\omega_c m I_{d.zp}} \quad (3.18)$$

Величиною граничного струму $I_{d.zp}$ задаються в залежності від режимів роботи привода. Зазвичай вона складає 2...15% (практично – 7...10%) від номінального струму [10].

Отримавши з (3.18) значення $L_{\Sigma \text{необх}}$, легко знайти потрібну величину індуктивності згладжувального дроселя:

$$L_{\text{др}} = L_{\Sigma \text{необх}} - (L_{\text{я}} + L_{\text{тр}} + L_p) . \quad (3.19)$$

Якщо вийшло так, що $L_{\text{др}} \leq 0$, робиться висновок про відсутність необхідності

у встановленні згладжувального дроселя. В протилежному випадку ($L_{\text{др}} > 0$) за даними [16] обирається згладжувальний дросель ближчої більшої індуктивності із номінальним струмом, що відповідає струмові якоря двигуна. Його активний опір $R_{\text{др}}$ визначається за відомою з каталогу величиною втрат в міді обмотки дроселя $\Delta P_{\text{др.акт}}$ від номінального струму дроселя $I_{\text{др.н}}$:

$$R_{\partial p} = \frac{\Delta P_{\partial p. \text{акт}}}{I_{\partial p. H}^2} \quad (3.20)$$

Для ТП, що живить обмотку збудження, розрахунок виконується аналогічно, але, з оглядом на значно більші значення параметрів $R_{зб}$ і $L_{зб}$ обмотки збудження, а також на відсутність потреби у встановленні згладжувального дроселя окремими складовими (часто – усіма) опорів ТП зневажають.

Наприкінці розрахунку слід зобразити зовнішні характеристики ТП (сімейство кривих $E_d = E_{d0} \cos \alpha - I_d R_{ТП}$ при $I_d = \text{const}$), отримання яких дозволить забезпечити потрібний діапазон регулювання швидкості D .

3.4.3 Розрахунок параметрів об'єкта регулювання

На підставі попередніх розрахунків стають відомими сумарні параметри кола якоря ($R_{я\Sigma}$, $L_{я\Sigma}$) і (або) кола збудження ($R_{зб\Sigma}$, $L_{зб\Sigma}$).

Перед виконанням остаточного розрахунку параметрів об'єкта регулювання (ОР) рекомендується накреслити його структурну схему і помітити на ній усі параметри, значення яких мають бути розраховані. В найбільш загальному випадку параметрами ОР є:

- активні опори $R_{я\Sigma}$ і $R_{зб\Sigma}$ обмоток двигуна;
- електромагнітні сталі часу обмоток двигуна: $T_{я\Sigma} = L_{я\Sigma} / R_{я\Sigma}$ – кола якоря;
- $T_{зб\Sigma} = L_{зб\Sigma} / R_{зб\Sigma}$ – кола збудження; $T_{вс\Sigma} = L_{зб\Sigma} / R_{\partial}$ – кола вихрових струмів
- [часто береться приблизно рівною $(0,05 \dots 0,10) T_{зб\Sigma}$];
- сталі двигуна c_H і k – обчислюються за (3.15);
- коефіцієнт пропорційності $k_{\Phi} = \Phi_H / I_{зб. H}$ між струмом збудження і магнітним потоком на лінійній ділянці кривої намагнічування;
- механічна стала часу двигуна $T_M = J R_{я\Sigma} / c_H^2$;
- обирають сталі часу ТП в колах якоря і збудження $T_{ТП} = 0,005 \text{K } 0,010 \text{ с}$;
- коефіцієнти підсилення ТП за керуванням $k_{ТП}$ в колах якоря і збудження.

3.4.4 Організація зворотних зв'язків за регульованими координатами

3.4.4.1 Вимірювання електричних величин

Вимірювання напруги та струму якірного кола виконується за схемою, зображеною на рис.3.3. В якості вимірювального приладу при вимірюванні постійного струму зазвичай виступає шунт (при великих струмах застосовуються вимірювальні трансформатори струму на боці змінного струму ТП), при вимірюванні напруги – дільник напруги. Для узгодження отриманого сигналу і для гальванічного розв'язання силових кіл і кіл керування застосовується комірка датчика (струму ДС і напруги ДН).

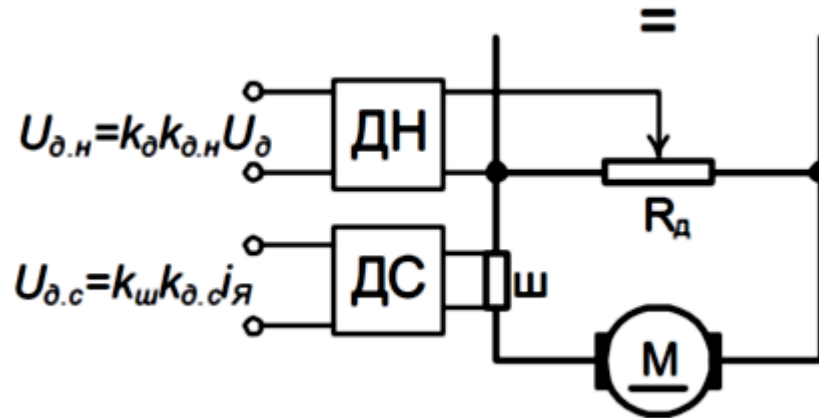


Рисунок 3.3 – Схема вимірювання напруги і струму кола якоря

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом визначається як:

$$k_{зв.с} = k_{ш} k_{д.с}, \quad (3.21)$$

тобто, добуток коефіцієнтів передачі шунта і комірки датчика струму. Напруга на затискачах шунта є пропорційною величині струму, що вимірюється, і як правило, не перевищує 75 мВ. В комірці датчика струму (ДС на рис.3.3) виконується потрібне підсилення сигналу. Конкретне значення коефіцієнту $k_{зв.с}$ обирають зі співвідношення

$$k_{зв.с} \leq \frac{U_{K.max}}{I_{max}}, \text{ В/А}, \quad (3.22)$$

де $U_{K.max}$ – максимальна напруга кіл керування; звичайно визначається максимальною напругою вхідних і вихідних кіл операційних підсилювачів (ОП), які застосовані при реалізації САР (наприклад, при використанні ОП типу К552УД2, на базі якого в курсовому проекті проектуються комірці регуляторів САР, $U_{K.max} = 10 \text{ В}$);

I_{max} – максимальне значення струму, яке необхідно вимірювати.

Отримане за (3.22) значення округлюють в менший бік до зручних чисел: наприклад, якщо отримали $k_{зв.с} = 0,0123$, то за рахунок зменшення $k_{д.с}$ зручно

забезпечити . $k_{зв.с} = 0,01$, тоді напрузі . $U_{д.с} = 1$ В на виході датчика струму відповідатиме фактичне значення вимірюваного струму 100 А.

Аналогічно, коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою

$$k_{зв.н} = k_{\partial} k_{д.н} \quad (3.23)$$

визначається як добуток коефіцієнту дільника R_{∂} і коефіцієнта передачі комірки ДН. Значення коефіцієнту $k_{д.н}$ зазвичай близьке до 1, тому зручне значення коефіцієнту передачі зворотного зв'язку за напругою

$$k_{зв.с} \leq \frac{U_{K.max}}{U_{max}} \quad (3.24)$$

виконують за рахунок коефіцієнту k_{∂} .

Тут слід врахувати, що комірки аналогових датчиків УБСР-АИ, що будуть застосовуватись при розробці принципової схеми САР, мають технічні характеристики [16], відповідно до яких коефіцієнт передачі комірки датчика напруги ДН-2АИ може бути в діапазоні 0,6...1,0, а коефіцієнт передачі комірки датчика струму ДТ-3АИ – у діапазоні 53,3...133,3. Конкретні значення коефіцієнтів передачі встановлюються шляхом відповідного обрання параметрів елементів комірок.

Більшу складність представляє організація зворотних зв'язків за ЕРС двигуна і за швидкістю.

3.4.4.2 Вимірювання ЕРС

Схема реалізації датчика ЕРС має вигляд, представлений на рис.3.5.

