ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №15

Тема роботи. Розрахунок однофазного регулятора змінної напруги

Мета роботи: набуття навиків розрахунку однофазних тиристорних регуляторів змінної напруги.

Теоретичні відомості

Регулятори (переривачі) змінного струму є електронними ключами, що дозволяють вмикати або вимикати навантаження у колі змінного струму або регулювати потужність, що виділяється у навантаженні.

Регульований ключ являє собою електронний тиристорний ключ, у якого може здійснюватися регулювання за необхідним законом кута керування α, а, значить, і потужності, що віддається у навантаження. При цьому форма кривої напруги на навантаженні відрізняється від форми кривої мережі живлення, за рахунок чого і напруга, і струм містять в собі багато гармонік. Основна гармоніка має ту ж частоту, що й частота напруги живлення. Струм основної гармоніки відстає від напруги за фазою. Величина кута відставання залежить від виду навантаження і величини кута керування, але навіть за активного навантаження кут відставання не дорівнює нулеві: пристрої з такими ключами завжди споживають реактивну потужність.

В якості силових елементів у тиристорних регуляторах використовують, в основному, тиристори, симистори. Із властивостей тиристора випливає, що сигнал керування вмикає регулятор напруги змінного струму практично без затримки, після чого струм у колі навантаження припиниться лише при переході його через нуль за умови відсутності при цьому сигналу керування.

Найрозповсюдженіша схема тиристорного регулятора та діаграми його роботи за активного навантаження наведені на рис. 2.1. Навантаження тут підімкнене до мережі з напругою *Uм* за допомогою ключа, що є двома увімкненими зустрічно-паралельно тиристорами: VS1 та VS2.

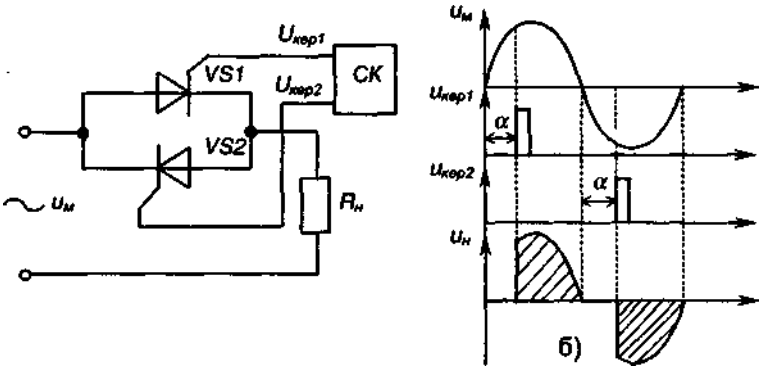

Рис. 2.1- Однофазний регулятор: а) електрична схема;
б) часові діаграми роботи.

Умовами протікання струму через тиристор є наявність на ньому прямої напруги та подачі напруги на керуючий електрод - напруги керування. Якщо її подача на тиристор здійснюється симетрично в обох півперіодах, то напруга на навантаженні не має постійної складової.

З часових діаграм, наведених на рис 2.1(б) видно, що, змінюючи кут керування тиристорів α від 0° до 180°, можна змінювати (регулювати) напругу на навантаженні від $U_м$ до 0.

Через тиристор *VS1* струм протікає за час додатного півперіоду, а через тиристор *VS2* - за час від'ємного.

Проектування силової схеми регулятора змінного струму є комплексною задачею, бо навіть у режимі, що встановився, струм через тиристори та напруга на них мають квазістаціонарний характер.

При виборі вентилів регулятора (тиристорів) за струмом та напругою, втрати потужності в них знаходять, виходячи з форми кривої струму, що протікає через напівпровідниковий прилад. Втрати у вентилі практично дорівнюють втратам від прямого струму. Графічні залежності, що називаються характеристиками керування, показують залежність від кута керування струмів окремих вентилів, діючих значень струму та напруги навантаження у режимі, що встановився.

Керовані електронні ключі можуть застосовуватися, наприклад, для повільного вмикання або вимикання освітлення театральної зали, для такого ж запуску електродвигуна із забезпеченням при цьому понижених значень пускових струмів.

Повністю керовані регулятори використовують у регуляторах (стабілізаторах) напруги, для регулювання яскравості потужних джерел освітлення та ін.

Практичне завдання

Виконати розрахунок силової частини регулятора змінної напруги на тиристорі, схема якого наведена на рис. 2.1, а (розрахунок системи керування (СК) в завдання даної роботи не входить). Необхідно визначити: параметри та вибрати тиристора; режими роботи силової схеми регулятора (струм, напругу, коефіцієнт форми струму навантаження); залежності діючої напруги на навантаженні, середнього струму тиристора та коефіцієнта форми струму тиристора від величини кута керування (представити у вигляді графіків); втрати потужності в тиристорах та ступінь їх перегріву.

