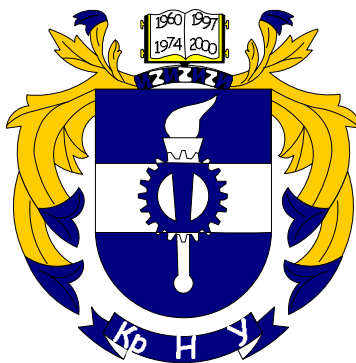


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ
І СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ЩОДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
«ЕЛЕМЕНТИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ЗАОЧНОЇ ФОРМИ НАВЧАННЯ
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ
141 – «ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»
ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «БАКАЛАВР»

КРЕМЕНЧУК 2019

Методичні вказівки щодо виконання контрольної роботи з навчальної дисципліни «Елементи автоматизованого електропривода» для студентів заочної форми навчання зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітнього ступеня «Бакалавр»

Укладачі: к. т. н., доц. В. О. Мельников,

к. т. н., доц. А. П. Калінов

Рецензент к. т. н., доц. В. О. Огарь

Кафедра систем автоматизованого управління та електропривода

Затверджено методичною радою Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Протокол № ____ від _____

Голова методичної ради _____ проф. В. В. Костін

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Рекомендації щодо виконання та оформлення контрольної роботи.....	6
2 Завдання для виконання контрольної роботи.....	7
Завдання № 1 Теоретичне завдання № 1	7
Завдання № 2 Схеми включення та основні параметри датчиків струму і напруги	9
Завдання № 3 Вибір і розрахунок підсилювально-перетворювальних елементів термоелектричних датчиків	20
Завдання № 4 Теоретичне завдання № 2	29
Завдання № 5 Розрахунок і вибір елементів силових кіл тиристорних перетворювачів енергії	30
Завдання № 6 Розрахунок і вибір елементів силових кіл транзисторних перетворювачів енергії	39
3 Критерії оцінювання знань студентів	51
Список літератури.....	52
Додаток А Параметри напівпровідникових ключів	53
Додаток Б Зразок оформлення титульної сторінки контрольної роботи	55

ВСТУП

Метою вивчення навчальної дисципліни «Елементи автоматизованого електропривода» є отримання майбутніми спеціалістами у галузі автоматизованого електропривода фундаментальних знань про властивості та характеристики основних елементів, які є складовими частинами систем автоматизованого електропривода.

Завданнями навчальної дисципліни «Елементи автоматизованого електропривода» є отримання знань, які дозволяють майбутньому інженеру правильно вибрати та застосувати як окремі елементи, так і системи електропривода загалом, отримання навичок у роботі з елементами систем керування і автоматики, силовими перетворювальними пристроями у межах систем автоматизованого електропривода.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен

знати:

- характеристики, структурні схеми та функціональні властивості елементів автоматизованого електропривода;
- будову, основні технічні характеристики та параметри елементів керуючої, вимірювальної та перетворювальної техніки електропривода;
- будову систем збирання та обробки даних;
- принципи дії та характеристики датчиків швидкості, кута повороту, положення;
- характеристики і принцип дії датчиків струму та напруги, магнітного потоку;
- особливості вимірювання температури та вібрації;
- класифікацію та характеристики силових елементів автоматизованого електропривода;
- принципи керування силовими ключами систем імпульсно-фазного керування;

– принцип дії та характеристики перетворювачів постійного і змінного струму;

– схеми та режими роботи широтно-імпульсних перетворювачів постійного струму, перетворювачів частоти, тиристорних регуляторів напруги;

уміти:

– визначити потрібні для одержання необхідних властивостей електропривода характеристики його складових елементів;

– розрахувати та вибирати за каталогами необхідні елементи систем автоматизованого електропривода, елементи гальванічної розв'язки, перетворювальні елементи та ін.;

– визначати швидкість обертання за допомогою електромашинного та фотоелектричного датчиків швидкості;

– вимірювати струм і напругу за допомогою датчиків, розраховувати якісні показники струму та напруги;

– працювати із системою імпульсно-фазового керування тиристорами;

– вибирати елементи систем керування силовими перетворювачами.

1 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИКОНАННЯ ТА ОФОРМЛЕННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Звіт з контрольної роботи повинен містити титульну сторінку та основну частину. Приклад оформлення титульної сторінки наведено у додатку Б. Титульна сторінка оформлюється лише українською мовою. Контрольну роботу виконують державною мовою, приблизний обсяг – 10–15 сторінок у друкованому варіанті або 15–20 сторінок – у рукописному.

Номер варіанта контрольної роботи визначається за порядковим номером студента в академічному журналі групи.

Звіт з контрольної роботи оформлюється на аркушах форматом А4 (210x297мм) у текстовому редакторі Microsoft Word. Розміри полів відступу такі: верхнє, праве, нижнє – 20 мм, лівє – 25 мм. Шрифт Times New Roman – 14 пт; міжрядкова відстань – полуторна, відступ першого рядка – 1,25 см. Наповненість сторінки має становити 75 % від її загального обсягу. Сторінки роботи нумеруються арабськими цифрами від центру зі збереженням наскрізної нумерації всього тексту. Титульну сторінку теж включають до нумерації, але номер сторінки на ній не ставлять.

Ілюстрації необхідно розміщувати безпосередньо після тексту, у якому вони згадуються вперше, або на наступній сторінці. Ілюстрації нумеруються арабськими цифрами (нумерація наскрізна) та вказується «Рисунок», що разом з назвою ілюстрації розміщується під рисунком посередині рядка (наприклад: Рисунок 1 – Схема ввімкнення шунта під час вимірювання струму).

Цифровий матеріал зазвичай оформлюють у вигляді таблиць. Таблицю слід розміщувати безпосередньо після тексту, у якому вона згадується вперше, або на наступній сторінці. Таблиці нумерують наскрізно і дають їм назву «Таблиця», і назва розміщується зліва над таблицею (наприклад: Таблиця 2 – Початкові дані для розрахунків).

Формули та рівняння наводять безпосередньо після тексту, у якому вони згадуються, посередині рядка. Для набору формул у текстовому редакторі

Microsoft Word рекомендується використовувати засіб Microsoft Education з такими розмірами символів: звичайний – 14 пт, великий індекс – 10 пт, дрібний індекс – 7 пт, великий символ – 24 пт, дрібний символ – 12 пт (такі рекомендації стосуються розміру основного шрифту – 14 пт). Нумерація формул наскрізна, номер проставляється в круглих дужках з правого краю того самого рядка. Пояснення символів і числових коефіцієнтів формул слід наводити безпосередньо під формулою, у тій самій послідовності, у якій вони надані в формулі. Перший рядок пояснень починають без абзацу словом «де» без двокрапки. Пояснення кожного символу необхідно починати з нового рядка.

Захист контрольної роботи проводиться у термін, затверджений директором ІЕЕСУ, але не пізніше ніж за тиждень до заліку. Без захисту контрольної роботи студент не допускається до заліку та іспиту.

Ускладнення, що виникають під час виконання контрольної роботи, усуваються під час індивідуально-консультативних занять, які проводить викладач. Графік індивідуально-консультативних занять складається на початку кожного семестру і знаходиться на кафедрі.

2 ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Завдання № 1 Теоретичне завдання № 1

1. Електромашинні датчики швидкості. Тахогенератори постійного струму.
2. Електромашинні датчики швидкості. Асинхронні та синхронні тахогенератори.
3. Імпульсні датчики швидкості. Фото-імпульсні датчики швидкості.
4. Вимірювання швидкості обертання вузлів автоматизованого електроприводу на основі щілинних оптичних датчиків та оптичних датчиків на відбиття.
5. Інкрементальні та абсолютні енкодери.
6. Однообертові та багатообертові абсолютні енкодери.

7. Вимірювання струму та напруги за допомогою резистивних датчиків.
8. Датчики струму та напруги на основі ефекту Холла.
9. Трансформаторні датчики струму та напруги.
10. Датчики струму на основі котушок Роговського.
11. Датчики магнітного потоку.
12. Металеві та напівпровідникові термістори.
13. Термоелектричні датчики.
14. Реалізація теплового захисту електродвигуна.
15. Датчики температури на основі позисторів.
16. Датчики вібрацій.
17. П'єзоелектричні датчики.
18. Тензометричні датчики.
19. Гальванічна розв'язка елементів автоматизованого електроприводу.
20. Заземлення елементів автоматизованого електроприводу.
21. Екранування сигнальних проводів
22. Силові та керуючі елементи систем автоматизованого електропривода.
23. Датчики електромагнітних змінних.
24. Датчики механічних величин.
25. Датчики технологічних змінних.
26. Електричні вимірювання неелектричних величин.
27. Методи боротьби із шумами та перешкодами в системах автоматизованого електропривода.
28. Магніторезистивні датчики струму.
29. Вимірювання сигналів струму та напруги частотно-регульованого електропривода.
30. Вимірювальні комплекси електричних і неелектричних параметрів електромеханічних систем.

**Завдання № 2 Схеми включення та основні параметри
датчиків струму і напруги
Короткі теоретичні відомості**

У системах керування автоматизованого електропривода найбільш широко застосовуються три типи датчиків струму та напруги: резистивні, датчики, засновані на ефекті Холла, і трансформаторні датчики. Зазначені датчики мають свої переваги та недоліки, що визначають галузі їхнього застосування.

Резистивні датчики. Вимірювання сигналів струму за допомогою резистивних датчиків ґрунтується на встановленні шунта в коло вимірювань (рис. 2.1).

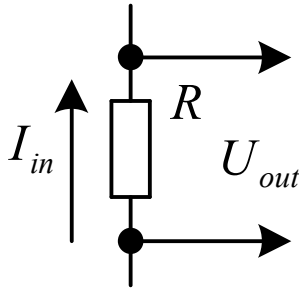


Рисунок 2.1 – Схема ввімкнення шунта під час вимірювання струму

Шунт є низькоомним опором і найпростішим вимірювальним перетворювачем струму на напругу. Шунт характеризується номінальним значенням вихідного струму I_{in} та номінальним значенням вихідної напруги U_{out} . Їхнє відношення визначає номінальний опір шунта:

$$R = \frac{U_{out}}{I_{in}}. \quad (2.1)$$

Шунти застосовують здебільшого у колах постійного струму та під час вимірювань низькочастотних сигналів. Під час вимірювання змінних струмів як шунт може використовуватися конденсатор, якщо навантаження має ємнісний характер, або індуктивність, за індуктивного характеру навантаження.

Вимірювання сигналів напруги за допомогою резистивних датчиків ґрунтується на використанні подільників напруги (рис. 2.2).

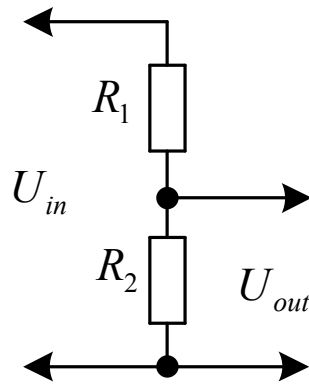


Рисунок 2.2 – Схема резистивного подільника напруги

Подільники напруги призначені для отримання певного співвідношення між вхідною напругою U_{in} та вихідною U_{out} і використовуються на постійному та змінному струмах. Вони виконуються на параметричних елементах: резисторах, конденсаторах, індуктивностях.

Рівняння перетворення, чи коефіцієнт перетворення резистивного подільника напруги на постійному струмі, має вигляд:

$$K_R = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{1 + (R_1 / R_2)}, \quad (2.2)$$

де R_1 і R_2 – опори резисторів верхнього та нижнього плечей подільника.

На змінному струмі коефіцієнт перетворення загалом є комплексною величиною та визначається за рівнянням:

$$K_R = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{1}{1 + (Z_1 / Z_2)}, \quad (2.3)$$

де Z_1 і Z_2 – повні опори відповідних плечей подільника.

Для посилення або обробки сигналів напруги з виходів резистивних датчиків струму та напруги необхідний диференційний підсилювач або операційний підсилювач з достатнім коефіцієнтом підсилення. Для захисту системи вимірювання резистивні датчики потребують використання гальванічної розв'язки, тобто передавання сигналу без електричного контакту. Найбільш сучасними є системи з використанням мікросхем оптичної

гальванічної розв'язки, що, наприклад, може бути забезпечено використанням мікросхем серії HCPL 78XX (рис. 2.3).

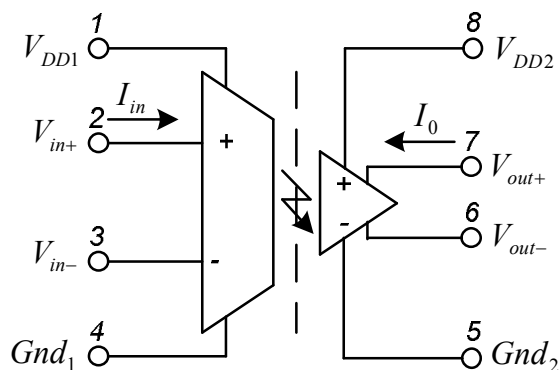


Рисунок 2.3 – Схема виводів підсилювача з гальванічною розв'язкою HCPL 7800A

Резистивні датчики струму широко використовуються під час побудови систем захисту силових перетворювачів постійної та змінної напруги.

Датчики, засновані на ефекті Холла. Компенсаційний датчик струму фірми «LEM» типу LA-25-NP, заснований на ефекті Холла, використовується для перетворення сигналів постійного, змінного та імпульсних струмів на пропорційний вихідний струм з гальванічною розв'язкою між силовими та вимірювальними колами.