Для обчислення ЕРС двигуна потрібна інформація про поточні значення напруги і струму, яка отримується від відповідних датчиків. Якщо вихідні напруги датчиків напруги і струму становлять $U_{ДН} = k_U u_{\partial}$, $U_{ДС} = k_I i$, то слід забезпечити такі параметри схеми рис.3.4, щоб

$$\frac{R_2 + R_3}{R_1} \frac{k_I}{k_U} = R_{я} ; \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C = T_{я\partial} = \frac{L_{я}}{R_{я}} . \quad (3.25)$$

Тоді вихідна напруга датчика ЕРС буде дорівнювати

$$U_{ДЕ}(p) = \frac{k_U R_0}{R_2 + R_3} \left[\frac{u_{\partial}(p)}{T_{я\partial} p + 1} - R_{я} i(p) \right] . \quad (3.26)$$

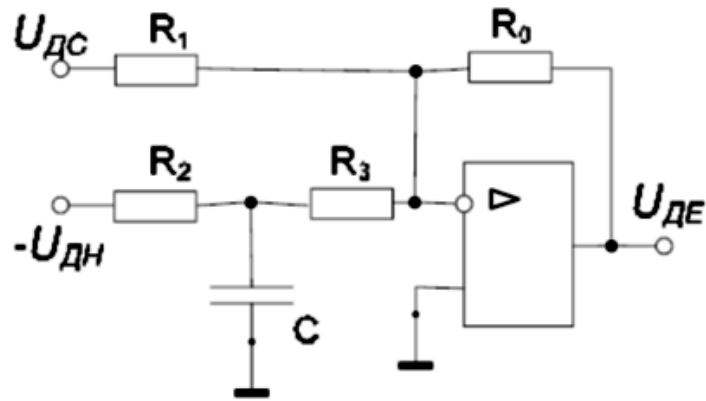


Рисунок 3.4 – Схема реалізації датчика ЕРС

Позначивши $k_E = k_U R_0 / (R_2 + R_3)$, отримаємо остаточне рівняння інерційного датчика ЕРС:

$$U_{ДЕ}(p) = k_E \left[\frac{u(p)}{T_{яд}p + 1} - R_{Я}i(p) \right] \quad (3.27)$$

Отже, реалізація датчика ЕРС полягає у забезпеченні для схеми рис.3.5 вимог (3.25) шляхом сумісного вибору відповідних параметрів R_1, R_2, R_3, C .

Слід підкреслити, що параметри $L_{Я}, R_{Я}$ і $T_{яд}$ відносяться до тієї ділянки якірного кола, з якої знімається напруга.

При синтезі САР на структурній схемі реальний датчик ЕРС можна замінити еквівалентним, який розташовується у колі зворотного зв'язку за дійсною ЕРС (тобто, сигналу, взятого зі структурної схеми ОР), і має передавальну функцію (ПФ):

$$W_{д.е}(p) = \frac{U_{ДЕ}(p)}{E_{д}(p)} = \frac{k_E}{T_{яд}p + 1}, \quad (3.28)$$

де k_E – коефіцієнт передачі датчика ЕРС;

$T_{яд}$ – стала часу його інерційності.

3.4.4.3 Вимірювання швидкості

При вимірюванні швидкості за допомогою тахогенератора постійного струму (ТГ) звичайно застосовують схему зворотного зв'язку, що наведена на рис.3.5. Схема забезпечує фільтрацію вихідного сигналу ТГ з огляду на наявність в ньому спотворень, викликаними зовнішніми наведеннями, а також оборотними пульсаціями.

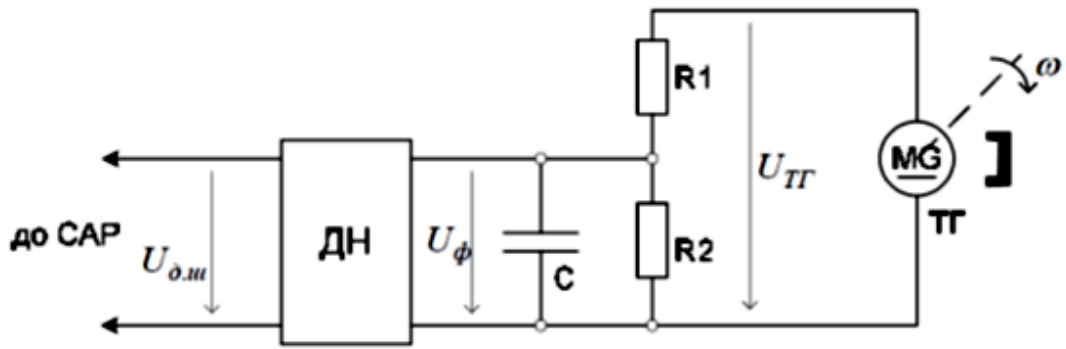


Рисунок 3.5 – Реалізація зворотного зв'язку за швидкістю

Отже, ПФ зворотного зв'язку за швидкістю визначається як добуток ПФ елементів, що входять до неї:

$$W_{\text{д.ш}}(p) = k_{\text{ТГ}} \frac{k_{\text{д}}}{T_{\text{д.ш}} p + 1} k_{\text{ДН}} = \frac{k_{\omega}}{T_{\text{д.ш}} p + 1}, \quad (3.29)$$

де $k_{\text{ТГ}}$ – коефіцієнт передачі тахогенератора, рад/(В·с); визначається через відношення максимально припустимої вихідної напруги $U_{\text{ТГ.макс}}$ ТГ до його максимальної швидкості $\omega_{\text{макс}}$:

$$k = \frac{U_{\text{ТГ.макс}}}{\omega_{\text{макс}}}; \quad (3.30)$$

$k_{\text{ДН}}$ – коефіцієнт підсилення комірки датчика напруги; як вже зазначалося, при застосуванні ДН-2АИ $k_{\text{ДН}} = 0,6 \text{ К } 1,0$.

$k_{\text{д}}$ – коефіцієнт передачі подільника напруги:

$$k_{\text{д}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}; \quad (3.31)$$

$T_{\text{д.ш}}$ – стала часу фільтра на виході ТГ:

$$T_{\text{д.ш}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C, \quad (3.32)$$

величина якої визначається технічною характеристикою ТГ, і звичайно складає 5...10 мс;

Параметри $k_{\text{д}}$ і $T_{\text{д.ш}}$ можуть бути сконструйовані незалежно, оскільки значення параметрів $k_{\text{ТГ}}$ і $k_{\text{ДН}}$ визначаються технічною характеристикою відповідно тахогенератора і комірки датчика напруги. В якості вихідної умови при визначенні параметрів схеми рис.3.5 слід узяти бажане значення

еквівалентного коефіцієнту передачі k_{ω} зворотного зв'язку за швидкістю із округленням до зручних значень:

$$k_{\omega} \leq k_{TT} k_{\phi} k_{ДН} = \frac{U_{K.\max}}{\omega_{\max}} \quad (3.33)$$

3.5 Синтез системи автоматичного регулювання

Вихідними даними до синтезу є повна структурна схема САР, яка складається на підставі структурної схеми ОР, визначених раніше ПФ датчиків регульованих координат і функціональної схеми системи. В результаті синтезу САР мають стати відомими ПФ усіх регуляторів системи, функціональних перетворювачів, задаючих пристроїв і т.ін.

За допомогою структурної схеми системи виділяються контури регулювання, що містять регулятори, ПФ яких мають бути визначені в результаті синтезу. Оскільки САР швидкості (як і підсистеми регулювання ЕРС у двозонних системах) виконуються за принципом підпорядкованого регулювання, синтез регуляторів потрібно починати з самого внутрішнього контуру.

Порядок синтезу рекомендується виконувати у такій послідовності:

1. зображується структурна схема контуру;
2. виділяються малі інерційності (сталі часу) контуру (некомпенсовані) і
3. великі інерційності, що підлягають компенсації регулятором;
4. визначається ПФ регулятора з урахуванням прийнятої умови оптимізації;
5. оцінюються статичні і динамічні властивості замкненого контуру із синтезованим регулятором.

Як приклад розглянемо загальний випадок контуру, схема якого зображена на рис.3.6. Об'єкт регулювання містить велику сталу часу T_0 , і дві малі, серед яких одна ($T_{\mu,пр}$) розташована у прямому каналі контуру, а інша ($T_{\mu,зз}$) – вздовж каналу зворотного зв'язку. Крім того, присутні коефіцієнти підсилення k_0 і k_1 у прямому каналі, і $k_{зз}$ – у каналі зворотного зв'язку.

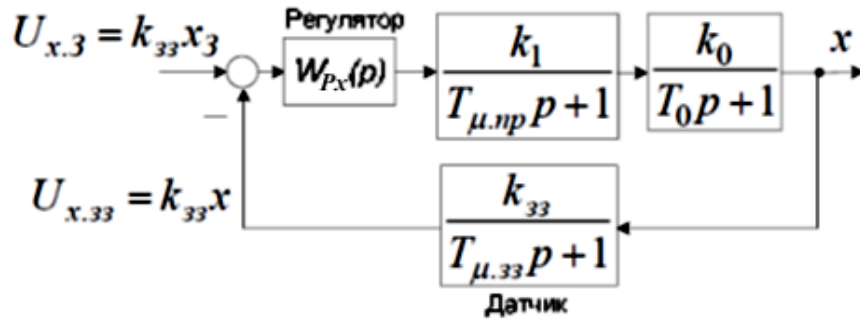


Рисунок 3.6 – Структурна схема контуру регулювання

Як показано у [6], для досягнення умов оптимізації за „модульним оптимумом” (МО) передавальну функцію регулятора слід обрати у вигляді:

$$W_{Px}(p) = \frac{T_0 p + 1}{k_0 k_1 k_{33} T_{Px} p}, \quad (3.34)$$

де T_{Px} – стала часу інтегрування розімкненого контуру регулювання:

$$T_{Px} \approx 2(T_{\mu.нр} + T_{\mu.33}). \quad (3.35)$$

Передавальна функція (3.34) відповідає пропорційно-інтегральному (ПІ-) регулятору.