Вихідними даними для розрахунку є:

1) $U_м$, *В* - діюче значення напруги мережі живлення;
2) $f_м$, *Гц* - частота мережі живлення;
3) $R_н$, *Ом* - опір навантаження;
4) α, в градусах електричних - кут керування тиристорів;

5) $U_{ж}$, *В* - напруга джерела живлення системи керування тиристорами.

Варіанти вихідних даних наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1- Вихідні дані для розрахунку регулятора

Цифри номера залікової книжки		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
десятки	одиниці										
$U_{м}$, *В*		127	220	380	127	220	380	127	220	380	220
$f_{м}$, *Гц*		50									
	$R_{н}$, *Ом*	6,3	10	18	30	3,1	5,1	9,1	15	4,7	8,2
	α, ^{0}	10	20	35	40	50	65	70	80	95	100
	$U_{ж}$, *В*	6	9	12	15	24	6	9	12	15	24

Приклад вибору варіанта для номера залікової книжки 032:

з колонки 3 маємо: $U_{м}$ = *127В,* $f_{м}$ = *50 Гц,*

з колонки 2 - $R_{н}$ = *18 Ом,* α = 35^{0} ; $U_{ж}$ =*l2В;*

Приклад розрахунку однофазного регулятора напруги

Дано: $U_{м}$= *380 В;* $R_{н}$ = *7,5 Ом;* α = *45°;* $f_{м}$= *50 Гц;* 5 $U_{ж}$ =*12В.*

Порядок розрахунку

1. Знайдемо необхідні значення параметрів тиристорів.

Амплітуда зворотної напруги на тиристорі:

$$U_{зв\,т} = \sqrt{2}\, U_{м} K_{з} \qquad (15.1)$$

$$U_{зв\,т} = \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 1{,}25 = 669{,}75\ В$$

де $K_{з}$ - коефіцієнт запасу, що враховує можливі перенапруги (зазвичай приймають $K_{з}$ = *1,25*).

Знайдемо значення середнього та амплітудного струмів, що протікають через тиристор. Для будь-якої величини кута керування величину середнього струму можна знайти за формулою (2.1). При цьому максимальне значення струму, на яке повинен бути розрахований тиристор I_{a0}, відповідає куту керування α = 0.

Тоді:

$$I_{a} = \frac{\sqrt{2} U_{M}}{\pi R_{H}}. \qquad (15.2)$$

$$I_{a} = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{7{,}5 \cdot \pi} = 22{,}75\ A.$$

Амплітудне значення струму тиристора:

$$I_{am} = \frac{\sqrt{2}U_{м}}{R_{н}}. \qquad (15.3)$$

$$I_{am} = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{7,5} = 71,44\ A.$$

2. Вибираємо тиристор за табл. Д.9, що відповідає вимогам:

$$U_{зв.д} > U_{зв.т}\ ; \qquad (15.4)$$
$$I_{г0} > I_a$$

де $U_{зв.д}$ - допустима зворотна напруга на тиристорі, (амплітудне значення);

$I_{г0}$ - середнє значення допустимого граничного струму тиристора з типовим охолоджувачем в умовах природного повітряного охолодження.

З табл. Д.9 вибираємо тиристор Т10-80, що має наступні параметри:

- $U_{зв} = 700\ В > 669,75В;$
- $I_{г0} = 25\ А > 22,75А;$
- вмикаючий струм керування $I_к = 0,15\ А;$
- вмикаюча напруга керування $U_к = 4\ В;$
- порогова напруга $U_0 = 1,02\ В;$
- динамічний опір у відкритому стані $R_д = 1,7 \cdot 10^{-3}\ Ом;$
- встановлений тепловий опір $R_T = 3,4°\ С/Вт.$

3. Знаходимо середнє значення струму через тиристор при заданому значенні кута керування з формули:

$$I_a = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{2\pi R_H}(1 + \cos\alpha) \qquad (15.5)$$

$$I_a = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{2\pi 7,5}(1 + \cos 45^{\circ}) = 19,42\ \text{А}.$$

Виконаємо побудову залежності середнього струму тиристора від кута керування α, змінюючи його від 0….до 180^0. Результати розрахунків подані в табл. 2.3, а розрахований графік залежності $I_a(\alpha)$ - на рис. 2.1.