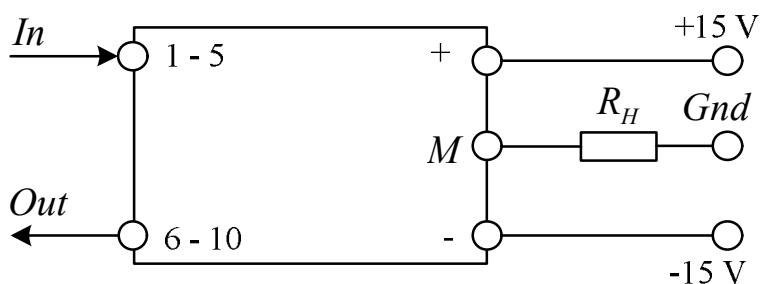


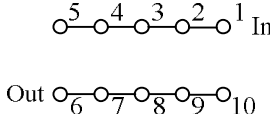
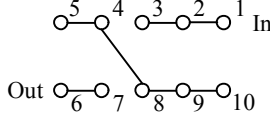
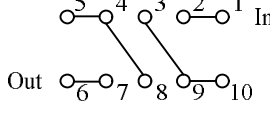
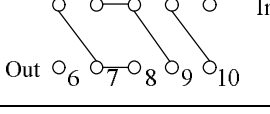
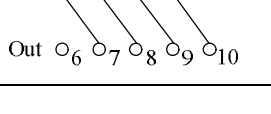
Рисунок 2.4 – Схема підключення датчика струму LA-25-NP

Номінальний вихідний струм I_{SN} має знак «+» тоді, коли вхідний струм I_P протікає від виводів 1, 2, 3, 4, 5 до виводів 10, 9, 8, 7, 6.

Таблиця 2.1 – Паспортні характеристики датчиків LA–25–NP

Електричні параметри				Точнісно-динамічні характеристики				
I_{PN}	Номінальний струм	25 А		x	Точність перетворення за I_{PN} , $T_A=25\text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0,5\%$		
I_P	Діапазон перетворень	0.. ± 36 А		ε_L	Нелінійність	$< 0,2\%$		
R_H	Величина навантажувально го опору		R_{Hmin}	R_{Hmax}	I_O	Початковий вихідний струм за $I_P=0$, $T_A=25\text{ }^\circ\text{C}$	Середн	Максимальне
	За $\pm 15\text{ V}$	0.. ± 25 А	100	320 Ом			ε	$\pm 0,05$
		0.. ± 36 А	100	190 Ом	I_{OM}	Струм зміщення, після перевантаження ($3 \times I_{PN}$)	$\pm 0,05$	$\pm 0,15\text{ mA}$
I_{SN}	Номінальний аналоговий вихідний струм	25 мА		I_{OT}	Температурний дрейф	0 $^\circ\text{C}$..	$\pm 0,1$	$\pm 0,35\text{ mA}$
V_C	Напруга живлення ($\pm 5\%$)	$\pm 15\text{ V}$				-		
I_C	Струм живлення	$10 + I_{SN}$ мА		t_r	Час затримки за 90 % від I_{Pmax}	$< 1\text{ мкс}$		
V_d	Електрична міцність ізоляції, 50 Гц, 1 хв.	2,5 кВ		di/dt	Швидкість наростання вхідного струму	$> 50\text{ A/мкс}$		
V_b	Робоча напруга	600 В		f	Частотний діапазон	0..150 кГц		

Таблиця 2.2 – Схеми з'єднання первинних витків

№	Первинний струм		Номинальний вихідний струм I_{SN} , mA	Коефіцієнт трансформації K_N	Схема включення
	Номинальний струм I_{PN} , A	Максимальний струм I_P , A			
1	25	36	25	1/1000	
2	12	18	24	2/1000	
3	8	12	24	3/1000	
4	6	9	24	4/1000	
5	5	7	25	5/1000	

Переваги датчиків струму фірми LEM: точність, лінійність, низький температурний дрейф, оптимальний час затримки, широкий частотний діапазон, висока перешкодозахищеність, висока перевантажувальна здатність.

Компенсаційний датчик напруги заснований на ефекті Холла фірми «LEM» $LV-25-P$, побудований за принципом перетворення вхідного струму, пропорційного прикладеній напрузі (постійної, змінної, імпульсної), на пропорційний вихідний струм з гальванічною розв'язкою між силовими та вимірювальними колами.

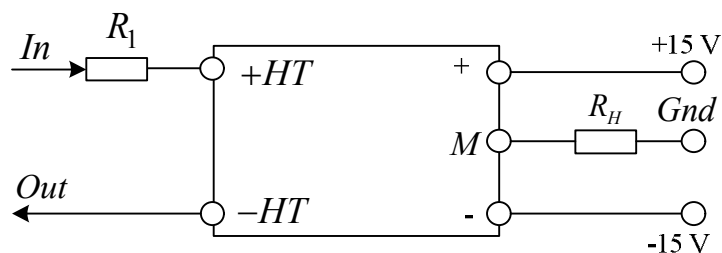


Рисунок 2.5 – Схема підключення датчика напруги $LV-25-P$

Таблиця 2.3 – Паспортні характеристики датчиків LV–25–Р

Електричні параметри				Точнісно-динамічні характеристики					
I_{PN}	Номінальний вхідний струм (ефективне значення)		10 мА		x	Точність перетворення	I_{PN} , $T_A=25$ °C, $V_C=\pm 15$ V	±0,8 %	
I_P	Діапазон перетворень		0.. ±10 мА				I_{PN} , $T_A=25$ °C, $V_C=\pm 15$ V	±0,9 %	
R_H	Величина навантажувального опору		R_{Hmin}	R_{Hmax}	ϵ_L	Нелінійність	< 0,2 %		
	За ±10 мА	±10 мА	30	190 Ом					
	±12 V	±14 мА	30	100 Ом	I_O	Початковий вихідний струм за $i_P=0$, $T_A=25$ °C,	Сер.	Макс.	
	За ±15 V	±10 мА	100	350 Ом				±0,15 мА	
	±14 мА	100	190 Ом						
I_{SN}	Номінальний вихідний струм		25 мА		I_{OT}	Температурний дрейф I_O	0 °C..	±0,06	±0,25
V_C	Напруга живлення (±5 %)		±12..15 В				+25°C..	мА	мА
						+70°C	±0,06	±0,25	
I_C	Струм живлення		$10+I_{SN}$ мА		t_r	Час затримки	40 мкс		
V_d	Електрична міцність ізоляції, 50 Гц, 1 хв.		2,5 кВ						

Принцип дії датчика ґрунтується на тому, що вхідна напруга подається на вхід датчика через зовнішній резистор R_1 (рис. 2.5), величина якого вибирається з урахуванням із номінального вхідного струму датчика.

Оптимальна точність вимірювань досягається за номінальних значень вхідного струму. Величина зовнішнього вхідного резистора має бути такою, щоб за номінального рівня перетворюваної напруги вхідний струм датчика дорівнював 10 мА.

Приклад: вхідна напруга $V_{PN} = 250$ В:

– $R_1 = 25$ кОм, 2,5 Вт, $I_{PN} = 10$ мА, точність ±0,8 % від V_{PN} (за $T_A = 25$ °C);

– $R_1 = 50$ кОм, 1,25 Вт, $I_{PN} = 10$ мА, точність ±1,6 % від V_{PN} (за $T_A = 25$ °C)

Сфери використання датчиків струму та напруги, заснованих на ефекті Холла, фірми «LEM»: частотно-керований електропривод змінного струму; перетворювачі для приводів постійного струму; системи керування роботою акумуляторних батарей; програмовані джерела живлення; джерела безперебійного живлення; джерела живлення для зварювальних автоматів.

Як датчик струму на основі ефекту Холла може бути використаний датчик фірми Allegro MicroSystems, наприклад, ACS750LCA-050, функціональна схема якого наведена на рис. 2.6. Характеристики датчика ACS750LCA-050 наведено в табл. 2.4.

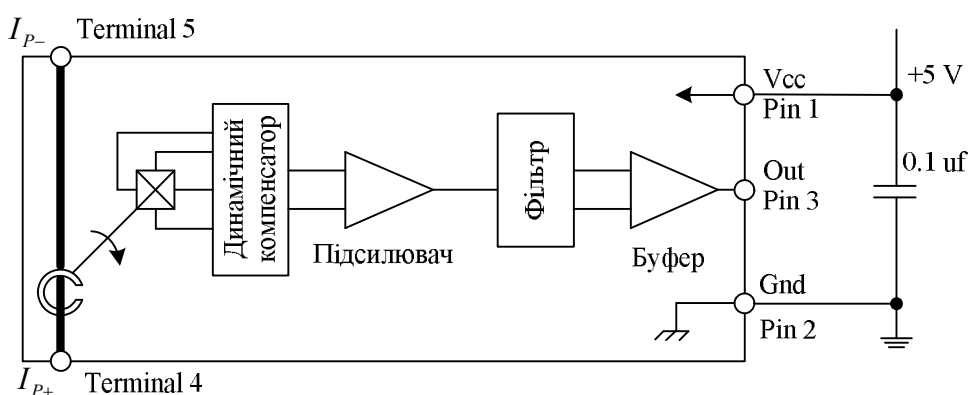


Рисунок 2.6 – Функціональна схема інтегрованих датчиків струму компанії Allegro MicroSystems

Таблиця 2.4 – Характеристики датчика струму ACS750LCA-050

I_p	Лінійний діапазон вимірювання	± 50 А	f	Частотний діапазон	13 кГц
$R_{primary}$ <td>Вхідний опір ($I_p = \pm 100$ А, $T_A = 25$ °C)</td> <td>130 мкОм</td> <td>$V_{OUT(0)}$</td> <td>Напруга, що відповідає нульовому струму</td> <td>2,5 В</td>	Вхідний опір ($I_p = \pm 100$ А, $T_A = 25$ °C)	130 мкОм	$V_{OUT(0)}$	Напруга, що відповідає нульовому струму	2,5 В
R_{OUT} <td>Вихідний опір ($I_{OUT} = 1,2$ мА)</td> <td>1..2 Ом</td> <td>V_{OE}</td> <td>Зсув нуля вихідної напруги</td> <td>± 75 мВ</td>	Вихідний опір ($I_{OUT} = 1,2$ мА)	1..2 Ом	V_{OE}	Зсув нуля вихідної напруги	± 75 мВ
V_{CC} <td>Напруга живлення</td> <td>+ 5 В</td> <td>E_{LIN} <td>Нелінійність</td> <td>5 %</td> </td>	Напруга живлення	+ 5 В	E_{LIN} <td>Нелінійність</td> <td>5 %</td>	Нелінійність	5 %
I_{CC} <td>Споживаний струм</td> <td>10 мА</td> <td>E_{TOT} <td>Точність вимірювань</td> <td>2 %</td> </td>	Споживаний струм	10 мА	E_{TOT} <td>Точність вимірювань</td> <td>2 %</td>	Точність вимірювань	2 %
V_{ISO} <td>Допустима напруга ізоляції, 60 Гц, 1 хв.</td> <td>3 кВ</td> <td>U_{OT} <td>Температурний дрейф</td> <td>4,6 мкВ/°C</td> </td>	Допустима напруга ізоляції, 60 Гц, 1 хв.	3 кВ	U_{OT} <td>Температурний дрейф</td> <td>4,6 мкВ/°C</td>	Температурний дрейф	4,6 мкВ/°C

Оскільки датчик струму має однополярне живлення +5 В, то вихідні сигнали зсунуті на 2,5 В. Для розв'язання проблеми зсуву початкового рівня сигналів може бути використана схема, що зображена на рис. 2.7.

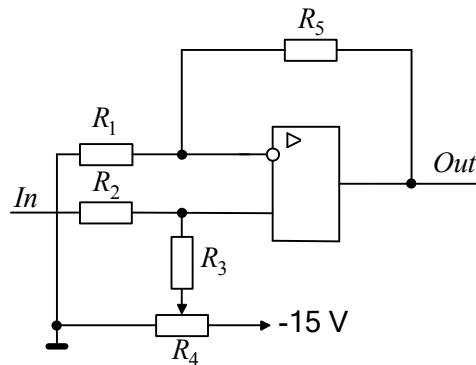


Рисунок 2.7 – Схема зсуву рівня вихідної напруги

Трансформаторні датчики. Для вимірювання сигналів струму та напруги широкого розповсюдження знайшли трансформаторні датчики, які використовуються у системах релейного захисту та системах контролю енергоспоживання.

Трансформатори струму (рис. 2.8) використовують для розділення первинних і вторинних кіл, а також для приведення величини струму до рівня, зручного для вимірювань (стандартний номінальний струм вторинної обмотки дорівнює 1 чи 5 А). У номінальному режимі трансформатори струму працюють у режимі, який наближений до режиму короткого замикання.

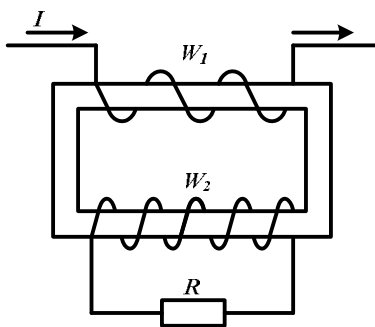


Рисунок 2.8 – Трансформаторний датчик струму

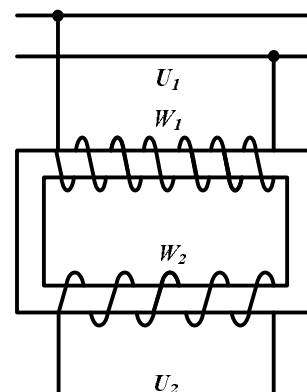


Рисунок 2.9 – Трансформаторний датчик напруги

У системах релейного захисту основною вимогою до трансформаторів струму є точність трансформації вихідного сигналу струму з похибками, які не перевищують допустимі, а саме: за струмом ΔI 10 %, а за кутом $\delta - 7^\circ$.