Як відомо [6], при такій оптимізації ПФ розімкненого контуру із достатнім ступенем точності може бути апроксимована виразом

$$W_{KPx}(p) = \frac{1}{\bar{T}_{Px} p (\bar{T}_{\mu} p + 1)}, \quad (3.36)$$

а замкненого контуру – виразом:

$$K_{KPx}(p) = \frac{1/k_{33}}{\bar{T}_{Px} p (\bar{T}_{\mu} p + 1) + 1}, \quad (3.37)$$

де $\bar{T}_{\mu} = (T_{Px} - T_{\mu.33})/2$, $\bar{T}_{Px} = 2\bar{T}_{\mu}$ – еквівалентні мала стала часу і стала часу інтегрування розімкненого контуру.

Отже, синтезований таким чином контур є астатичним 1-го порядку, а його динамічні властивості є тотожними динамічним властивостям коливальної ланки

зі сталою часу $T = \sqrt{T_{Px} T_{\mu}}$ і коефіцієнтом демпфування $\xi = \sqrt{2} / 2$. Реакція замкненого контуру на стрибок завдання $U_{x,3}$ наведена на рис.3.7.

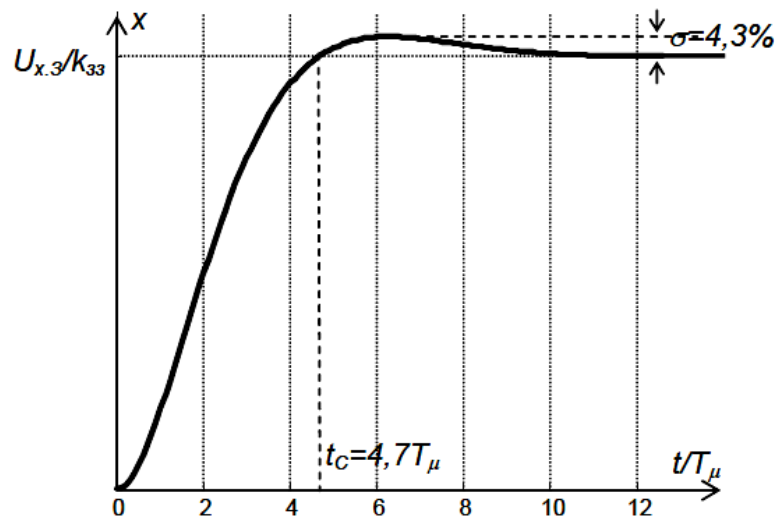


Рисунок 3.7 – Реакція замкненого контуру на стрибок завдання $U_{x,3}$

Можливі також випадки, коли в ОР (рис.3.6) замість ланки $k_0 / (T_0 p + 1)$ з великою інерційністю T_0 присутня будь-яка інша динамічна ланка. Так, якщо це інтегратор $k_0 / T_0 p$ з великою сталою часу, синтезується пропорційний (П-) регулятор з ПФ $W_{Px}(p) = T_0 / (k_0 k_1 k_{33} T_{Px})$. В іншому випадку, якщо в ОР – пропорційна ланка k_0 , синтезується інтегральний (І-) регулятор з передавальною функцією $W_{Px}(p) = 1 / (k_0 k_1 k_{33} T_{Px} p)$.

За наведеним алгоритмом синтезуються усі регулятори системи, причому при синтезі зовнішніх (2-го, 3-го) контурів слід звертати увагу на вибір ПФ ланки $k_1 / (T_{\mu, np} p + 1)$ на підставі отриманої раніше ПФ внутрішнього контуру (3.37).

Також, якщо це необхідно, слід вказати рівні, на яких мають бути обмежені вихідні сигнали регуляторів. При необхідності застосування функціональних перетворювачів на етапі синтезу має бути визначена потрібна аналітична залежність, а також графічна залежність, що виконує її кусково-лінійну апроксимацію. Останнім (серед контурів регулювання) синтезується зовнішній контур механічної координати (швидкості або положення), оцінюються статичні і динамічні характеристики системи в цілому.

На даному етапі слід також прийняти рішення щодо необхідності компенсації внутрішнього зворотного зв'язку двигуна за ЕРС. Як відомо [6], цим

впливом можна знехтувати, якщо співвідношення механічної і електромагнітної сталих часу $T_M / T_J > 2$ і $T_M \gg T_\mu$ (практично – на порядок).

В САР швидкості (табл.1.1) в залежності від заданих діапазону регулювання швидкості і точності її підтримання на цьому етапі може бути прийняте рішення про необхідність заміни П-регулятора швидкості на регулятор ПІ-типу або (досить нечасто) – на інерційно-форсуючий (ІФ-) регулятор.

Завершується синтез, як правило, розробкою структури і параметрів задаючих пристроїв – задатчика інтенсивності (ЗІ) або задатчика положення (ЗП).

Для цього зображується детальна структурна схема пристрою, і, в залежності від заданих умов розгону (гальмування) визначаються всі її параметри.

3.6 Дослідження роботи системи методом математичного моделювання

У даному розділі за допомогою комп'ютерного моделювання має бути проведене дослідження динамічних режимів синтезованої системи. Рекомендується застосовувати програмний пакет Matlab і його додаток Simulink [17], який вивчається студентами в курсі „Моделювання електромеханічних систем”. У разі необхідності вносяться корективи у налагодження регуляторів.

Вихідним матеріалом для моделювання є структурна схема, що була розроблена у попередньому розділі, і також результати розрахунку чисельних значень параметрів системи. Дослідження системи рекомендується виконувати у відносних одиницях, а матеріал розділу представити в такій послідовності:

1. вибір базисних величин;
2. розрахунок відносних передавальних функцій елементів системи;
3. розробка математичної моделі у блоках програми Simulink;
4. дослідження характерних режимів;
5. аналіз результатів моделювання.

3.6.1 Вибір базисних величин

В якості базисних величин рекомендується брати такі:

- номінальна напруга на якорі двигуна $U_\phi = E_{\Pi\phi} = E_{\delta\phi} = E_{d0}$;
- струм якоря короткого замикання $I_\phi = I_{K3} = E_{d0} / R_{Я\Sigma}$;
- номінальний магнітний потік $\Phi_\phi = \Phi_H$;
- номінальний струм збудження $I_{зб.\phi} = I_{зб.H}$;
- номінальна напруга збудження $U_{зб.\phi} = I_{зб.H} R_{зб.}$.

- момент короткого замикання $M_{\delta} = M_{K3} = k_{\Phi H} I_{K3}$;
- швидкість ідеального холостого ходу на природній характеристиці двигуна (при номінальному потоці) $\omega_{\delta} = \omega_{0n}$;
- граничне переміщення – $\varphi_{\delta} = \omega_{0n} t_{p.3} = \omega_{0n}^2 / \varepsilon_3$ – переміщення, що відпрацьовується за трикутною тахограмою швидкості із досягненням у вершині трикутника номінальної швидкості із заданою тривалістю розгону $t_{p.3}$,
- який відповідає максимальному прискоренню ε_3 ;
- найменша стала часу системи – інерційність ТП $T_{\delta} = T_{\mu}$;
- номінальна напруга керування ТП в колі якоря – $U_{KЯ.\delta} = E_{d0} / k_{ТП.Я}$;
- номінальна напруга керування ТП в колі збудження – $U_{Kзб.\delta} = I_{зб.H} R_{зб} / k_{ТП.зб}$;

Базисні величини сигналів завдання на будь-яку координату (наприклад, на струм якоря) рекомендується обирати однаковими із базисними величинами відповідного сигналу зворотного зв'язку, а також виходу блоку порівняння на вході регулятора, і такими, що дорівнюють добутку базисної величини для від повідної координати на коефіцієнт підсилення відповідного зворотного зв'язку.

Наприклад, для струму якоря:

$$U_{Iз.\delta} = U_{oc.i.\delta} = U_{\Delta i.\delta} = k_I I_{Я.\delta} = k_I I_{K3} = k_I E_{d0} / R_{Я\Sigma}.$$

3.6.2 Розрахунок відносних передавальних функцій

Передавальна функція будь-якої ланки (рис.3.8), що представлена у вигляді відношення двох операторних поліномів

$$W(p) = \frac{x(p)}{g(p)} = \frac{H(p)}{Q(p)}, \quad (3.38)$$

може бути перетворена до відносної ПФ у два етапи:

Етап 1. Початкова ПФ (3.38) помножується на базисну величину вхідної координати g , ділиться на базисну величину вихідної координати x :

$$W^*(p) = \frac{x^*(p)}{g^*(p)} = \frac{G_{\delta}}{X_{\delta}} \cdot W(p) = \frac{H(p)}{Q(p)} \cdot \frac{G_{\delta}}{X_{\delta}}. \quad (3.39)$$

За можливістю, отримана ПФ (3.39) має бути приведеною до найпростішого вигляду з урахуванням залежностей зв'язку між базисними величинами. [Як

правило, має виявитися так, що коефіцієнт передачі ПФ (3.39) дорівнюватиме одиниці.]

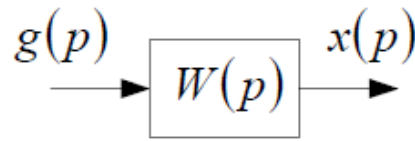


Рисунок 3.8

Етап 2. Виконується нормування ПФ (3.39) за часом, для чого оператор Лапласа p замінюється на операторний вираз $\frac{T_{\delta}}{T_{\delta}} p = \frac{q}{T_{\delta}}$, де T_{δ} – базисна величина за часом; $q = T_{\delta} p$ – відносний оператор Лапласа.

Наприклад, якірне коло двигуна постійного струму має ПФ:

$$W_{ЯК}(p) = \frac{I(p)}{E(p) - E(p)} = \frac{1/R_{Я\Sigma}}{T_{Я}p + 1}.$$

Після першого етапу отримуємо ПФ:

$$W_{ЯК}^*(p) = \frac{1/R_{Я\Sigma}}{T_{Я}p + 1} \cdot \frac{U_{\delta}}{I_{\delta}} = \frac{1/R_{Я\Sigma}}{T_{Я}p + 1} \cdot \frac{E_{d0}}{E_{d0}/R_{Я\Sigma}} = \frac{1}{T_{Я}p + 1}.$$

Після другого етапу отримуємо нормовану ПФ якірного кола:

$$W_{ЯК}^*(q) \frac{1}{T_{Я} \frac{q}{T_{\delta}} + 1} = \frac{1}{T_{Я}^* q + 1}.$$

Після аналогічного розрахунку відносних ПФ усіх параметрів системи зображується нормована структурна схема системи, яка є вихідним матеріалом для складання математичної моделі системи.

3.6.3 Зауваження щодо аналізу результатів моделювання

В якості досліджуваного режиму роботи слід взяти:

- для системи регулювання швидкості (табл.1.1) – відпрацювання заданої тахограми для двох-трьох випадків – при досягненні мінімальної, максимальної і основної швидкості;

- для системи регулювання положення (табл.1.2) – відпрацювання заданого переміщення.

У всіх випадках слід передбачити наявність на валу двигуна постійно діючого реактивного навантаження M_C , величина якого вказана у завданні.

На підставі отриманих результатів мають бути зроблені висновки про те, чи задовольняє система вимогам, що були висунуті до неї. Якщо є невідповідності (наприклад, надто велика статична помилка регулювання швидкості, наявність перерегулювання за положенням і т.ін.), за допомогою математичного моделювання підбирається необхідний варіант сполучень параметрів САР, і розраховуються скориговані параметри системи в абсолютних одиницях.

3.7 Розробка питань аналогової реалізації САР

В даному розділі у відповідності до структурної схеми системи, користуючись матеріалами і довідковими даними, викладеними у [16], [18], обираються комірки універсальної блочної системи регулювання УБСР-АИ, які дозволяють реалізувати елементи спроектованої САР. При цьому слід звертати увагу на необхідність застосування гальванічних розв'язок, що відокремлюють високі потенціали силової частини від кіл керування.

Основою при виконанні даного розділу є самостійна проробка студентами матеріалу [16, розділи 2, 3], який стосується особливостей реалізації регулювання координат в ЕП постійного струму, що випускаються серійно.

Для обраних комірок розробляються схеми внутрішніх з'єднань, виконується розрахунок елементів і уставок регульованих резисторів, що забезпечують реалізацію параметрів синтезованих регуляторів, надається їхній опис.

В даному розділі мають також бути наведені відомості щодо необхідних зовнішніх з'єднань комірок між собою і з іншими елементами системи (вимірювальні прилади, СІФК), які застосовуються при розробці принципової схеми системи і схеми з'єднань.

Далі наведемо лише декілька загальних рекомендацій.

3.7.1 Реалізація датчиків напруги і струму

Для реалізації датчика струму рекомендується застосовувати комірку ДТЗАИ [16], яка працює за принципом „модуляція – трансформування – підсилення – демодуляція”. Регулювання коефіцієнта передачі у межах 53,3 – 133,3 виконується за рахунок установки коефіцієнтів передачі підсилювача А4 і компаратора А5, частота перемикачів якого співпадає з частотою генератора А2.

Для реалізації датчика напруги рекомендується застосувати комірку ДН2АИ, яка відрізняється від попередньої відсутністю фази проміжного підсилення, тобто, підсилювача А4 (у цьому випадку вихід Н2 трансформатора Т2 має бути з'єднаний напряму з точкою з'єднання резисторів R15 і R23).

Входом обох комірок є напруга, що знімається з вимірювального приладу і подається на входи А3, В2. Виходом є напруга контакту В4.

3.7.2 Реалізація регуляторів струму

Для реалізації регуляторів струмів якоря і збудження застосовують зазвичай схему на двох ОП, основа якої наведена на рис.3.9. Перший ОП зазвичай виконує функцію вимірювача похибки регулювання, другий – власно регулятора.

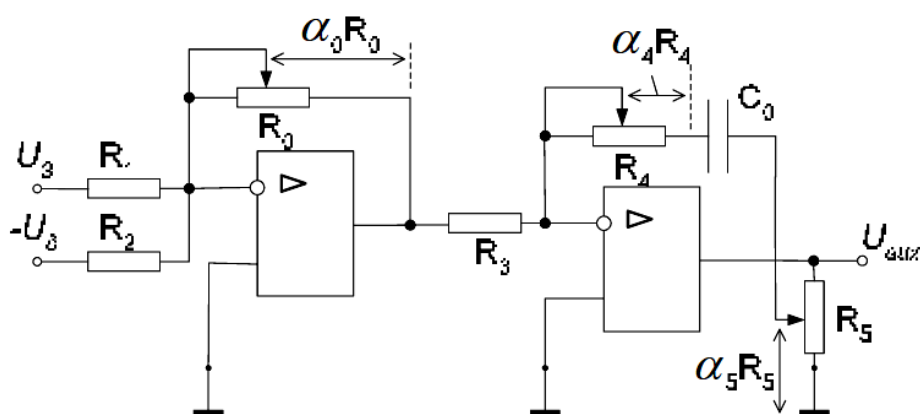


Рисунок 3.9 – Варіант схеми реалізації регулятора струму

В схемі реалізується ПФ ($R_2 = R_1$)

$$W(p) = \frac{U_{vizh}}{U_3 - U_0} = \frac{\alpha_0 R_0}{R_1} \cdot \frac{\alpha_4 R_4 C_0 p + 1}{\alpha_5 R_3 C_0 p} = \frac{\alpha_0 \cdot \alpha_4}{\alpha_5} \cdot \frac{R_0 R_4}{R_1 R_3} + \frac{\alpha_0}{\alpha_5} \cdot \frac{R_0}{R_1 R_3 C_0 p}, \quad (3.40)$$

в якій інтегральна складова регулятора настроюється через встановлення відповідного співвідношення α_0 / α_5 , а пропорційна – через обрання значення α_4 .

При реалізації регуляторів слід мати на увазі, що промисловістю випускаються резистори і конденсатори з параметрами, що відповідають дискретній стандартизованій шкалі їхніх номінальних значень.

В уніфікованих системах регулювання зазвичай передбачається, щоб рівні напруг завдання U_3 і зворотного зв'язку U_0 були однаковими (тобто, певному

значенню регульованої координати відповідають однакові значення U_3 і U_δ), – у таких випадках номінали вхідних резисторів R_1 і R_2 однакові ($R_2 = R_1$)

Але слід знати, що досить часто резистори R_1 і R_2 можуть виконувати масштабну роль для узгодження рівнів напруг U_3 і U_δ . В такому випадку налагодження передавальних функцій виконують за формулою (3.40), а номінал резистора R_2 обирають з умови рівності приведених напруг на вході ОП таких, що відповідають певному (нехай номінальному) значенню регульованої координати:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{U_{\delta.H}}{U_{3.H}}.$$

Для реалізації регуляторів струму якоря та збудження рекомендується застосовувати комірку РТ-1АИ [16]. Внутрішній контур регулювання напруги може застосовуватися за необхідності:

- покращення динамічних властивостей контуру регулювання струму якоря до режиму переривчастих струмів, особливо при можливості роботи ЕП у режимах, близьких до режиму ідеального холостого ходу;
- забезпечення високих динамічних властивостей контуру регулювання струму через лінеаризацію регульовальної характеристики ТП (особливо для випадків, коли застосовується СІФК із пилкоподібною опорною напругою).