Як і трансформатори струму, так і трансформатори напруги (рис. 2.9) виконують дві функції: здійснюють гальванічне розділення первинних та вторинних кіл, також змінюють величину напруги до зручного рівня вимірювань (стандартна номінальна напруга вторинної обмотки 100 або 57 В). Трансформатори напруги працюють у режимі, наближеному до режиму неробочого ходу.

До переваг трансформаторних датчиків належить відсутність внесених втрат і напруги зсуву за нульового струму, а також гальванічна розв'язка з високою пробивною напругою. Окрім того, вони не мають потреби в додатковому джерелі живлення. Недоліком трансформаторних датчиків є насичення стрижня за наявності в первинному струмі постійної складової, що призводить до зменшення точності перетворення. Для розв'язання цієї проблеми під час виготовлення стрижня використовують матеріали з високою магнітною проникністю, що збільшує фазовий зсув у колі вимірювань, зменшує динамічний діапазон і термостабільність.

Завдання до теми

1. Для системи електропривода з асинхронним двигуном побудувати систему вимірювань миттєвих значень сигналів струму та напруги електродвигуна на основі резистивних датчиків. Параметри асинхронних двигунів наведено у таблиці 2.5. Номінальний струм двигуна визначається як $I_n = P_n / (3U_n \eta \cos \varphi)$.

Розрахувати номінальні значення опорів та коефіцієнтів перетворення.

2. Побудувати систему вимірювань миттєвих значень сигналів струму та напруги електродвигуна в складі автоматизованого електропривода за допомогою датчиків на основі ефекту Холла.

Вибрати за каталожними даними датчики струму та напруги на основі ефекту Холла. Розрахувати коефіцієнти перетворення датчиків.

3. Побудувати систему вимірювань миттєвих значень сигналів струму та напруги електродвигуна в складі автоматизованого електропривода за допомогою трансформаторних датчиків.

Вибрати за каталожними даними трансформатори струму і напруги та розрахувати їх коефіцієнти перетворення.

Таблиця 2.5 – Варіанти завдання для розрахунку

<i>№ пор.</i>	U_n , В	P_n , кВт	η	$\cos\varphi$
1	220	0,25	0,8	0,75
2	220	0,5	0,7	0,8
3	220	0,75	0,6	0,85
4	220	1	0,85	0,75
5	220	1,5	0,85	0,9
6	220	2	0,7	0,85
7	220	2,2	0,6	0,81
8	220	3	0,87	0,9
9	220	3,5	0,86	0,7
10	220	5,5	0,78	0,8
11	220	0,25	0,85	0,9
12	220	0,5	0,7	0,85
13	220	0,75	0,6	0,81
14	220	1	0,87	0,9
15	220	1,5	0,86	0,7
16	220	2	0,78	0,8
17	220	2,2	0,8	0,75
18	220	3	0,7	0,8
19	220	3,5	0,6	0,85
20	220	5,5	0,85	0,75
21	220	0,25	0,85	0,9
22	220	0,5	0,6	0,85
23	220	0,75	0,85	0,75
24	220	1	0,85	0,9
25	220	1,5	0,7	0,85
26	220	2	0,6	0,81
27	220	2,2	0,6	0,85
28	220	3	0,85	0,75
29	220	3,5	0,85	0,9
30	220	5,5	0,7	0,85

Контрольні питання

1. Поясніть необхідність вимірювання сигналів струму та напруги в системах автоматизованого електропривода.
2. Надайте класифікацію датчиків струму та напруги.
3. Як здійснюється вимірювання струму за допомогою резистивних датчиків?
4. Перелічіть переваги та недоліки резистивних датчиків струму.
5. Охарактеризуйте принципи вимірювання напруги з допомогою резистивних датчиків.
6. Надайте характеристику резистивного подільника напруги. Наведіть коефіцієнт перетворення резистивного подільника на постійному та змінному струмі.
7. Як забезпечується гальванічна ізоляція вихідних сигналів резистивних датчиків?
8. Поясніть принцип дії датчиків струму та напруги, оснований на ефекті Холла.
9. Охарактеризуйте датчики струму компенсаційного типу. Наведіть його структурну схему.
10. Як відбувається вимірювання напруги за допомогою датчиків на основі ефекту Холла?
11. Наведіть структурну схему датчика напруги компенсаційного типу.
12. Перелічіть переваги та недоліки датчиків струму та напруги, оснований на ефекті Холла.
13. Як забезпечується вимірювання струму за допомогою трансформаторних датчиків?
14. Поясніть принцип вимірювання напруги за допомогою трансформаторних датчиків.
15. Перелічіть переваги та недоліки трансформаторних датчиків струму та напруги.

Література: [1, с. 58–75; 2, с. 66–78; 3, с. 138–142;].

Завдання № 3 Вибір і розрахунок підсилювально-перетворювальних елементів термоелектричних датчиків

Короткі теоретичні відомості

Для вимірювання температури у вузлах електромеханічних систем широкого розповсюдження набули *термоелектричні датчики*, які належать до датчиків генераторного типу. Їх робота ґрунтується на термоелектричному явищі – появі термоелектрорушійної сили (термо-ЕРС). Сутність цього явища така: якщо скласти електричне коло з двох різних металевих провідників (або напівпровідників), з одного кінця провідники спаяти (рис. 3.1 а), а місце з'єднання (спай) нагріти, то в такому колі виникає ЕРС. Ця ЕРС буде пропорційна температурі місця спаю (різниці температур місця спаю та вільних, неспаяних, кінців). Коефіцієнт пропорційності залежить від матеріалу провідників та у певному інтервалі температури залишається постійним. Коло, складене з двох різних матеріалів, називають термопарою; провідники, що становлять термопару, називають термоелектродами; місця з'єднання термоелектродів – спаями.

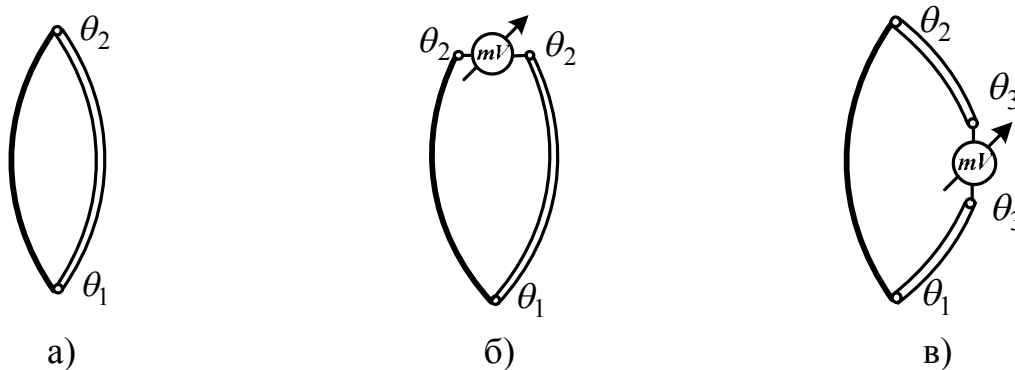


Рисунок 3.1 – Схеми ввімкнення термопар

Для вимірювання термо-ЕРС у коло термопари вмикають вимірювальний прилад (наприклад, мілівольтметр). Мілівольтметр вмикають, розімкнувши вільний спай (рис. 3.1 б), або в розрив одного з термоелектродів (рис. 3.1 в).

Термо-ЕРС, що виробляється термопарою, є різницею двох термо-ЕРС: $e(\theta_1)$ – термо-ЕРС гарячого спаю за температури θ_1 та $e(\theta_2)$ – термо-ЕРС холодного спаю за температури θ_1 , тобто :

$$E = e(\theta_1) - e(\theta_2).$$

До матеріалів для термоелектродів термопар, окрім вимоги отримання великого значення термо-ЕРС, висувають й інші вимоги. Найбільш важливим з них є забезпечення взаємозамінності. Це означає, що термопари такого самого типу повинні мати за однакових температур таку саму термо-ЕРС. У цьому разі заміна термопари не повинна призвести до переналаштування або переградування вимірювальних приладів.

Найбільшого поширення набули термопари типу ТХА (хромель-алюмель) і типу ТХК (хромель-копель). Залежність термо-ЕРС цих термопар від температури зображена на рис. 3.2. Вони здатні працювати в окислювальному середовищі, оскільки під час нагрівання створюється тонка захисна плівка, яка перешкоджає проникненню кисню всередину металу. Окрім перерахованих матеріалів, для термопар використовуються й інші, менш поширені, але такі, що мають свої переваги. Для вимірювання високих температур застосовують термопару з тугоплавких металів – вольфраму та молібдену. У таблиці 3.1 наведено основні типи термопар та їх характеристики.

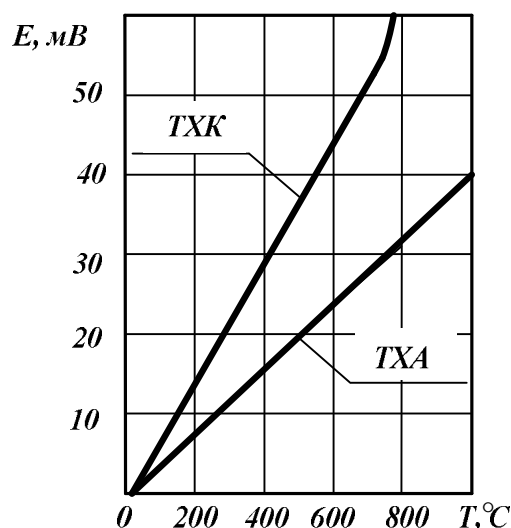


Рисунок 3.2 – Залежності термо-ЕРС від температури

Таблиця 3.1 – Залежність термо-ЕРС термопар від температури

Температура, °C	Термо-ЕРС, мВ		
	Платинородій-платина	Хромель-алюмель	Хромель-копель
-20	-0,109	-0,77	-1,27
0	0	0	0
50	0,301	2,02	3,35
100	0,640	4,10	6,95
400	3,244	16,40	31,49
1100	10,745	45,16	–

Послідовність виконання завдання № 3

Виконати розрахунок пристрою спряження (ПС) датчика температури з аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП). Джерелом сигналу для ПС є термопара (ТП). Вихідні дані для розрахунку:

- $\Delta t = 100..500 \text{ }^\circ\text{C}$ – діапазон температури;
- $K = 20 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ – температурний коефіцієнт термо-ЕРС ТП;
- $U_{\text{ни}} = 10 \text{ В}$ – напруга повної шкали АЦП;
- $\delta \leq 2^\circ\text{C}$ – максимально припустима похибка вимірювання температури;
- $U_n = 2 \text{ мВ}$ – амплітуда перешкоди з частотою 50 Гц на клеммах датчика;
- смуга пропускання $\Delta f = 0..10 \text{ Гц}$ за нерівномірності у смузі не більш $\alpha_1 = 3 \text{ дБ}$;
- амплітуда перешкоди на виході ПС не більш $0,01U_{\text{ни}}$.

З урахуванням умови завдання за $t_{\text{max}} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ напруга на виході ПС дорівнює $U_{\text{ни}} = 10 \text{ В}$, при цьому термо-ЕРС термопари:

$$E = E_{\text{max}} = Kt_{\text{max}}, \quad (3.1)$$

$$E_{\text{max}} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 500 = 0.01 \text{ В.}$$

Загальний коефіцієнт підсилення K_Σ ПС:

$$K_\Sigma = \frac{U_{\text{ни}}}{E_{\text{max}}}, \quad (3.2)$$

$$K_\Sigma = \frac{10}{0,01} = 1000.$$

Напруга перешкоди $U_{n_вих}$ на виході ПС без фільтра складе:

$$U_{n_вих} = U_n K_{\Sigma}, \quad (3.3)$$

$$U_{n_вих} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 2 \text{ В.}$$

Оскільки амплітуда перешкоди U_n не повинна перевищувати 1 % від значення вихідної напруги ПС, тобто, $0,01 \cdot U_{ми} = 0,01 \cdot 10 = 0,1 \text{ В}$, то на виході ПС необхідно встановити фільтр нижніх частот (ФНЧ) зі згасанням α_2 на частоті 50 Гц не менше, ніж:

$$\alpha_2 = \frac{U_{n_вих}}{0,01 \cdot U_{ми}} \text{ разів}, \quad (3.4)$$

$$\alpha_2 = \frac{2}{0,01 \cdot 10} = \frac{2}{0,1} = 20 \text{ разів},$$

або в децибелах:

$$\alpha_2 = 20 \log 20 = 26 \text{ dB.}$$

Згасання сигналу на 26 dB є невеликим, тому можна застосувати фільтр Баттерворта, що забезпечує АЧХ, яка монотонно спадає. Необхідно визначити мінімальний порядок фільтра n , що відповідає вимогам. Мінімальний порядок фільтра вибирається з вимог забезпечення максимально допустимого затухання у полосі пропускання ($\alpha_1 = 3 \text{ dB}$) і мінімально допустимого затухання у полосі затримування ($\alpha_2 = 26 \text{ dB}$), та визначається виразом, виду:

$$n \geq \frac{\lg(10^{\alpha_2/10} - 1)}{2 \lg(\omega_1/\omega_3)}, \quad (3.5)$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_3} = \frac{TW}{\omega_3} + 1 = \frac{50 - 10}{10} + 1 = 5, \quad (3.6)$$

де $TW = \omega_1 - \omega_3$ – максимально допустима ширина перехідної області; $\omega_1 = 50 \text{ Гц}$, $\omega_3 = 10 \text{ Гц}$ – відповідно частота перешкоди та верхня гранична частота смуги пропускання.