3.7.3 Реалізація регулятора швидкості (ЕРС)

Для реалізації регуляторів зовнішніх контурів (швидкості, ЕРС, напруги) також зазвичай використовують схему на двох ОП, основа якої наведена на рис.3.10.

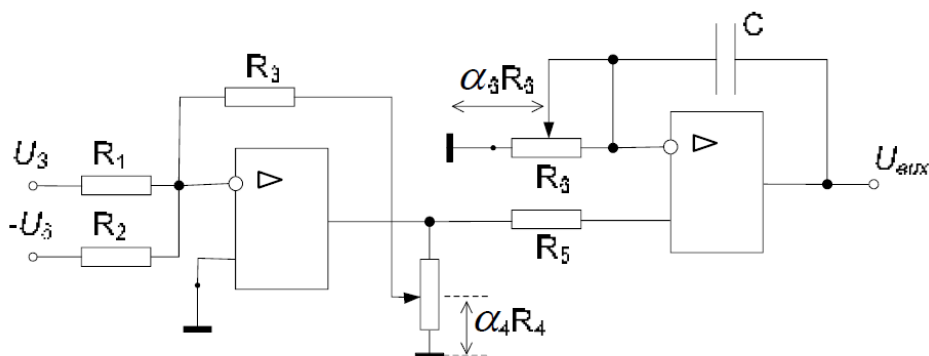


Рисунок 3.10 – Варіант схеми реалізації регулятора швидкості

В схемі реалізується ПФ ($R_2 = R_1$):

$$W(p) = \frac{U_{вых}}{U_3 - U_\partial} = \frac{R_3}{\alpha_4 R_1} \cdot \frac{\alpha_6 R_6 C p + 1}{\alpha_6 R_6 C p} = \frac{R_3}{\alpha_4 R_1} + \frac{1}{\alpha_3 \alpha_4} \cdot \frac{R_3}{R_1 R_6 C_0 p}, \quad (3.41)$$

в якій пропорційна складова регулятора налагоджується через обрання коефіцієнту α_4 , а інтегральна – через обрання значення α_3 .

Для реалізації регулятора швидкості (ЕРС) рекомендується застосовувати комірку РС-1АИ [16]. У випадку необхідності адаптації регулятора (наприклад, у двозонних системах) нелінійні арифметичні операції множення та ділення можуть бути реалізовані додатково за допомогою комірок УМ-3АИ [18], МД2АИ [18] або МД-3АИ [18].

3.7.4 Організація обмеження вихідного сигналу регулятора

Реалізацію обмеження вихідного сигналу ОП виконують шляхом вмикання в його зворотний зв'язок нелінійного елемента. Найбільш зручною на практиці є реалізація останнього на додаткових ОП [11] (рис.3.11) із застосуванням додаткового джерела опорної напруги.

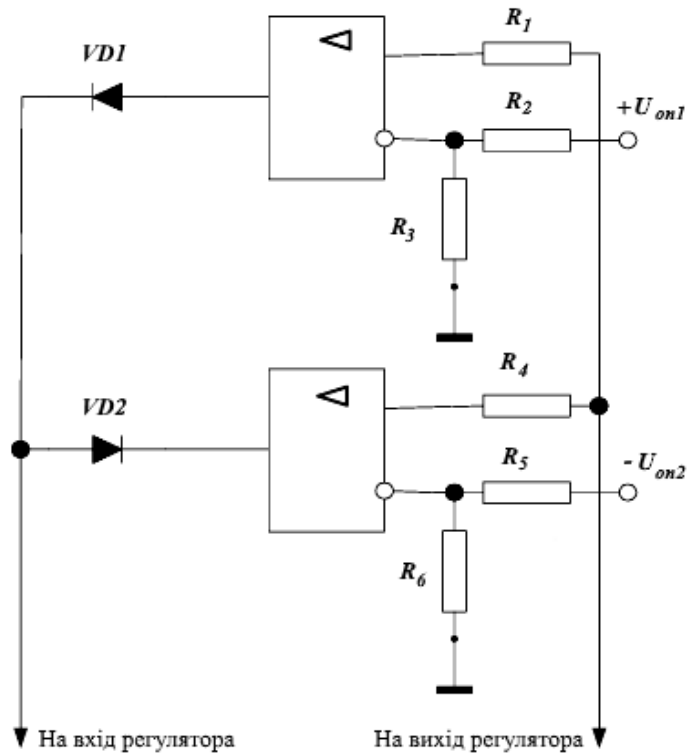


Рисунок 3.11 – Реалізація обмеження вихідної координати

Рівні обмеження вихідного сигналу для схеми рис.3.12 обчислюються за формулами:

$$U_{обм1} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_{on1} \quad (3.42)$$

$$U_{обм2} = \frac{R_6}{R_5 + R_6} U_{on2} \quad (3.43)$$

Для регулювання уставок застосовують регульовані резистори (у складі R_2 та R_5), або зміни потенціалів виводів джерела опорної напруги (наприклад, через встановлення додаткових подільників напруги).

Подібна схема обмеження використана і в комірці РС-1АИ (підсилювачі А3, А4). При виконанні проекту слід вказати потрібні з'єднання входів і виходів комірки.

3.7.5 Реалізація функціональних перетворювачів

Для потрібного функціонального перетворення координат системи ЕП застосовуються функціональні перетворювачі (ФП), що мають нелінійні статичні характеристики.

При реалізації ФП на базі ОП схеми набувають нелінійних властивостей завдяки наявності діодно-резистивних кіл. Найчастіше використовують схеми з нелінійним входним опором ОП [11], приклад якої наведено на рис.3.12а.

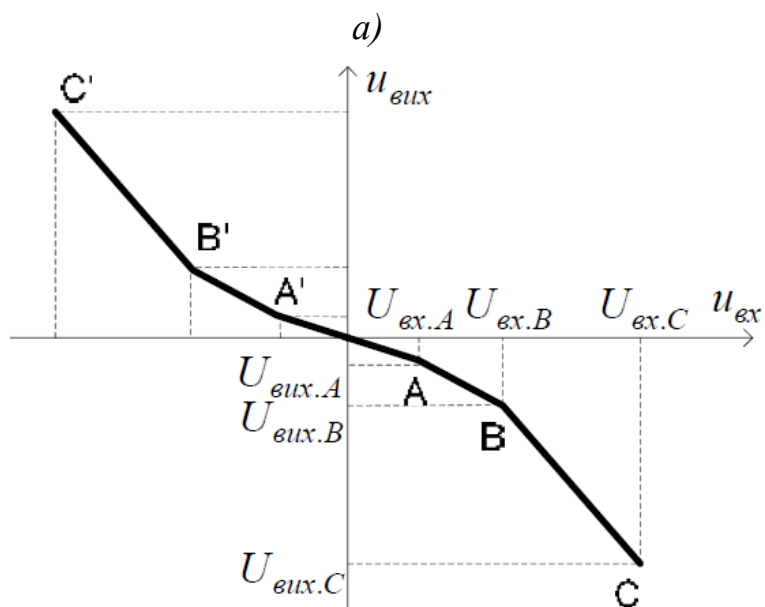
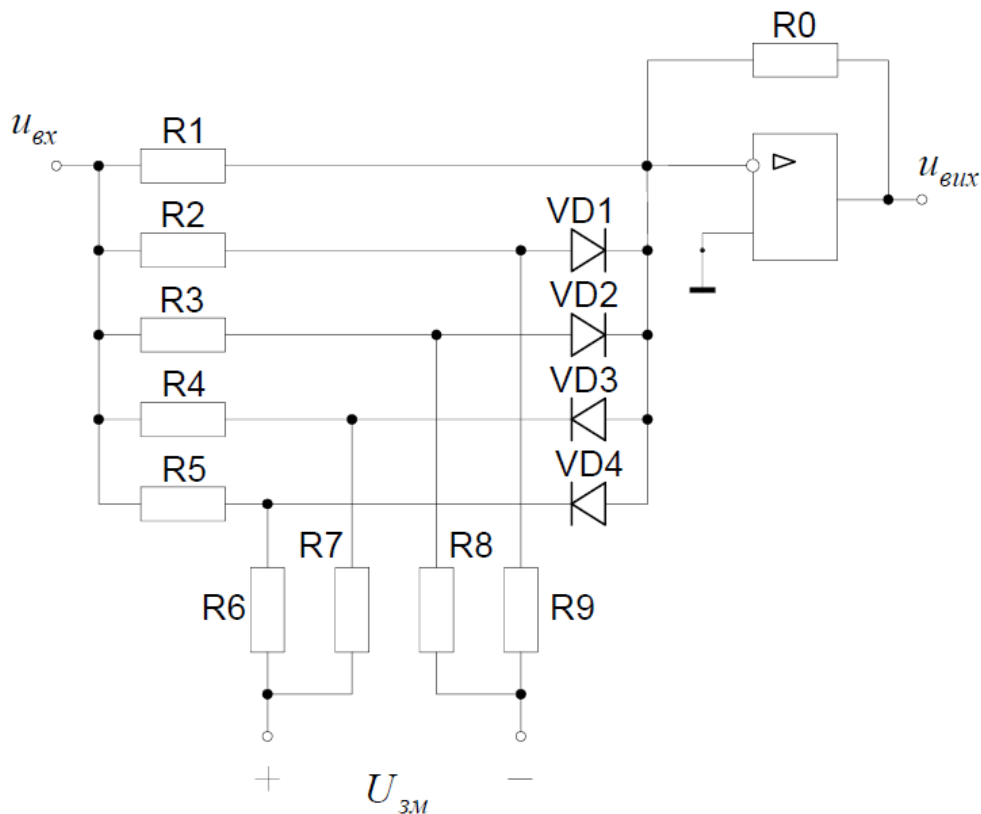