Підставивши визначені дані у (3.5), отримаємо:

$$n \geq \frac{\lg(10^{2,6} - 1)}{2 \lg(5)} = \frac{2,6}{1,4} \approx 1,8.$$

Отже, для порядку фільтра вибираємо найближче більше дійсне значення, у результаті, може бути використаний фільтр 2-го порядку.

Отже, ПС складатиметься з послідовно ввімкнених масштабувального підсилювача (МП) та ФНЧ Баттерворта 2-го порядку.

Масштабувальний підсилювач виконаємо на основі схеми ОП без інвертування вхідного сигналу, що характеризується найбільшим вхідним опором. Для збереження позитивної полярності $U_{вих}$ ФНЧ також повинен мати позитивний коефіцієнт посилення. Даній умові відповідає схема ФНЧ на основі джерела напруги, керованого напругою (ДНКН), рисунок 3.3.

Якщо коефіцієнт підсилення K_{Σ} реалізувати за допомогою МП, то за вимірюваної температури, близькій до t_{max} , підсилювач може вийти з лінійної області, отже необхідно частину підсилення реалізувати за допомогою ФНЧ. Візьмемо $K_{фнч} = 2$, у цьому випадку:

$$K_{мп} = \frac{K_{\Sigma}}{K_{фнч}}, \quad (3.7)$$

$$K_{мп} = \frac{1000}{2} = 500.$$

Для ФНЧ Баттерворта 2-го порядку значення коефіцієнтів B та C : $B = 1,4142$, $C = 1,00$.

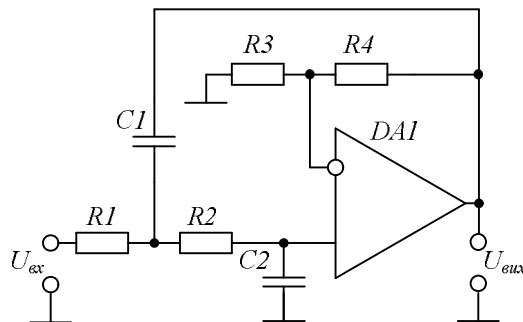


Рисунок 3.3 – Схема фільтра Баттерворта нижніх частот 2-го порядку на ДНКН

Значення ємності $C2$ вибираємо близьким до значення $\frac{10}{\omega_3} = \frac{10}{10} = 1,0$ мкФ.

Беремо $C2 = 1,0$ мкФ. Номінальне значення $C1$ має відповідати нерівностям:

$$C1 \leq \left(B^2 + 4C(K_{фнч} - 1) \right) \frac{C2}{4C} \text{ мкФ}; \quad (3.8)$$

$$C1 \leq \left(1,4142^2 + 4(2-1) \right) \cdot \frac{1,0}{4} = 1,5 \text{ мкФ}.$$

Беремо $C1 = 1,0$ мкФ.

Визначаємо опір резистора $R1$:

$$R1 = \frac{2}{\left(BC2 + \sqrt{(B^2 + 4C(K_{\text{фнч}} - 1)) \cdot C2^2 - 4C \cdot C1 \cdot C2} \right) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_3}, \quad (3.9)$$

$$R1 = \frac{2}{\left(1,4142 \cdot 1 \cdot 10^{-6} + \sqrt{((1,4142)^2 + 4(2-1)) \cdot 10^{-12} - 4 \cdot 10^{-12}} \right) \cdot 6,28 \cdot 10^3} =$$

$$= \frac{2}{(1,4142 \cdot 10^{-6} + 1,4142 \cdot 10^{-6}) \cdot 62,8} = 0,0773 \cdot 10^6 \text{ Ом} =$$

$$= 7,73 \cdot 10^4 = 77,3 \text{ кОм}$$

Беремо найближче стандартне значення ряду E192 $R1 = 77,7$ кОм.

Знаходимо опір $R2$:

$$R2 = \frac{1}{C \cdot C1 \cdot C2 \cdot R1 \cdot \pi^2 \cdot f_3^2}, \quad (3.10)$$

$$R2 = \frac{1}{10^{-6} \cdot 10^{-6} \cdot 77,3 \cdot 10^3 \cdot 3,14^2 \cdot 100} = \frac{10^7}{762,15} = 1,31 \cdot 10^5 \text{ Ом} = 131 \text{ кОм}.$$

Беремо найближче стандартне значення $R2 = 132$ кОм.

Визначаємо опори резисторів $R3$ та $R4$:

$$R3 = \frac{K_{\text{фнч}}(R1 + R2)}{(K_{\text{фнч}} - 1)}, \quad (3.11)$$

$$R3 = \frac{2 \cdot (77,3 + 131)}{(2 - 1)} = 416,6 \text{ кОм},$$

$$R4 = K_{\text{фнч}}(R1 + R2), \quad (3.12)$$

$$R4 = 2 \cdot (77,3 + 131) = 416,6 \text{ кОм}.$$

Вибираємо $R3 = R4 = 417$ кОм.

Похибка $\delta \leq 2^\circ \text{ C}$ на виході ПС відповідає похибці на виході ФНЧ $\Delta U_{\text{вих}}$, що дорівнює:

$$\Delta U_{\text{вих}} \leq KK_{\Sigma} \delta, \quad (3.13)$$

$$\Delta U_{\text{вих}} \leq 20 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 \cdot 2 = 40 \cdot 10^{-3} = 40 \text{ мВ}.$$

Прийнявши резистори типу С2–29В та конденсатори типу К71-4, у яких похибка номіналів не перевищує 0,01 %, можна вважати, що похибка вихідної напруги $\Delta U_{\text{вих}}$ обумовлена типом операційного підсилювача і не більше:

$$\Delta U_{\text{фнч}} \leq K_{\text{фнч}} U_{\text{зн}} = 2U_{\text{зн}}, \quad (3.14)$$

де $U_{\text{зн}}$ – напруга зміщення нуля.

Прийнявши, що $\Delta U_{\text{фнч}}$, обумовлене $\Delta U_{\text{зн}}$ застосовуваного ФНЧ, не має перевищувати 1/3 загальної похибки $\Delta U_{\text{вих}}$, тобто:

$$\Delta U_{\text{фнч}} \leq \frac{1}{3} \Delta U_{\text{вих}}, \quad (3.15)$$

звідки отримаємо:

$$U_{\text{зн}} \leq \frac{1}{3} \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{2} = \frac{1}{3} \frac{40 \cdot 10^{-3}}{2} \approx 7 \cdot 10^{-3} \text{ В} = 7 \text{ мВ}.$$

За визначеними даними вибираємо мікросхему ОП типу К140УД14 з напругою зміщення нуля $U_{\text{зн}} \leq 5 \text{ мВ}$, знехтувавши малими вхідними струмами ($I_{\text{вх}} \leq 5 \text{ нА}$) і низькою споживаною потужністю ($I_{\text{н}} \leq 1 \text{ мА}$). Високий коефіцієнт підсилення ($K \geq 50 \cdot 10^3$) дозволяє зневажити його впливом на точність коефіцієнта передачі фільтра.

Масштабувальний підсилювач виконаємо за схемою, наведеною на рис. 3.4.

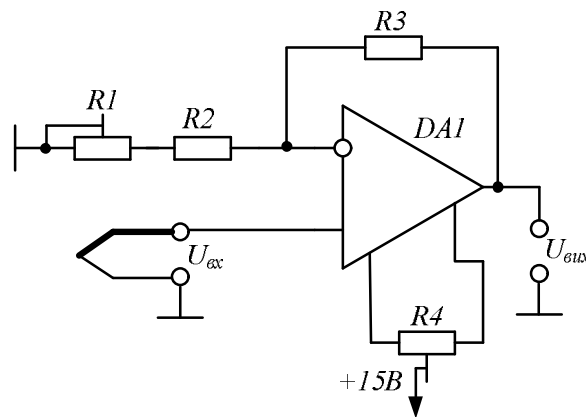


Рисунок 3.4 – Схема масштабувального підсилювача

У цій схемі $R4$ призначений для початкового балансування ОП, $R1$ – для точного регулювання підсилення МП під час настроювання. Щоб значення $\Delta U_{\text{вих}}$ на виході ФНЧ не перевищувало значення, визначеного за формулою (3.15), зміщення нуля $U_{\text{зн}}$ ОП МП не має перевищувати:

$$U_{\text{зн}} = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{K_{\Sigma}}, \quad (3.16)$$

$$U_{\text{зн}} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{10^3} = 40 \cdot 10^{-6} \text{ В} = 40 \text{ мкВ}.$$

Візьмемо як ОП МП К140УД17А з $U_{\text{зн}} = 70 \text{ мкВ}$. Під час регулювання за допомогою $R4$ $U_{\text{зн}}$ може бути знижено більше, ніж на порядок.

Коефіцієнт підсилення масштабувального підсилювача визначається за формулою:

$$K_{mn} = \frac{R3}{R1+R2} + 1. \quad (4.17)$$

Якщо номінальне значення $K_{mn} = 500$, то:

$$500 = \frac{R3}{R1+R2} + 1 \rightarrow 499 = \frac{R3}{R1+R2}.$$

Звідси $R3 = 499(R1 + R2)$.

Прийнявши $R1 + R2 = 1 \text{кОм}$, що дозволяє знехтувати впливом вхідних струмів ОП, одержимо $R3 = 499 \text{кОм}$ (Е192). Задавши діапазон регулювання K_{Σ} у межах $\pm 10\%$ від номінального значення, отримаємо $R1 = 220 \text{Ом}$, $R2 = 900 \text{Ом}$. Остаточно для ряду Е192 отримаємо $R2 = 909 \text{Ом}$ $R3 = 499 \text{кОм}$. Як $R1$ використовуємо прецизійний 40-обертовий підстроювальний резистор типу СП5–2, $R2$ та $R3$ – типу С2–29 В.

Завдання до теми

Провести розрахунок пристрою спряження термопари з АЦП, використовуючи дані з таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Варіанти завдань

№ варіанта	Діапазон температур, °С	K , мкВ/°С	δ , °С	U_n , мВ
1	50...400°С	40	3	5
2	100...800°С	50	1,5	4
3	50...1000°С	60	2	6
4	50...400°С	30	2,5	7
5	100...800°С	10	1	3
6	100...400°С	50	3	5
7	50...800°С	60	1,5	4
8	100...1000°С	20	2	6
9	50...400°С	10	2,5	7
10	0...800°С	30	1	3
11	50...800°С	40	3	5
12	20...400°С	50	1,5	4
13	20...800°С	60	2	6
14	50...1000°С	30	2,5	7
15	20...400°С	10	1	3

Продовження таблиці 3.2

№ варіанта	Діапазон температур, °C	K , мкВ/°C	δ , °C	U_n , мВ
1	50...400°C	30	3	5
2	100...800°C	40	1,5	4
3	50...1000°C	50	2	6
4	50...400°C	20	2,5	7
5	100...800°C	30	1	3
6	100...400°C	40	3	5
7	50...800°C	50	1,5	4
8	100...1000°C	10	2	6
9	50...400°C	20	2,5	7
10	0...800°C	40	1	3
11	50...800°C	30	3	5
12	20...400°C	40	1,5	4
13	20...800°C	50	2	6
14	50...1000°C	20	2,5	7
15	20...400°C	30	1	3

Контрольні питання

1. Яку функцію виконують датчики первинної інформації в системах автоматизованого електропривода?
2. Які датчики використовують для вимірювання температури?
3. Поясніть зміст явища термоелектрики.
4. Як визначається термо-ЕРС термопар?
5. Які існують типи термопар, матеріалів, що використовуються для термопар?
6. Від чого залежить вибір порядку фільтра?
7. Що таке перехідна область, від чого вона залежить?
8. Наведіть схеми можливих масштабувальних підсилювачів і надайте їх характеристику.
9. Як визначають коефіцієнти підсилення масштабувальних підсилювачів, з інвертуванням та без інвертування вхідного сигналу?
10. Назвіть основні параметри для вибору типу ІМС ОП?

Література: [3, с. 20–30; 10, с. 228–259; 11, с. 154–171].

Завдання № 4 Теоретичне завдання № 2

1. Амплітудний метод керування тиристорами.
2. Горизонтальний метод керування тиристорами.
3. Вертикальний метод керування тиристорами.
4. Схемотехнічні рішення та принцип дії блока синхронізації.
5. Схемотехнічні рішення та принципи підсилення імпульсів керування тиристорів і симісторів.
6. Типові схеми захисту тиристорів і симісторів.
7. Розрахунок снаберних кіл тиристорів.
8. Принципи керування силовими ключами з використанням спеціальних драйверів.
9. Схеми реверсивного широтно-імпульсного перетворювача, режими роботи.
10. Драйвери силових транзисторів.
11. Керування транзисторами з використанням бутстрепного каскаду живлення.
12. Способи керування IGBT транзисторами.
13. Захист мостових схем імпульсних перетворювачів напруги від наскрізних струмів.
14. Вплив температури на параметри силових ключів. Граничні характеристики напівпровідникових ключів.
15. Потужність утрат у напівпровідникових елементах. Складові потужності втрат.
16. Потужність комутаційних утрат тиристорів.
17. Потужність комутаційних утрат транзисторів.
18. Вимоги до систем захисту напівпровідникових перетворювачів.
19. Елементи захисту силових транзисторних ключів за струмом.
20. Елементи для обмеження перенапруг силових транзисторних ключів.
21. Охолодження силових напівпровідникових приладів.