Рисунок 3.12 – Схема реалізації ФП (а) та його характеристика (б)

Полярність напруги зміщення $U_{зм}$ така, що за малої додатної вхідної напруги $u_{вх}$ усі діоди закриті напругами зміщення через резистори R6...R9. При цьому

схема забезпечує найменший коефіцієнт підсилення, який відповідає ділянці AA' статичної характеристики (рис.3.12б):

$$u_{вих} = -\frac{R0}{R1} u_{вх} \quad (3.44)$$

Якщо додатна вхідна напруга перевищить рівень $U_{вх.А} = \frac{R2}{R9} U_{зм}$, діод VD1 відкриється, умикаючи резистор R2 паралельно R1, та збільшуючи цим коефіцієнт передачі схеми. Тоді ,

$$u_{вих} = -R0 \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \right) u_{вх} + \frac{R0}{R9} U_{зм} \quad (3.45)$$

що відповідає відрізку АВ статичної характеристики (рис.3.12б).

З подальшим зростанням вхідної напруги $\left(u_{вх} > U_{вх.В} = \frac{R3}{R8} U_{зм} \right)$ відкриється діод VD2, і виконується наступний злам статичної характеристики. При цьому вихідна напруга

$$u_{вих} = -R0 \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} \right) u_{вх} + R0 \left(\frac{1}{R8} + \frac{1}{R9} \right) U_{зм} \quad (3.46)$$

Діоди VD3, VD4 забезпечують нелінійність статичної характеристики при від'ємних вхідних напругах. Щоб характеристика була симетричною відносно початку координат, слід забезпечити

$$R4 = R2; R5 = R3; R6 = R8; R7 = R9 .$$

При реалізації ФП потрібна статична характеристика завжди відома. Розрахунки виконують за координатами її вузлових точок та діапазоном зміни вхідної напруги. Один з опорів (найзручніше R0) звичайно задають. Напруга зміщення $U_{зм}$ повинна перевищувати найбільшу вхідну напругу.

Кількість вузлових точок дорівнює кількості діодів у схемі. Розташування точок (А, В, А', В' на схемі рис.3.12б) вибирають ще на етапі синтезу таким, щоб максимально врахувати нелінійність статичної характеристики. Збільшуючи кількість RVD-ланцюгів, можна досягти необхідної плавності характеристики.

Розглянутий випадок функціональної залежності (рис.3.12б) має випуклий характер у четвертому квадранті (і, відповідно, увігнутий у другому). Щоб змінити характер функції на зворотній, слід змінити полярність напруги зміщення $U_{зм}$ на протилежну. Тоді при малих вхідних напругах $u_{вх}$ усі діоди будуть відкриті, а коефіцієнт передачі – максимальним [тобто, визначатиметься за

формулою (3.46)]. При наступному зростанні напруги $u_{вх}$ діоди поступово закриваються, а коефіцієнт передачі зменшиться.

Цей принцип закладений у комірках функціональних перетворювачів ПК2АИ [18] або ПФ-2АИ [18], які в курсовому проекті рекомендується застосовувати для реалізації ФП. Додаткові рекомендації щодо розрахунку параметрів зазначених комірок можуть бути отримані з [11], [18].

3.7.6 Реалізація операції виділення модуля

Більш простим видом ФП є блок виділення модуля, реалізація якого, проте, для підвищення точності операції виконується на двох ОП [11] (рис.3.13).

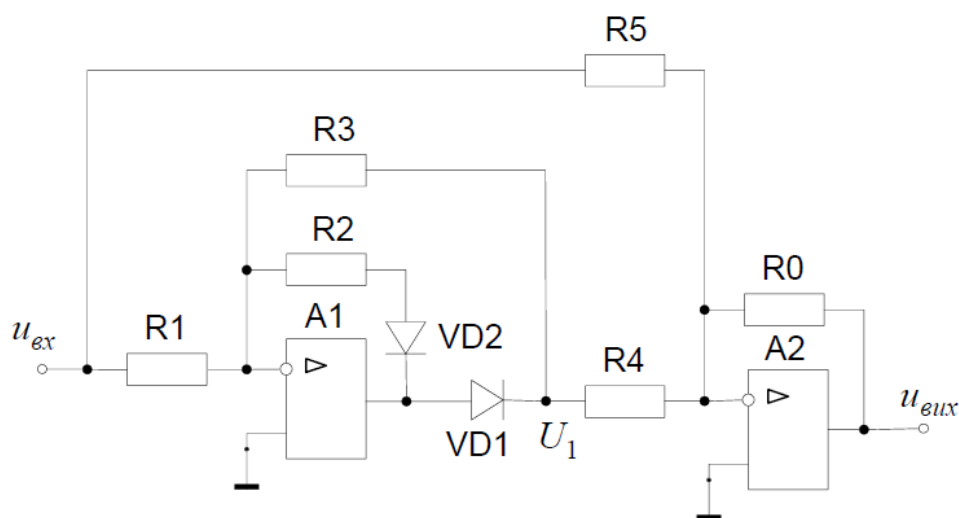


Рисунок 3.13 – Реалізація операції виділення модуля

На підсилювачі A1 реалізується однопівперіодний випрямляч, на підсилювачі A2 – суматор.

Коли напруга $u_{вх}$ додатна ($u_{вх} > 0$), діод VD2 відкритий, діод VD1 закритий, і $U_1 = 0$. При $u_{вх} < 0$ VD2 закритий, але VD1 відкритий, і $U_1 = -\frac{R3}{R1}u_{вх}$

Напруга на виході підсилювача A2

$$u_{вих} = -\left(\frac{R0}{R4}U_1 + \frac{R0}{R5}u_{вх}\right). \quad (3.47)$$

Забезпечивши співвідношення опорів резисторів

$$R1 = R2 = R3 = R4 = R; \quad R5 = 2R; \quad R0 = 2kR,$$

отримаємо, що, в залежності від знаку вхідної напруги,

$$u_{ex} = \begin{cases} ku_{ex}, & \text{якщо } u_{ex} < 0; \\ -ku_{ex}, & \text{якщо } u_{ex} > 0, \end{cases} \quad (3.48)$$

тобто, $u_{ex} = -k|u_{ex}|$.

Для реалізації блоків виділення модуля в САР може бути застосована комірka BM-2AI [18].

3.7.7 Реалізація регулятора положення

Нелінійний регулятор положення (РП) в системах без задатчика положення (ЗП) можна реалізовувати (з урахуванням рекомендацій [16]) за принциповою схемою наведеною на рис.3.14.

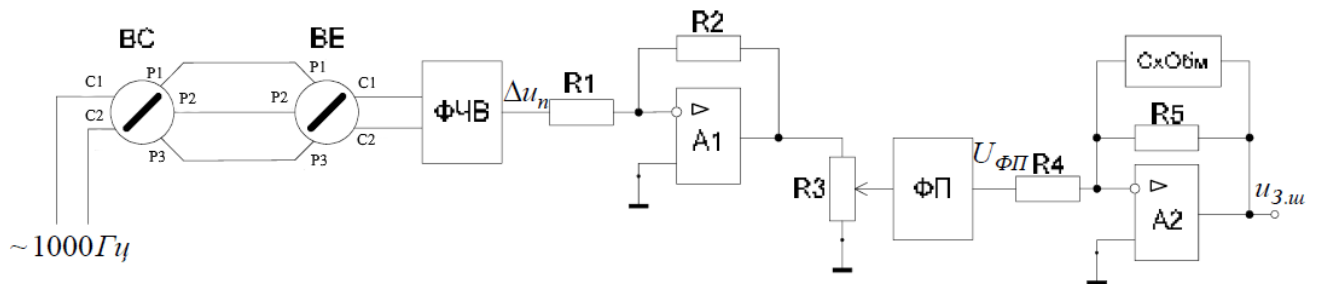


Рисунок 3.14 – Схема аналогової реалізації параболічного РП

В схемі застосований сельсинний принцип вимірювання положення. Сельсин-датчик ВС розташовується на валу двигуна або виконавчого органа механізму. При його електричному зв'язку із сельсином-приймачем ВЕ напруга на контактах С1, С2 останнього після її фазочутливого випрямлення (блок ФЧВ, в якості якого може бути використана комірka ФВ-2AI [18]) є пропорційною похибці регулювання положення:

$$\Delta u_n = k_{\partial.n} \Delta \varphi = k_{\partial.n} (\varphi_3 - \varphi), \quad (3.42)$$

де φ_3, φ – задане і дійсне положення відповідно, рад;

$k_{\partial.n}$ – коефіцієнт підсилення зворотного зв'язку за положенням (коефіцієнт трансформації сельсинної пари), В/рад.