22. Природне та примусове охолодження силових напівпровідникових ключів.
23. Вибір радіаторів охолодження силових транзисторів.
24. Силова частина безпосередніх перетворювачів частоти з природною комутацією.
25. Безпосередні перетворювачі частоти зі штучною комутацією.
26. Драйвери керування трифазними інверторами напруги.
27. Перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму.
28. Формування сигналів керування у автономних інверторах напруги.
29. Перетворювач з автономним інвертором напруги та з автономним інвертором струму.
30. Методи розрахунку температури нагрівання напівпровідникової структури.

Завдання № 5 Розрахунок і вибір елементів силових кіл тиристорних перетворювачів енергії

Короткі теоретичні відомості

Тиристри є найбільш потужними напівпровідниковими ключами, здатними комутувати кола з напругою до 5 кВ і струмами до 5 кА з частотою не більше 1 кГц. На сьогодні розроблено велику кількість різновидів тиристорів, що вирізняються швидкодією, методами керування, напрямком струмів у провідному стані. Серед них слід назвати такі типи:

– тиристор-діод, який еквівалентний тиристорі із зустрічно-паралельно ввімкненим діодом (рис. 5.1 б);

– діодний тиристор (діністор), що переходить у провідний стан у разі перевищення певного рівня напруги, прикладеної між анодом і катодом (рис. 5.1 в);

– симетричний тиристор або симістор, який еквівалентний двом зустрічно-паралельно ввімкненим тиристорам (рис. 5.1 г);

– швидкодієвий інверторний тиристор (час вимкнення - 5–50 мкс);

– тиристор з польовим керуванням за допомогою електрода керування, наприклад, на основі комбінації МОП-транзистора з тиристором;

– оптотиристор, керування яким відбувається за допомогою світлового потоку.

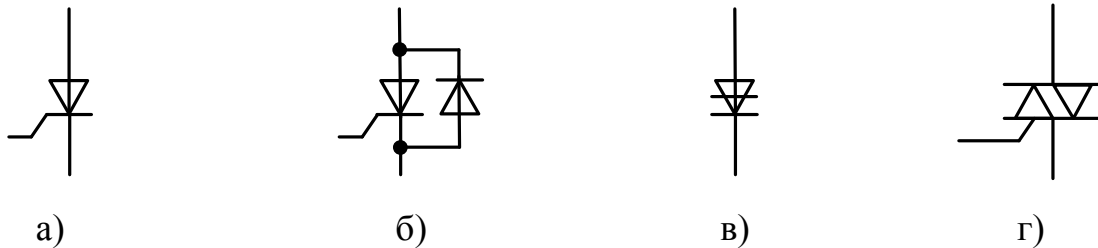


Рисунок 5.1 – Умовно-графічне позначення тиристорів:

а) тиристор; б) тиристор-діод; в) діодний тиристор (динистор); г) симістор

Як силові елементи керування широкого розповсюджені також симістори (рис. 5.1 г). Симістор – напівпровідниковий елемент, призначений для комутації навантаження у мережі змінного струму. Він являє собою двонаправлений тиристор і має три електроди: один керувальний і два основні для пропускання робочого струму. Особливістю симістора є здатність проводити струм як від анода до катода, так і у зворотному напрямку.

На відміну від тиристорів, симістор може керуватися як позитивним, так і негативним струмом між затвором і катодом. Ця властивість дозволяє симістору працювати в усіх чотирьох квадрантах (рис. 5.2). Для керування режимом роботи симістора використовується низьковольтний сигнал, що подається на електрод керування симістора. При подачі напруги на електрод керування симістор переходить із закритого стану у відкритий і пропускає через себе струм. У стандартних колах керування фазою змінного струму, таких як регулятори яскравості та регулятори швидкості обертання, керування проводиться завжди у квадрантах 1+ та 3- (рис. 5.2), у яких комутувальні параметри симістора однакові.

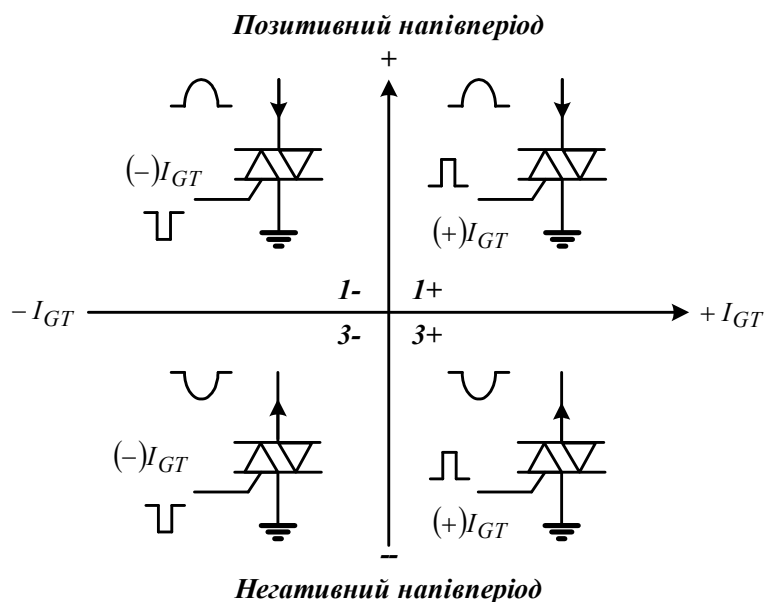


Рисунок 5.2 – Варіанти керування симісторами

Розрахунок і вибір напівпровідникових ключів, що використовуються у перетворювальних приладах, проводиться за необхідними експлуатаційними характеристиками та за ідеалізації силових ключів, у яких час увімкнення, час вимкнення та падіння напруги дорівнює нулю.

Розрахунок і вибір силових напівпровідникових ключів відбувається за такими вихідними даними:

- максимально допустима амплітуда імпульсної робочої напруги чи постійної робочої напруги, що прикладається до одного напівпровідникового ключа чи декількох ключів, з'єднаних у групу;

- максимально допустимий струм вихідного кола ключа, що включає в себе середні, імпульсні та ударні струмові параметри ключа, а також струми витoku в закритому стані;

- максимально допустимі швидкості зміни струму і напруги, відповідно у відкритому та закритому станах ключа, а також паразитні ємності та індуктивності;

- частота імпульсів струму еквівалентного вентиля;

- кут відпирання, кут провідності та форма струму ключа;

- необхідна тривалість імпульсів керування;

- часові параметри ввімкнення та вимкнення, які характеризують тривалість перехідних процесів та їх складові етапи;

– спосіб охолодження ключа (природне чи штучне охолодження) і вид охолоджувального середовища (повітряне чи водне середовище);

– максимальна та мінімальна температура середовища охолодження;

– число температурних циклів роботи силового ключа.

Також вибір напівпровідникових ключів необхідно проводити так, щоб за всіх можливих умов його роботи значення будь-якого впливу на ключ не перевищувало допустимі значення відповідних параметрів. За кожним параметром між його допустимим значенням і значенням фактичного впливу на ключ за даним параметром необхідно мати певний запас за всіх можливих експлуатаційних умов роботи.

Запас за кожним з параметрів вибирається з умови отримання необхідних техніко-економічних показників перетворювального приладу, при цьому вибраний напівпровідниковий ключ матиме параметри, за яких забезпечуються прийнятні значення потужності втрат і достатня його перевантажувальна здатність за основними впливами. Загалом можна виокремити такі техніко-економічні показники: мінімальна потужність втрат під час експлуатації; економія енергії; висока надійність; погоджений оптимум за затратами та надійністю.

Рекомендовані коефіцієнти запасу за головними параметрами напівпровідникових ключів, залежно від техніко-економічних показників, подано в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Рекомендовані значення коефіцієнтів запасу

Показник	Коефіцієнти запасу		
	За напругою	За струмом	За температурою
Мінімальна потужність втрат	0,5..0,6	0,4..0,6	1
	0,4..0,5		
Економічність у виробництві	0,6..0,67	0,8..1	1
	0,4..0,5		
Надійність	0,4..0,5	0,5..0,7	0,7..0,8
	0,3..0,4		
Погоджений оптимум	0,5..0,6	0,6..0,8	0,8..0,9

Захист напівпровідникових ключів. Структура тиристорів і симісторів є критичною до швидкостей наростання прямого струму di/dt і прямої напруги du/dt . Під час переходу напівпровідникових ключів із закритого стану в провідний зовнішнім колом може бути викликаний значний струм. Водночас миттєвого падіння напруги на виводах ключів не відбувається. Отже, одночасно є напруга і струм, що розвивають миттєву потужність, яка може досягти значних величин. Енергія, розсіяна в малому просторі, викличе різке підвищення температури у структурі тиристорів і симісторів. Якщо критична температура буде перевищена, то відбудеться руйнування ключа, викликане надмірною швидкістю наростання струму di/dt .

Обмеження також поширюються на зміну напруги двох категорій: на du/dt відповідно до закритого ключа та на du/dt за відкритого ключа (останнє також називають швидкістю перемикавання).

Надмірна швидкість збільшення напруги, прикладеної між виводами закритого ключа, може викликати його відкриття за відсутності сигналу на електроді керування, що пояснюється наявністю внутрішньої ємності. Однак це не є основною причиною несвоєчасного відкриття. Максимальна величина du/dt під час перемикавання ключа зазвичай дуже мала, і занадто швидка зміна напруги на його виводах у момент відключення може відразу ж викликати нове ввімкнення. Отже, ключ знову відкривається у той час, коли повинен закритися.

Тому для захисту тиристорів зазвичай використовують різні схеми, які в динамічних режимах здійснюють захист від неприпустимих значень di/dt і du/dt . Для цього зазвичай використовують RC -кола (снабери) (рис. 5.3 а, 5.3 б) чи RCD -кола (рис. 5.3 в), що підключаються паралельно тиристорі чи симісторі. Існують різні схемотехнічні модифікації RC -кіл і методики розрахунку їх параметрів для різних умов використання тиристорів і симісторів.

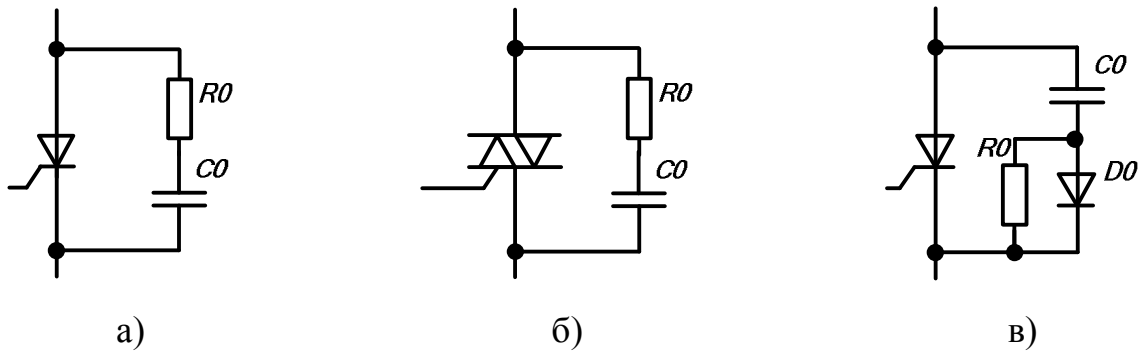


Рисунок 5.3 – Типові схеми захисту тиристорів (а), симісторів (б) на основі RC -кіл і RCD -кіл (в)

Розрахунок параметрів снаберних кіл залежить від декількох параметрів, серед яких – величина струму навантаження, значення індуктивності та номінального опору навантаження, робочої напруги, характеристик тиристора чи симістора. Зазвичай під час вибору елементів захисних кіл (демпферних кіл) використовують такий підхід.

1. Захисну ємність C_0 вибирають з умови забезпечення допустимої швидкості зміни анодної напруги:

$$C_0 \geq \frac{I_{TM}}{\left(\frac{du}{dt}\right)_{KP}}, \quad (5.1)$$

де I_{TM} – максимальний анодний струм перед комутацією; $\left(\frac{du}{dt}\right)_{KP}$ – критична швидкість збільшення анодної напруги.

2. Опір R_0 вибирається на напругу, до якої заряджається захисний конденсатор, і на необхідну потужність розсіювання енергії. Величина R_0 обмежена знизу допустимою амплітудою струму увімкнення ключа, а зверху – швидкістю повного розряду C_0 протягом тривалості відкритого стану ключа t_n :

$$\frac{U_0}{I_{TO}} < R_0 < \frac{t_n}{3C_0}, \quad (5.2)$$

де U_0 – напруга на захисному конденсаторі перед увімкненням ключа, I_{TO} – допустимий струм увімкнення ключа.

Значення захисного опору має бути набагато меншим (або одного порядку), ніж величина повного навантаження, будучи досить високим для того, щоб обмежити струм розряду конденсатора для дотримання максимального значення di/dt у момент відключення.

Потужність, що розсіюється на резисторі, визначається за формулою:

$$P_0 = 0.5C_0U_0f, \quad (5.3)$$

де f – частота комутації ключа.

3. Демпферний діод вибирається за класом напруги, що відповідає силовому ключу та середньому струмові на порядок меншому, ніж середній струм ключа. Цей діод має бути високочастотним із швидким відновленням.

Сумарна потужність, що розсіюється на ключі та в демпферному колі, постійна і визначається струмом навантаження та індуктивністю анодного кола. Тому чим більша потужність, що виділяється на R_0 , тим менша потужність втрат у структурі ключа, що покращує умови його вимкнення.

Захист симісторів від перенапруг також може бути забезпечений за допомогою увімкнених паралельно нелінійних елементів, опір яких зменшується під час збільшення напруги. За великої напруги на ключі вони шунтують його силове коло. Через високу крутизну імпульсів перенапруг вони можуть бути усунені за допомогою металооксидних варисторів (рис. 5.4).