Напруга Δu_n після проміжного підсилення (ОП А1) потрапляє до функціонального перетворювача (виконаного, наприклад, на базі комірки ПФ-2АИ), який реалізує параболічну характеристику РП:

$$U_{\Phi\P} = k_{\partial.ш} \sqrt{\frac{2\varepsilon_3}{k_{\partial.n}} \Delta u_n}, \quad (3.43)$$

де $k_{\partial.ш}$ – коефіцієнт підсилення зворотного зв'язку за швидкістю, В/с/рад;
 ε_3 – задане прискорення, рад/с².

Напруга з виходу ФП $U_{\Phi\P}$ потрапляє на вхід ОП А2, який виконує потрібне підсилення сигналу у сполученні з обмеженням вихідного сигналу регулятора. У якості схеми обмеження (СхОбм) може бути використана будь-яка з відомих (наприклад, схема, що наведена на рис.3.11).

Схема реалізації лінійного РП є більш простою у порівнянні з наведеною на рис.3.15, оскільки відпадає необхідність у застосуванні ФП.

3.7.8 Реалізація задаючих пристроїв

Структурна схема найпростішого варіанта інтегрального задатчика інтенсивності (ЗІ) наведений на рис.3.15, де позначені вузол порівняння (суматор), компаратор К (який має два усталених стани) і інтегратор І.

Для реалізації ЗІ в курсовому проекті рекомендується застосовувати комірку ЗИ-2АИ [18] або ЗИ-3АИ [16]. В цих комірках вузол порівняння і компаратор функціонально об'єднані в один елемент – неінвертувальний підсилювач А1 з обмеженням вихідного сигналу за схемою, подібною до схеми рис.3.11.

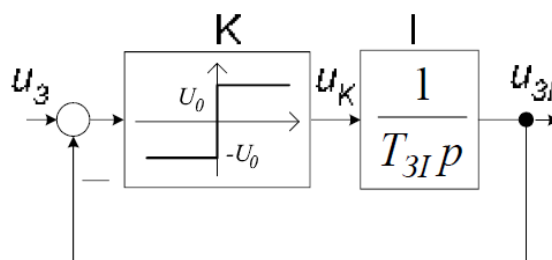


Рисунок 3.15

Задатчик положення (ЗП), згідно з функціональною схемою (рис.3.16), представляє собою ЗІ, який доповнений інтегратором і нелінійним елементом (що відтворює характеристику нелінійного регулятора положення), а також зовнішнім зворотним зв'язком за заданим положенням. Сигнал U_3 має бути сформований зовнішнім пристроєм (наприклад, сельсинами).

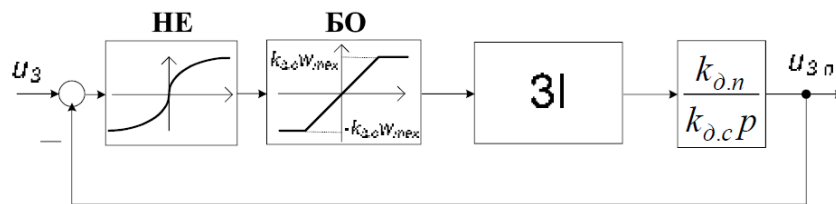


Рисунок 3.16 – Структурна схема задатчика положення

Отже, аналогова реалізація ЗП може бути виконана на декількох комірках УБСР-АИ – вузол порівняння (окремий ОП, наприклад, з комірки У7-АИ [18]), функціональний перетворювач (комірка ПФ-2АИ), ЗІ (комірка ЗИ-3АИ), інтегратор (окремий ОП).

3.7.9 Узгодження сигналів комірок

Для узгодження рівнів та (або) знаків напруг між окремими комірками слід застосовувати проміжні ОП і невикористані пасивні елементи інших комірок. Крім того, іноді склад комірки не дозволяє виконати повну побудову регулятора або іншого елемента САР. Якщо потрібну кількість таких проміжних ОП не вдається виділити з вільних ОП інших комірок, що вже застосовані для реалізації регуляторів, слід застосовувати комірки підсилювачів УИ-АИ [18], У7-АИ [18], У9-АИ [18], У10-АИ [18], У12-АИ [18] або N003 [16], а також комірку зв'язку С4-АИ [18] та комірку фільтрів Ф4-АИ [18].

Рекомендується також за можливістю об'єднувати комірки за функціональним призначенням з метою надання принциповій схемі найбільш компактного виду.

3.8 Графічна частина

Графічна частина складається з двох аркушів А3(297 мм х 420 мм). На першому аркуші представляється повна принципова електрична схема спроектованої системи ЕП, на другому – схема з'єднань і структурна схема системи. При виконанні графічної частини проекту можна скористатися відомостями і прикладами, поданими у [19 – 21].

Принципова електрична схема системи розробляється на підставі результатів аналогової реалізації окремих елементів САР. Принципова схема системи представляє собою сукупність використаних комірок і ліній, що відображають порядок з'єднання їх одна з одною та з силовою частиною ЕП. Усі лінії зовнішніх

з'єднань мають бути пронумеровані арабськими цифрами (1, 2, 3, ...), кожна лінія з певним потенціалом повинна мати свій унікальний номер.

Кілька ліній, що спрямовані в одному напрямку, рекомендується об'єднувати в шини. Застосування такого підходу дозволяє значно знизити громіздкість схеми. Усі застосовані комірки є окремими одиницями, не можуть зображатися частково, а тільки в обсязі, наданому в [16], [18], зі збереженням найменувань виводів. На принциповій схемі також має бути наведена силова частина ЕП із функціональним позначенням окремих елементів (ТП, СІФК, двигуни і т.ін.).

Схема з'єднань представляє собою більш стислий варіант принципової схеми. Кожна комірка представляється у згорнутому вигляді (без зображення внутрішніх елементів та їхніх з'єднань). Нумерація ліній з'єднань повинна відповідати принциповій схемі. В якості прикладу на рис.3.17 показаний приклад зображення комірки ЗІ в схемі з'єднань системи регулювання положення.

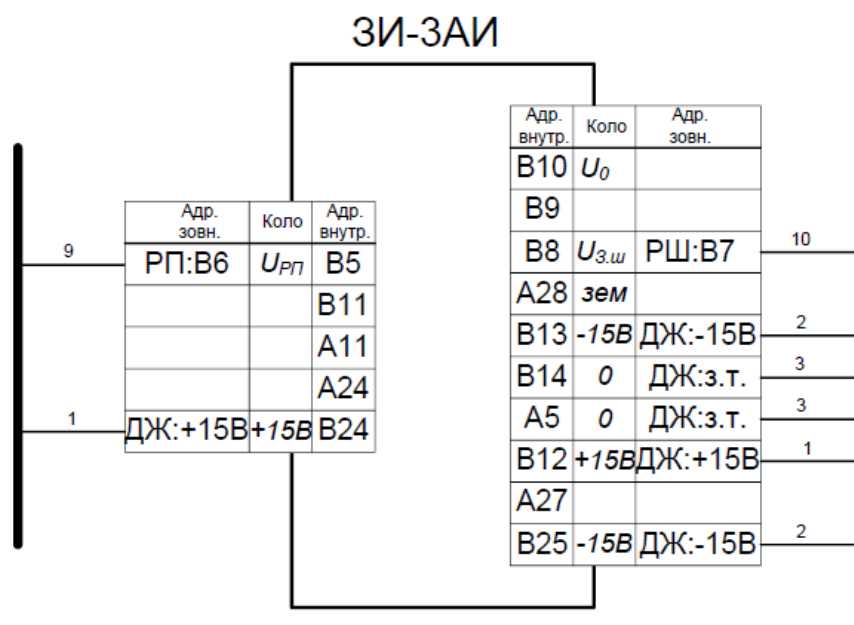


Рисунок 3.17 – Зображення комірки ЗІ-ЗАИ з виводами (на схемі з'єднань)

3.9 Висновки

Висновки є останнім розділом основної частини пояснювальної записки, в якому формулюються основні результати виконаної роботи. При цьому необхідно дати оцінку їхньої значимості, а також навести певні практичні рекомендації.

Висновки умовно можуть бути розділені на локальні, що були отримані після виконання кожного окремого етапу проектування системи ЕП (розділу пояснювальної записки), і загальні.