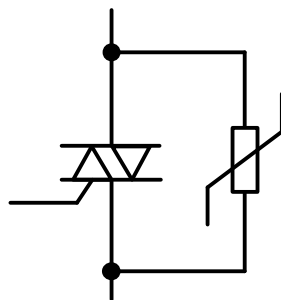


Рисунок 5.4 – Захист симісторів за допомогою варистора

Додатковий захист, що заслуговує на увагу, може бути забезпечений за допомогою варистора, підімкненого до виводів індуктивного навантаження. Інший варистор, увімкнений паралельно мережі живлення, затримує

перешкоди, що поширюються з мережі живлення. Схема комбінованого захисту напівпровідникового ключа наведена на рис. 5.5.

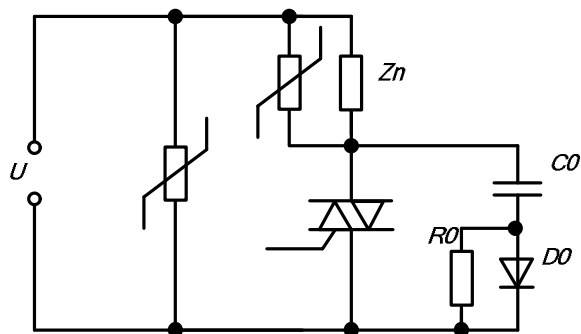


Рисунок 5.5 – Комбінований захист напівпровідникового ключа

Завдання до теми

1. Відповідно до варіанта завдання (табл. 5.2) розрахувати та вибрати силові тиристорні ключі для пристрою плавного пуску асинхронного двигуна. Під час розрахунків максимальний струм тиристора визначається як $I_{TM} = 2,5I_n$ (I_n – номінальний струм двигуна $I_n = P_n / (3U_n \eta \cos \phi)$). Параметри силових тиристорних ключів наведені в додатку А (табл. А.1).

2. Для вибраних тиристорних ключів розрахувати параметри та вибрати захисні демпферні кола.

3. Згідно з довідковою літературою вибрати варистори для захисту тиристорних ключів.

Таблиця 5.2 – Варіанти завдання для розрахунку

№ пор.	U_n , В	P_n , кВт	η	$\cos \phi$
1	220	0,25	0,8	0,75
2	220	0,5	0,7	0,8
3	220	0,75	0,6	0,85
4	220	1	0,85	0,75
5	220	1,5	0,85	0,9
6	220	2	0,7	0,85
7	220	2,2	0,6	0,81
8	220	3	0,87	0,9
9	220	3,5	0,86	0,7
10	220	5,5	0,78	0,8
11	220	0,25	0,85	0,9
12	220	0,5	0,7	0,85

Продовження таблиці 5.2

13	220	0,75	0,6	0,81
14	220	1	0,87	0,9
15	220	1,5	0,86	0,7
16	220	2	0,78	0,8
17	220	2,2	0,8	0,75
18	220	3	0,7	0,8
19	220	3,5	0,6	0,85
20	220	5,5	0,85	0,75
21	220	0,25	0,85	0,9
22	220	0,5	0,6	0,85
23	220	0,75	0,85	0,75
24	220	1	0,85	0,9
25	220	1,5	0,7	0,85
26	220	2	0,6	0,81
27	220	2,2	0,6	0,85
28	220	3	0,85	0,75
29	220	3,5	0,85	0,9
30	220	5,5	0,7	0,85

Контрольні питання

1. Назвіть переваги та недоліки тиристорних перетворювачів напруги.
2. Надайте класифікацію керованих випрямлячів.
3. Поясніть принцип дії тиристорів і надайте їх класифікацію.
4. Охарактеризуйте особливості роботи симісторів.
5. За якими параметрами розраховують і вибирають силові напівпровідникові ключі?
6. Як вибирається коефіцієнт запасу? Наведіть рекомендовані значення коефіцієнтів запасу.
7. Поясніть необхідність установаження додаткових кіл захисту силових тиристорів.
8. Надайте типові схеми захисту тиристорів.
9. Як розраховуються снаберні кола тиристорів?
10. Надайте типові схеми захисту симісторів.

Література: [5, с. 38–55; 6, с. 36–78; 7, с. 138–142; 8, с. 98–103].

Завдання № 6 Розрахунок і вибір елементів силових кіл транзисторних перетворювачів енергії

Короткі теоретичні відомості

Силові напівпровідникові ключі можуть вийти з ладу або внаслідок електричного пробою, обумовленого високою напругою, або внаслідок теплового пробою через перегрів струмами. При цьому зазвичай пробій напівпровідникового ключа призводить до виникнення аварії та протікання великих струмів у непошкоджених ключах.

Режими, що характеризуються протіканням великих аварійних струмів, можна розділити на дві групи: зовнішні аварії, викликані коротким замиканням у навантаженні або в мережі живлення, та внутрішні аварії, зумовлені пошкодженням окремих напівпровідникових ключів, або порушеннями в системах керування перетворювачами. При цьому часто зовнішні аварії призводять до пошкодження ключів і до розвитку внутрішніх аварій.

Через чутливість напівпровідникових елементів до перевантажень, коротких замикань і перенапруг для забезпечення надійної роботи перетворювачів до систем захисту висувають такі основні вимоги:

- максимальну швидкодію для обмеження аварійних струмів за тривалістю та амплітудою;
- обмеження усіх видів зовнішніх і внутрішніх перенапруг до допустимого рівня;
- відключення пошкодженої ділянки не має призводити до виникнення додаткових навантажень на робочі ключі та неприпустимих перенапруг на них;
- можливість застосування автоматичного повторного ввімкнення перетворювачів після спрацювання захисту за умови ліквідації аварійного процесу.

Перехідні процеси в колах напівпровідникових перетворювачів супроводжуються виникненням перенапруги зазвичай зумовленими різкою зміною струму в індуктивностях. До основних видів перенапруг, що впливають на напівпровідникові ключі, належать такі:

– перенапруги, зумовлені фізичними процесами в напівпровідникових ключах у моменти комутації струму;

– комутаційні перенапруги, що виникають у моменти відключення кіл з індуктивностями;

– перенапруги, зумовлені резонансними явищами в перетворювачах;

– зовнішні перенапруги, що надходять з мережі живлення.

Розробка силового перетворювача електричної енергії вимагає ретельної конструктивної проробки, компактного розміщення силових елементів, мінімізації електричних зв'язків між ними. Це пов'язано з тим, що силові напівпровідникові ключі схильні до потенційного пробоя, і якщо вхідну напругу, що подається на ключ, можна легко врахувати, то перенапруги, що виникають на паразитних індуктивностях схеми, підлягають прогнозуванню набагато гірше.

Зазвичай пробій транзисторного ключа напругою можна розділити на пробій переходу «затвор-емітер» і переходу «колектор-емітер».

Перенапруга на переході «затвор-емітер» може бути викликана несправністю драйвера чи наводками на лінії зв'язку драйвера з транзистором. Для уникнення цих проблем достатньо між затвором і емітером установити обмежувач напруги (зазвичай на 18 В); ємність затвора сама знизить dU/dt до значень, з якими впорається обмежувач, до того ж у більшості транзисторів затвор виходить з ладу за напруги не менше 35..45 В, а отже, є істотний запас для гасіння імпульсу перенапруги. Єдина обов'язкова вимога – обмежувач має бути встановлений якомога ближче до транзистора. Стосовно типу обмежувача і взагалі вибору між стабілітроном і обмежувачем, то різниці тут майже немає.

Перенапруги на переході «колектор-емітер». Якщо швидкість протікання перехідних процесів за струмом у разі виходу з ладу силових напівпровідників надають час на прийняття рішення про захист, то перенапруги цього не дозволяють зробити, оскільки для транзистора достатньо всього кілька наносекунд, щоб вийти з ладу, а за такий час жоден захист не встигне спрацювати. Тому запобігати перенапругам слід іншими методами. Існує два основних способи боротьби: активний та пасивний. Активний передбачає таке

керування транзистором, за якого мінімізуються викиди напруги; до нього належать активний захист і плавне вимикання.

Найпростіший спосіб організації активного захисту – це плавне вимикання транзистора. Зазвичай для формування плавного вимикання між вихідним колом драйвера та затвором транзистора встановлюється резистор великого номіналу. Результатом є тривалий режим розряду ємності затвора і менша швидкість вимикання.

Активний захист зазвичай підключається за необхідності, і, відповідно, не призводить до збільшення динамічних утрат у штатному режимі роботи, але поступається своєю швидкодією і простотою реалізації пасивного захисту. Пасивний захист, на відміну від активного, увімкнений завжди, незалежно від того, чи потрібен у даний момент захист, чи ні. Цей захист може бути поданий двома способами: зниження dU/dt і обмеження перенапруги. До першого належать різні снабери, до другого – варистори та обмежувачі.

Розглянемо причини виникнення перенапруг в імпульсному перетворювачі напруги, схема якого наведена на рис. 6.1.

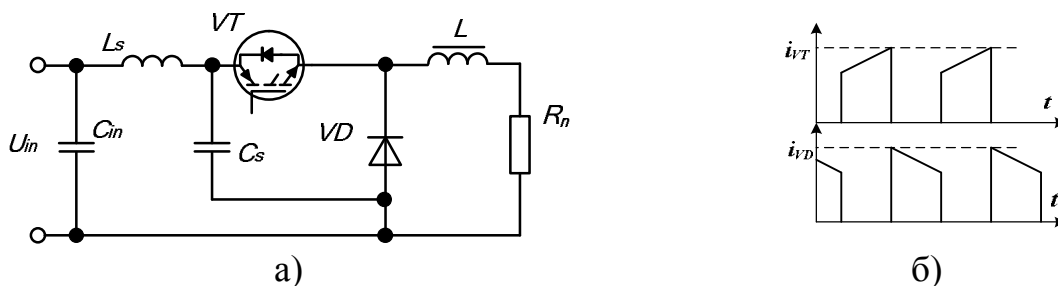


Рисунок 6.1 – Імпульсний перетворювач напруги з паразитною індуктивністю монтажних провідників

Якщо у схемі перетворювача (рис. 6.1 а) є паразитна індуктивність L_s , то під час проходження струму i_D (рис. 6.1 б) у ній накопичуватиметься енергія. Ця індуктивність може мати значну величину, наприклад, у випадках, коли конденсатор з'єднується з іншою частиною схеми довгими провідниками. У момент закриття транзистора VT струм колектора переривається, але енергія, накопичена в паразитній індуктивності, прагне його підтримати, тому виникає

викид напруги між колектором та емітером, утворюючи деяку «добавку» U_S до напруги U_{in} :

$$U_{DS} = U_S + U_{in}. \quad (6.1)$$

Через діод VD починає протікати струм, емітер транзистора підключається до загального провідника схеми, тому «добавка» у чистому вигляді «додається» до вхідної напруги. Чим вища швидкість спаду струму колектора, тим більшу величину «добавки» напруги можна отримати, тим небезпечнішим стає режим роботи ключового транзистора.

Для підвищення надійності схеми та зниження допустимої величини напруги «колектор-емітер» у схему перетворювача вводиться конденсатор C_s (рис. 6.2), виводи якого підключені безпосередньо до колектора транзистора VT і нижнього (за схемою) виводу розрядного діода VD . Цей конденсатор уводиться для того, щоб «погасити» енергію, накопичену в паразитній індуктивності.

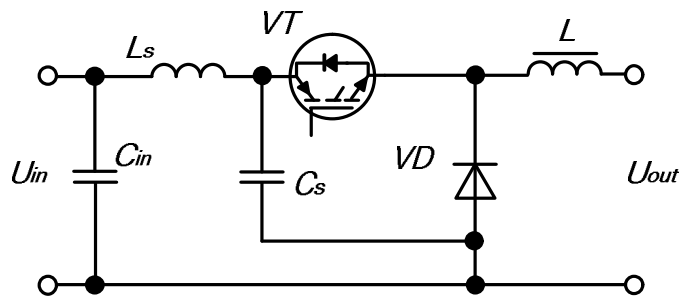


Рисунок 6.2 – Захист від індуктивних викидів за допомогою конденсатора

Накопичена паразитною індуктивністю енергія має бути поглинена конденсатором, перетворившись на невелику «добавку» до вхідної напруги імпульсного перетворювача. Задавшись величиною допустимої «добавки», можна визначити величину захисного конденсатора. Зазвичай конденсатор вибирають неполярним, оскільки паразитна індуктивність його обкладок і виводів набагато менша, ніж у полярних (електролітичних) конденсаторів.

Для захисту силового ключового елемента від перенапруг широко використовуються захисні RC (рис. 6.3 а) або RCD (рис. 6.3 б) кола.

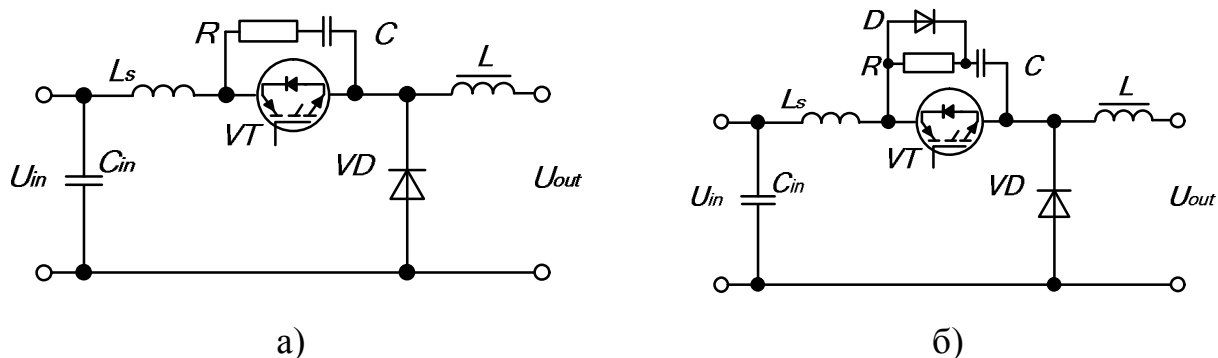


Рисунок 6.3 – Захисні RC (а) та RCD (б) кола силових транзисторів

RC і RCD-снабери не мають істотних переваг, порівняно з одиночним конденсатором. Водночас до конденсатора висувають вимоги: конденсатор має бути встановлений якомога ближче до силових виводів колектора та емітера транзистора; бажано, щоб конденсатор не підключався до клемного з'єднання, а паявся, оскільки кріплення притисканням значно знижує ефективність снабера. Ефективність снабера знижується також, якщо конденсатори набрані послідовно, оптимальний варіант – установка одного конденсатора.

Ємність конденсаторів має розраховуватися згідно з паразитною індуктивністю та індуктивністю навантаження. Однак, як показує практика, номінал снаберного конденсатора майже завжди залишається тим самим, принаймні, в області керування двигунами різної потужності від сотень Ватт до десятків кіловат. Це 0,1..0,4 мкФ (оптимальні 0,22 і 0,33 мкФ) незалежно від двигунів, режимів роботи на напруги живлення. До того ж, подальше збільшення ємності малоефективне; зміна номіналу з 0,1 мкФ на 0,33 мкФ надає вигреш у гасінні імпульсу напруги до 50 %, а збільшення ємності ще на цілий порядок (до 3,3 мкФ) у кращому разі дасть 10..20 %, а потім ефект гасіння і зовсім почне зменшуватися.

Для захисту IGBT транзисторів від комутаційних перенапруг у колі колектор-емітер варто застосовувати захисні (снаберні) RC- та RCD-кола (рис. 6.3), установлені безпосередньо на силових вентилях.

Для розрахунку захисних кіл транзисторів задаються приростом напруги ΔU_{Cd} на ємності за час t_{Cn} :

$$\Delta U_{Cd} = (0,05 - 0,15)U_{Kmax}, \quad (6.2)$$

де U_{Kmax} – максимальна напруга на ключі, t_{Cn} – час закриття транзистора (час спрацювання), с.

Вибравши величину струму заряду $I_{Cd} = (0,1 - 0,3)I_{Kmax}$, А, визначають значення захисної ємності C_d :

$$C_d = I_{Cd}t_{Cn} / \Delta U_{Cd}, \text{ Ф.} \quad (6.3)$$

Під час вибору типу конденсатора враховується, що максимальна напруга на конденсаторі може досягати значення $U_{Cdmax} \approx U_{Kmax}$.

Уважаючи, що конденсатор розряджається через резистор R_d , максимальне значення струму розряду ємності вибираємо рівним струму заряду I_{Cd} , у результаті знаходимо опір резистора R_d :

$$R_d = U_{Kmax} / I_{Cd}, \text{ Ом.} \quad (6.4)$$

Перевірка умови здійсності повного розряду ємності:

$$t_{umin} \geq 3\tau_d \text{ чи } R_d \leq \gamma_{min} / 3f_{\Pi} C_d, \quad (6.5)$$

де $\tau_d = R_d C_d$ – стала часу захисного кола, с; γ_{min} – мінімальна скважність імпульсів; f_{Π} – частота перетворення, Гц.

Потужність резистора захисного кола розраховують за виразом:

$$P_{Rd} = C_d U^2 f_{\Pi} / 2, \text{ Вт.} \quad (6.6)$$

Другий варіант пасивного захисту – обмеження. Якщо сенс снабера полягає у зниженні dU/dt і у зменшенні пікової амплітуди викиду напруги, то сенс обмеження полягає в «обрізанні» напруги на ключовому елементі на встановленому рівні. Це може бути виконано за допомогою елементів, які різко зменшують свій опір у разі перевищення напруги між своїми електродами вище заданого рівня. Одним з таких елементів є варистор. Варисторами називають напівпровідникові резистори, електричний опір яких істотно залежить від прикладеної напруги. Зазвичай їх виготовляють з карбїду кремнію. На рис. 6.4 показано умовно графічне позначення варистора та залежність струму, який протікає, від прикладеної між його виводами напруги.

У нормальному режимі роботи опір варистора досить великий і він не впливає на роботу схеми. У разі різкого збільшення напруги вище заданого рівня відбувається спрацювання елемента і його опір на декілька порядків зменшується, що призводить до «гасіння» викидів напруги.

У технічній документації величина поглинутої енергії позначається символом W_{\max} . Слід ураховувати, що погашена енергія наводиться у розрахунку на одиночний імпульс струму. Окрім параметра поглиненої енергії, також наводиться максимальне значення струму, яке варистор може витримати без пошкодження – surge current, I_{\max} .

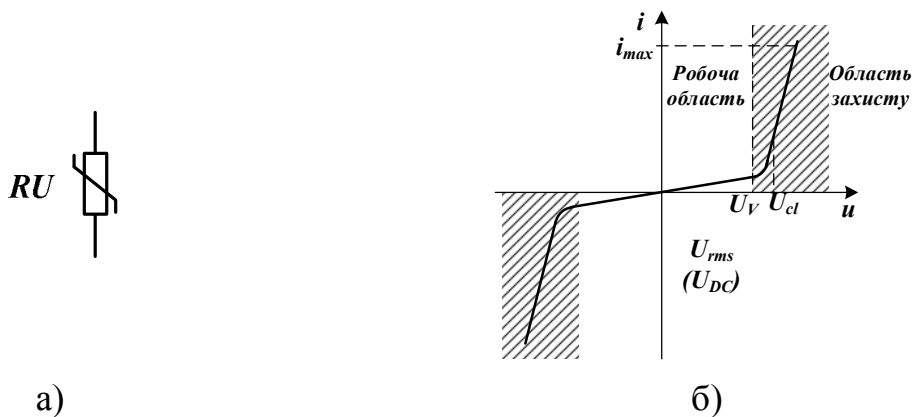


Рисунок 6.4 – Умовно-графічне позначення варистора у схемах (а) і залежність величини струму від прикладеної напруги (б)

Вибір варистора здійснюється за величиною максимальної робочої напруги (operating voltage) постійного U_{dc} або змінного U_{rms} струму синусоїдальної форми. Момент спрацювання варистора визначається варисторною напругою U_v (varistor voltage), яка задається за величини струму варистора 1 мА. І, нарешті, у технічній документації необхідно звернути увагу на величину напруги обмеження варистора U_{cl} (clamping voltage).

На рис. 6.5 показано способи ввімкнення варистора для захисту ключового транзистора VT від потенційного пробую.

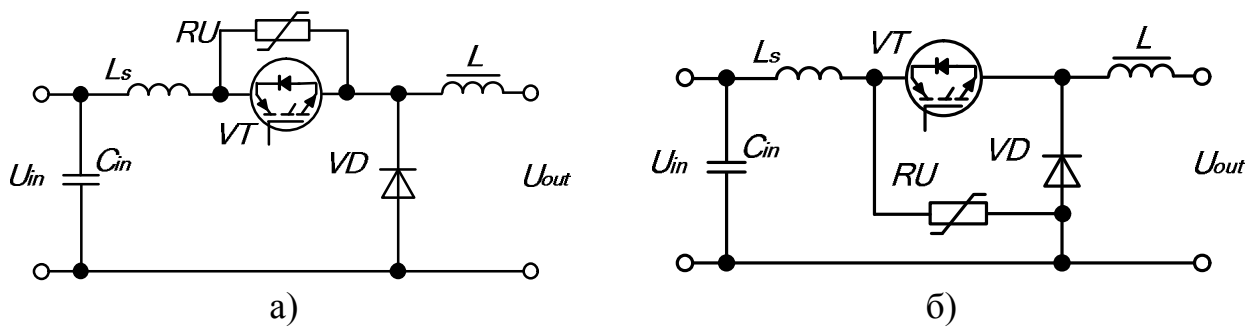


Рисунок 6.5 – Захист транзисторів за допомогою варисторів

Для обмеження напруги на ключовому елементі широкого застосування набули супресори. Супресори дозволяють «поглинути» більшу кількість енергії, швидше спрацьовують, надійніше фіксують напругу.

Супресори – це захисні діоди, які за принципом дії та характеристиками аналогічні стабілітронам. Їх повна назва – Transient Voltage Suppressor (заглушувач напруг перехідних процесів). Супресори виготовляють як в односпрямованому, так і у двонаправленому виконаннях. Односпрямоване виконання застосовують для гасіння перенапруг тільки однієї полярності. Двонаправлені супресори призначені для гасіння перенапруг обох полярностей. Супресор є потужним і швидкодієвим стабілітроном. Умовні графічні позначення односпрямованих і двонаправлених супресорів та їх вольт-амперні характеристики показані на рис. 6.6.

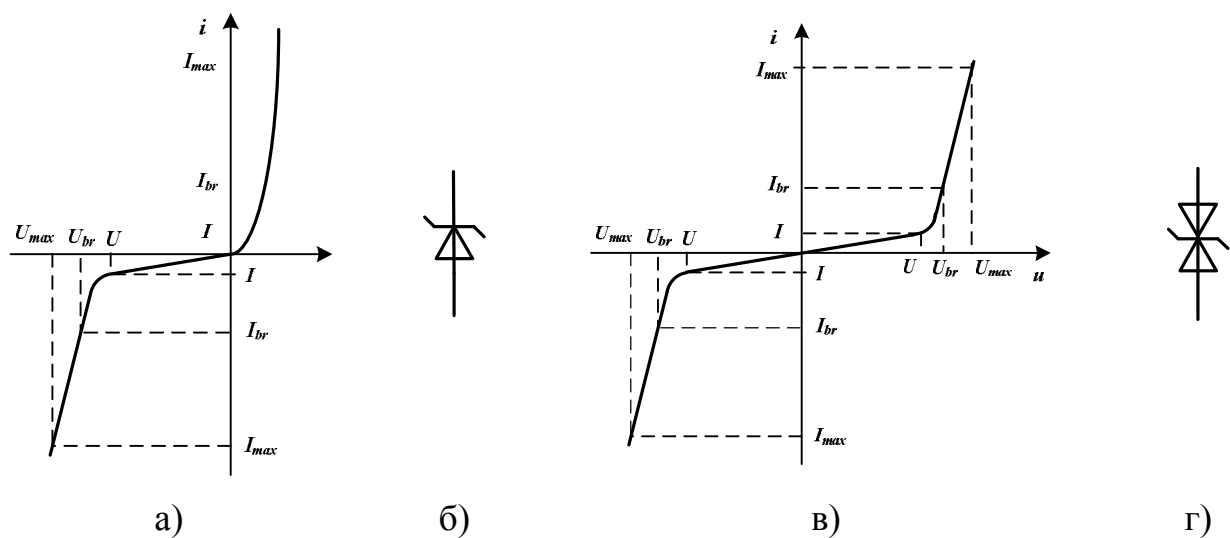


Рисунок 6.6 – Вольт-амперні характеристики однонаправленого (а) та двонаправленого (в) супресора та їх умовно-графічні позначення (б, г)

Вольт-амперна характеристика супресора дуже схожа на аналогічну характеристику стабілітрона, відповідно до цього він і вмикається в схему як стабілітрон. Але відмінність супресорів від стабілітронів суттєва: вони оптимізовані за мінімумом часу спрацьовування і максимумом поглинання потужності. При цьому за зовнішнім виглядом супресор дуже важко відрізнити від звичайного діода. Є також схожість з вольт-амперною характеристикою варистора з тією лише різницею, що варистор «працює» однаково під час протікання прямого і зворотного струму, тоді як типовий однонаправлений супресор в один бік проводить струм так само, як і звичайний напівпровідниковий діод. У двонаправлених супресорів вольт-амперна характеристика нічим не відрізняється від варисторної.

Вибір супресора потрібно починати з визначення величини максимальної робочої напруги (stand-off voltage), яка позначається в технічній документації як U_{rm} . За цієї напруги, прикладеної до зворотно ввімкненого супресора, не відбувається його відкриття. Зворотний пробій відбувається за напруги пробією (breakdown voltage), позначуваного як U_{br} . Ще один параметр – напруга обмеження (clamping voltage) U_{cl} – показує величину напруги з максимальним піковим струмом i_{pp} (peak pulse current). До характеристик прямої провідності належать: прямий спад напруги U_f (forward voltage drop) і максимальний прямий струм i_f (forward current).

На рис. 6.7 наведено схеми підключення супресора для захисту силових транзисторів від потенційного пробію.

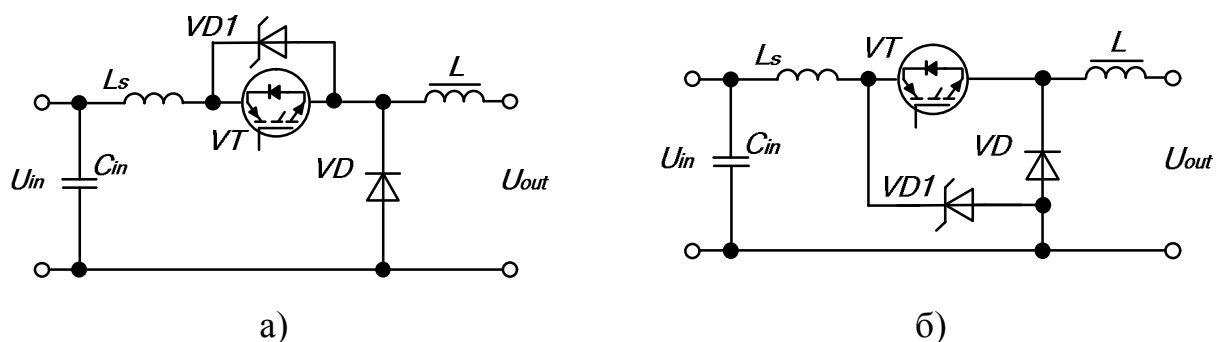


Рисунок 6.7 – Захист транзисторів за допомогою супресорів

Супресори швидше спрацьовують і надійніше фіксують напругу спрацьовування, ніж варистори. Час спрацьовання супресорів складає десятки пікосекунд.