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. – К. : Держстандарт України, 2016. – 26 с.
2. Управление вентильными электроприводами постоянного тока / Е.Д. Лебедев, В.Е. Неймарк, М.Я. Пистрак, О.В. Слежановский. – М. : Энергия, 1970. – 200 с.
3. Унифицированные системы автоуправления электроприводом в металлургии / В.К. Гарнов, В.Б. Рабинович, Л.М. Вишневецкий. – Л. ; М. : Металлургия, 1971. – 216 с.
4. Тиристорные электроприводы прокатных станов / В.М. Перельмутер, Ю.Н. Брауде, Д.Я. Перчик, В.М. Книгин. – М. : Металлургия, 1978. – 152 с.
5. Синтез вентильних приводів постійного струму : навч. посіб. / П.Х. Коцегуб. – К. : ІЗМН, 1997. – 122 с.
6. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / [под. ред. В.И. Круповича, Ю.Г. Барыбина, М.Л. Сомовера]. – 3-е изд., перераб и доп. – М. : Энергоиздат, 1982. – 416 с., ил.
7. Башарин, А.В. Управление электроприводами : учеб. пособ. для вуз. / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л. : Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с., ил.
8. Системы управления электроприводов : учеб. для студентов высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов ; [под ред. В.М. Терехова]. – 2-е изд., стер. – М. : Академия, 2006. – 304 с.
9. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями / Е.Н. Зимин, В.Л. Кацевич, С.К. Козырев. – М. : Энергоиздат, 1981. – 192 с., ил.
10. Казачковський, М.М. Комплектні електроприводи : навч. посіб. / М.М. Казачковський. – Дніпропетровськ : Нац. гірн. ун-т, 2003. – 226 с.
11. ВНИИМЕТМАШ. Справочные данные по электрооборудованию. В 2-х т. Т.1. Электрические машины общего применения / ВНИИМЕТМАШ . – М. ; Л. : Энергия, 1964. – 328 с.
12. ВНИИМЕТМАШ. Справочные данные по электрооборудованию. В 2-х т. Т.2. Электрооборудование для тяжелого машиностроения и металлургических цехов / ВНИИМЕТМАШ. – М. ; Л. : Энергия, 1965. – 480 с.
13. Тембель, П.В. Справочник по обмоточным данным электрических машин и аппаратов / П.В. Тембель, Г.В. Геращенко. – 3-е изд., перераб. – К. : Техніка, 1981. – 480 с., ил.

14. Проектирование электрических машин : учеб. пособие для вуз. / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др. ; [под ред. И.П. Копылова]. – М. : Энергия, 1980. – 496 с., ил.
15. Комплектные тиристорные электроприводы : справ. / И.Х. Евзеров, А.С. Горобец, Б.И. Мошкович и др. ; [под ред. канд. техн. наук В.М. Перельмутера]. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 319 с., ил.
16. Толочко, О.И. Использование пакета Matlab и его расширения Simulink при использовании систем электропривода : методич. пособие (для студентов специальности 7.0922.08) / О.И. Толочко. – Донецк : ДонГТУ, 1999. – 87 с.
17. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
18. Усатенко, С.Т. Выполнение электрических схем по ЕСКД : справ. / С.Т. Усатенко, Т.К. Каченюк, М.В. Терехова. – М. : Издательство стандартов, 1989. – 325 с.
19. Графическое изображение электросхем : справ. / С.Т. Усатенко, М.В. Терехова. – К. : Техніка, 1986. – 120 с.
20. Александров, К.К. Электротехнические чертежи и схемы / К.К. Александров, Е.К. Кузьмина. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 280 с.

Електронні ресурси :

1. Чекавський, Г.С. Конспект лекцій з курсу „Системи керування електроприводами” для студентів спеціальності 6.050702.03 [Електронний ресурс].– Режим доступу : http://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/1993/1/mu_kurs_suep_2010_edit1.5.pdf.

ДОДАТОК А
Приклад оформлення титульної сторінки

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДВНЗ «ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації,
електроінженерії та радіоелектроніки
Кафедра електричної інженерії

Курсовий проект

з дисципліни «Системи керування електроприводами. Частина 2»

на тему _____

Виконав: студент ____ курсу, групи _____
(шифр групи)
напряму підготовки (спеціальності) _____
(шифр і назва напряму підготовки (спеціальності))

_____	_____
(прізвище та ініціали)	(підпис)

Керівник _____	_____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)	(підпис)

Чотирибальна шкала: _____

Кількість балів: _____

Члени комісії:

_____	_____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)	(підпис)

_____	_____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)	(підпис)

Покровськ – 2018 р.

ДОДАТОК Б
Приклад оформлення завдання на курсовий проект

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДВНЗ «ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
Факультет КІТАЕР
Кафедра електричної інженерії

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри

_____ (Колларов О.Ю.)

« » _____ 2017 р.

ЗАВДАННЯ
НА КУРСОВИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ

_____ (прізвище, ім'я, по батькові)
1. Тема проекту: Розробка системи підпорядкованого керування
тиристорним електроприводом постійного струму

2. Керівник проекту: _____
_____ (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Основні пункти завдання:
Функціональна схема системи керування електроприводом
Розрахунок параметрів об'єкта регулювання
Синтез системи автоматичного регулювання
Дослідження роботи системи методом математичного моделювання
Розробка питань аналогової реалізації САР

4. Вихідні дані (у разі необхідності):
Варіант №12, двигун: П133-4К, $P_H=125$, $U_H=440$, $n_H=400$, $N=1$, $D=1:8/1:3$,
 $I_{yn}/I_H=2,5$, $M_C/M_H=1,0$, $I/I_H=2,0$, $J_{мех}/J_{об}=1.5$, тип системи керування:
Двоступенчата (із залежним керуванням)

5. Рекомендована література (у разі необхідності):

Студент: _____
_____ (дата) _____ (підпис) _____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи: _____
_____ (дата) _____ (підпис) _____ (прізвище та ініціали)

ДОДАТОК В
Приклад оформлення реферату
РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до курсового проекту містить 35 сторінок,
12 рисунків, 1 таблицю, 4 джерела.

ТИСТОРНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ДВИГУН, СТРУМ, ШВИДКІСТЬ,
ЗБУДЖЕННЯ, КОНТУР, ПРЕДАВАЛЬНА ФУНКЦІЯ, СТАЛА ЧАСУ

Об'єктом розробки є система підпорядкованого тиристорного електроприводу постійного струму з двигуном незалежного збудження.

Мета курсового проекту – розв'язання комплексних задач проектування систем автоматичного керування, що задовольняє заданим технологічним вимогам.

Метод дослідження – аналітичний розрахунок і вибір обладнання, математичне моделювання за допомогою сучасних прикладних програм.

Внаслідок роботи була спроектована система підпорядкованого регулювання положення з керуванням по колу якоря. Був обраний комплексний тиристорний електропривод системи КТЕУ з усім силовим обладнанням. За допомогою пакету MATLAB та його придатку Simulink були отриманні перехідні процеси у системі, проведений аналіз статичних і динамічних показників якості. Розроблена повна принципова схема об'єкту та схема з'єднання комірок.

ДОДАТОК Г
Приклад оформлення змісту

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	Ошибка! Закладка не определена.
ВСТУП.....	Ошибка! Закладка не определена.
1 ВИХІДНІ ДАНІ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА	Ошибка! Закладка не определена.
1.1 Вихідні дані.....	Ошибка! Закладка не определена.
1.2 Функціональна схема електроприводу	Ошибка! Закладка не определена.
2 ВИБІР ТИРИСТОРНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	Ошибка! Закладка не определена.
3 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОБ’ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ	Ошибка! Закладка не определена.
3.1 Розрахунок активного опору якоря двигуна	Ошибка! Закладка не определена.
3.2 Визначення індуктивного опору якірного кола	Ошибка! Закладка не определена.
3.3 Визначення електромеханічної сталої часу.....	Ошибка! Закладка не определена.
3.4 Розрахунок параметрів кола збудження	Ошибка! Закладка не определена.
4 СИНТЕЗ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ.	Ошибка! Закладка не определена.
4.1 Розрахунок контура регулювання струму якоря.....	Ошибка! Закладка не определена.
4.2 Розрахунок контуру регулювання напруги	Ошибка! Закладка не определена.

5 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕГУЛЯТОРІВ.....	Ошибка! Закладка не определена.
5.1 Реалізація регулятора струму якоря	Ошибка! Закладка не определена.
5.2 Реалізація регулятора швидкості	Ошибка! Закладка не определена.
5.3 Реалізація регулятора положення	Ошибка! Закладка не определена.
6 РЕАЛІЗАЦІЯ ДАВАЧІВ.....	Ошибка! Закладка не определена.
7 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАДАВАЧА ІНТЕНСИВНОСТІ	Ошибка! Закладка не определена.
8 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	Ошибка! Закладка не определена.
ВИСНОВОК.....	Ошибка! Закладка не определена.
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	Ошибка! Закладка не определена.