Рекомендації щодо встановлення обмежувачів аналогічні рекомендаціям для снаберів. Обмежувачі можна набирати послідовно (але не паралельно), до того ж, такий спосіб зручний не тільки для вибору необхідної напруги, а і для збільшення максимальної потужності. Наприклад, чотири обмежувачі на 1,5 кВт і 200 В будуть у два рази потужнішими, ніж два такі самі обмежувачі на 400 В, хоча їх номінальна напруга пробивання залишиться такою ж. Номінальну напругу пробивання обмежувача слід вибирати, з урахуванням того, що вона має бути на 30 % вища за номінальну напругу живлення та на 30 % нижча за допустиму напругу переходу «колектор-емітер» транзистора. Варіювання від цієї точки в той чи інший бік залежить від того, що є критичним: або перегрів обмежувачів (а з цього випливає збільшення габаритів), або ризик пробою силового транзистора.

Однак обмежувачі мають істотний недолік – незначна швидкодія, оскільки затримка їх спрацьовування складає від 10 *нс* до декількох десятків *нс*. Сучасні транзистори мають тривалість вимкнення в 20..30 *нс*, а це означає, що, наприклад, якщо живлення 600 В і обмежувач на 800 В, тривалість наростання напруги від 800 В до 1200 В (пробій для транзистора) складатиме менше 10 *нс*; обмежувач просто не встигне спрацьовати, якщо вийде з ладу силовий транзистор. Отже, тривалість вимкнення транзистора має бути не менше 50 *нс*, а краще 100 *нс*. Тому, якщо не «підготувати» схему унаслідок зниження dU/dt , то сенсу від обмежувачів не буде. Знизити ж dU/dt можна або тим самим снабером, або унаслідок затягування вимкнення імпульсу керування. Тільки тоді обмежувач зможе захистити силовий транзистор.

Завдання до теми

1. Відповідно до варіанта завдання (табл. 6.1) розрахувати та вибрати силові транзисторні ключі для нереверсивного імпульсного перетворювача постійного струму. Під час розрахунків максимальний струм транзистора

визначається як $I_{K \max} = 2,5I_n$ (I_n – номінальний струм навантаження $I_n = U_d(2\gamma - 1)/r_n$, $\gamma = t_{imn}/T$). Параметри силових транзисторних ключів наведено в додатку А (табл. А.2).

2. Розрахувати параметри та вибрати елементи захисних демпферних кіл для вибраних транзисторних ключів.

3. Згідно з довідковою літературою вибрати варистори та супресори для захисту транзисторних ключів.

Таблиця 6.1 – Варіанти завдання для розрахунку

№ пор.	U_d , В	r_n , Ом	l_n , Гн	T , с	t_{imn} , с
1	100	5	0,0015	0,001	0,0004
2	100	10	0,002	0,001	0,0005
3	100	15	0,0025	0,001	0,0007
4	100	20	0,003	0,001	0,0008
5	100	25	0,0035	0,001	0,0009
6	150	5	0,004	0,002	0,0008
7	150	10	0,0045	0,002	0,001
8	150	15	0,005	0,002	0,0012
9	150	20	0,0055	0,002	0,0015
10	150	25	0,006	0,002	0,0018
11	200	5	0,0015	0,0005	0,0002
12	200	10	0,002	0,0005	0,0003
13	200	15	0,0025	0,0005	0,0004
14	200	20	0,003	0,0005	0,00045
15	200	20	0,0035	0,0005	0,00035
16	100	15	0,0015	0,001	0,0004
17	100	20	0,002	0,001	0,0005
18	100	35	0,0025	0,001	0,0007
19	100	10	0,003	0,001	0,0008
20	100	15	0,0035	0,001	0,0009
21	150	15	0,004	0,002	0,0008
22	150	20	0,0045	0,002	0,001
23	150	25	0,005	0,002	0,0012
24	150	30	0,0055	0,002	0,0015
25	150	35	0,006	0,002	0,0018
26	200	15	0,0015	0,0005	0,0002
27	200	20	0,002	0,0005	0,0003
28	200	25	0,0025	0,0005	0,0004
129	200	40	0,003	0,0005	0,00045
30	200	35	0,0035	0,0005	0,00035

Контрольні питання

1. Охарактеризуйте вимоги щодо систем захисту напівпровідникових перетворювачів енергії.
2. Надайте характеристику основних видів перенапруг, що впливають на напівпровідникові ключі.
3. Поясніть методи захисту силових транзисторів від перенапруги на переході «затвор–емітер».
4. У чому полягає відмінність між активним і пасивним методами захисту транзисторів від перенапруг у переході «колектор–емітер»?
5. Поясніть причини виникнення перенапруги в імпульсних перетворювачах енергії.
6. Надайте характеристику застосування RC і RCD-снаберів.
7. Охарактеризуйте такий метод пасивного захисту, як обмеження.
8. Поясніть принцип дії варисторів і можливість їх застосування від перенапруг в імпульсних перетворювачах енергії.
9. Поясніть принцип дії супресорів і можливість їх застосування від перенапруг в імпульсних перетворювачах енергії.

Література: [7, с. 253–263; 9, с. 158–178].

3 КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ

Вид контролю	Максимальна сума балів
Наповнюваність змісту	20
Якість оформлення	5
Своєчасність виконання	5
Захист роботи	20
Всього	50

Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою	
		Для іспиту, курсового проекту (роботи), практики	Для заліку
90–100	A	Відмінно	Зараховано
82–89	B	Добре	
74–81	C		
64–73	D	Задовільно	
60–63	E		
35–59	FX	Незадовільно з можливістю повторного складання	Не зараховано з можливістю повторного складання
0–34	F	Незадовільно з обов'язковим повторним вивченням навчальної дисципліни	Не зараховано з обов'язковим повторним вивченням навчальної дисципліни

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Основна

1. Калінов А. П. Елементи автоматизованого електропривода (навчальний посібник) / А. П. Калінов, В. О. Мельников. – Кременчук : Видавництво ПП Щербатих О. В., 2014. – 276 с.
2. Терехов В. М. Элементы автоматизированного электропривода : учебник для вузов / В. М. Терехов. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.
3. Келим Ю. М. Типовые элементы систем автоматического управления : учебное пособие для студентов учреждений среднего профессионального образования / Ю. М. Келим. – М. : ФОРУМ: ИНФРА-М, 2002. – 384 с.
4. Дорожовець М. М. Уніфікуючі перетворювачі інформаційного забезпечення мехатронних систем : посібник / М. М. Дорожовець, О. В. Івахів, В. О. Мокрицький. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. – 304 с.
5. Ткачук В. О. Електромеханотроніка : підручник / В. О. Ткачук. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2006. – 440 с.
6. Чиженко И. М. Справочник по преобразовательной технике / И. М. Чиженко. – К. : «Техніка», 1978. – 447 с.
7. Руденко В. С. Основы промышленной электроники / В. С. Руденко, В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – К. : Вища шк. Головное изд-во, 1985. – 400 с.

Додаткова

8. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника / В. И. Мелешин. – Москва : Техносфера, 2006. – 632 с.
9. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение / П. А. Воронин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательский дом Додэка – XXI, 2005. – 384 с.
10. Попович М. Г. Електромеханічні системи керування та електроприводи : навч. посібник. / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков. – К. : Либідь, 2005. – 680 с.
11. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – СПб. : Корона-Век, 2008. – 368 с.

Параметри напівпровідникових ключів

Таблиця А.1 – Параметри силових тиристорів

Тип тиристора	$I_{np\ max}, A$	$U_{зв\ max}, B$	$I_{кер}, mA$	
			Увімкнення	Утримання
25TTS12	16	1200	45	
40TPS08	35	800	150	
40TPS12	35	1200	150	
BCR16CM	16	600	30	
BT 151 650R	12	650		
BT 151 800R	12	800	40	20
BT 169D	12	400	6	5
БТА 16 600В	16	600	50	25
БТА 26 600А	25	600	150	100
БТА 26 600В	25	600	100	80
БТВ 16 600В	16	600	100	50
БТВ 24 600В	25	600	100	50
ESM 740	10	300	50	
IRKT105/10	105	1000		
IRKT105/12	105	1200		
IRKT162/12	160	1200		
IRKT162/16	160	1600		
IRKT41/12	45	1200		
IRKT56/10	60	1000		
IRKT56/12	60	1200		
IRKT71/10	65	1000		
IRKT91/10	95	1000		
IRKT91/12	95	1200		
MAC12M	12	600	35	40
MAC15M	15	600	35	40
MAC15N	15	800	35	40
MAC320A8FP	20	600	75	
MAC8SN	25	600		
MAC9M	8	600	50	
MAC9N	8	800	50	
MCR12N	12	800	20	
MCR25M	25	600	30	
MCR8N	8	800	15	
TM100SZ	100	400		
TYN 408	8	400	15	30

Таблиця А.2 – Параметри IGBT транзисторів

Тип транзистора	$U_{ce\ max}$, В	R_{ce} , мОм	I_c , А; $T_c = 25/100$ °С	Q_g / Q_{ge} , нК	P_D , Вт;
IRFB23N20D	200	-/-/100,0	24/17	57,0/27,0	170/-
IRFB4020PBF	200	-/-/100,0	18/13	18,0/5,3	100/-
IRFS23N20D	400	-/-/100,0	24/17	57,0/27,0	170/-
IRFSL23N20D	400	-/-/100,0	24/17	57,0/27,0	170/-
IRF640N	400	-/-/150,0	18/13	44,7/22,0	150/-
IRF640NL	200	-/-/150,0	18/13	44,7/22,0	150/-
IRF640NS	200	-/-/150,0	18/13	44,7/22,0	150/-
IRFB4103	200	-/-/165,0	17/12	25,0/12,0	140/-
IRFR15N20D	350	-/-/165,0	17/12	27,0/14,0	140/-
IRFU15N20D	200	-/-/165,0	17/12	27,0/14,0	140/-
IRF7450	200	-/-/170,0	-/-	26,0/12,0	-/3
IRFR13N20D	350	-/-/235,0	14/9,5	25,0/12,0	110/-
IRFU13N20D	200	-/-/235,0	14/9,5	25,0/12,0	110/-
IRF630N	350	-/-/300,0	9,5/6,8	23,3/11,3	82/-
IRFU9N20D	400	-/-/380,0	9,4/6,7	18,0/9,0	86/-
IRFR220N	200	-/-/600,0	5/3,5	15,0/6,1	43/-
IRFU220N	350	-/-/600,0	5/3,5	15,0/6,1	43/-
IRF7464	200	-/-/730,0	-/-	9,5/4,6	-/2,5
IRF6641	200	-/-/-	-/-	34,0/9,5	89/2,8
IRFB4233PBF	230	-/-/37,0	56/39	120/44	370/-
IRFB4332PBF	250	-/-/33,0	60/42	99/35	390/-
IRFP4332PBF	250	-/-/33,0	57/40	99/35	360/-
IRFP4232	250	-/-/35,7	60/42	160/60	430/-
IRFB4229PBF	250	-/-/46,0	46/33	72/26	330/-
IRFI4229PBF	250	-/-/46,0	19/12	73/24	46/-
IRFP4229PBF	250	-/-/46,0	44/31	72/26	310/-
IRFS4229PBF	250	-/-/48,0	45/32	72/26	330/-
IRF7453	250	-/-/230,0	-/-	25,0/11,0	-/2,5
IRFR12N25D	250	-/-/260,0	14/10	23/12	144/-
IRFU12N25D	250	-/-/260,0	14/10	23/12	144/-
IRFP4242PBF	300	-/-/59,0	46/33	165/61	430/-
IRF3000	300	-/-/400,0	-/-	22,0/11,0	-/2,5
RFL4315	150	-/-/185,0	-/-	12,0/6,8	-/2,8
IRF7465	150	-/-/280,0	-/-	10,0/5,0	-/2,5
IRF5802	150	-/1200,0	-/-	4,5/2,4	2/2
IRFI4227PBF	200	-/-/22,0	26/17	73,0/21,0	18/-
IRFBA90N20D	200	-/-/23,0	98/71	160,0/75,0	650/-

Зразок оформлення титульної сторінки контрольної роботи

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ І СИСТЕМ
УПРАВЛІННЯ

КАФЕДРА СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ТА
ЕЛЕКТРОПРИВОДА

КОНТРОЛЬНА РОБОТА
з навчальної дисципліни
«ЕЕМЕНТИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА»

Виконав
студент групи
ПІБ

Перевірив
ПІБ

Кременчук 201_

Методичні вказівки щодо виконання контрольної роботи з навчальної дисципліни «Елементи автоматизованого електропривода» для студентів заочної форми навчання зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітнього ступеня «Бакалавр»

Укладачі: к. т. н., доц. В. О. Мельников,
к. т. н., доц. А. П. Калінов

Відповідальний за випуск зав. кафедри систем автоматичного управління та електропривода Родькін Д. Й.

Підп. до др. _____. Формат 60x84 1/16. Папір тип. Друк ризографія.
Ум. друк. арк. _____. Наклад _____ прим. Зам. № _____. Безкоштовно.

Видавничий відділ
Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600