Таблиця 2.3 - Середній струм тиристора для різних значень кута керування

Кут керування, ел. градусів	α	0	30^0	60^0	90^0	120^0	150^0	180^0
Середній струм тиристора, А	I_a	22,75	21,22	17,06	11,38	5,69	1,54	0

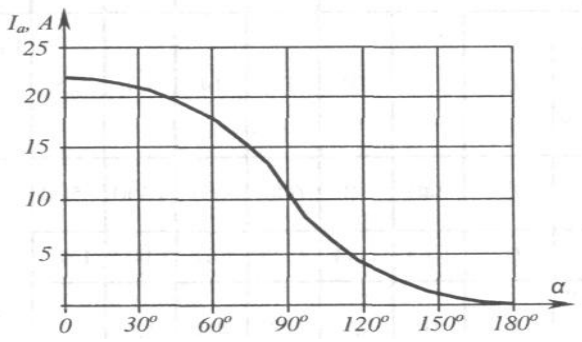

Рис. 2.1 - Залежність середнього струму тиристора від величини кута керування

4. Знайдемо значення діючого струму тиристора для $\alpha = 45°$ за формулою:

$$I_T = \frac{U_M}{R_H}\sqrt{\frac{1}{2}\left(1-\frac{\alpha}{180^0}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right)} \qquad (15.6)$$

$$I_T = \frac{380}{7,5}\sqrt{\frac{1}{2}\left(1-\frac{45^0}{180^0}+\frac{\sin 2\cdot 45^0}{2\pi}\right)} = 34,15 \text{ А}.$$

5. Знаходимо діюче значення струму навантаження для заданого кута керування α=45° з формули:

$$I_н = \sqrt{2}\cdot I_T \qquad (15.7)$$

$$I_н = \sqrt{2}\cdot 34,15 = 48,15\ A$$

6. Знаходимо діюче значення напруги навантаження для заданого кута керування α=45° з формули:

$$U_н = I_н \cdot R_н \qquad (15.8)$$

$$U_н = 48,15 \cdot 7,5 = 361,13\ B.$$

7. Знайдемо залежність діючої напруги на навантаженні регулятора від кута регулювання, для чого заповнимо табл. 2.5 та побудуємо графік - рис.2.3:

$$U_н(\alpha) = U_н\sqrt{1-\frac{\alpha}{180^0}} \qquad (15.9)$$

Таблиця 2.5 - Діючі значення напруги на навантаженні за різних кутів керування

Кут керування, ел. град	α	0	30^0	60^0	90^0	120^0	150^0	180^0
Діюче значення напруги на навантаженні	$U_н, B$	361,13	330	295	255,4	208,5	147,5	0

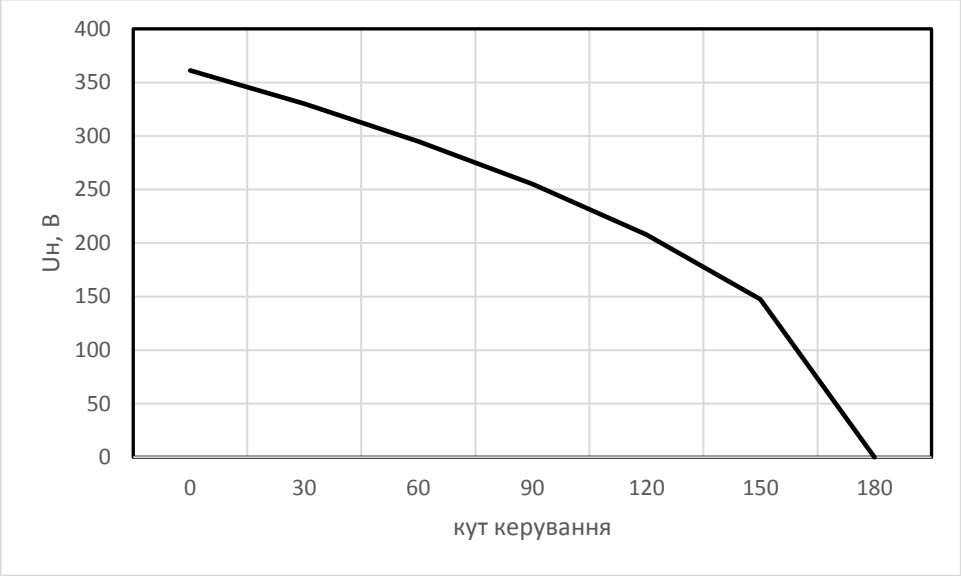

Рис. 2.3 - Залежність діючої напруги на навантаженні від кута керування

Аналізуючи графік з рис. 2.3, можна дійти висновку, що найефективніше регулювання величини напруги на навантаженні тиристорного регулятора має місце при значеннях кута керування від 30° до 150°.

8. Знайдемо потужність, що віддається у навантаження при заданому значенні кута керування α:

$$P_н = I_н \cdot U_н \qquad (15.10)$$

$$P_н = 48{,}15 \cdot 361{,}13 = 17388Вт \approx 17{,}4\ кВт.$$

9. Знаходимо втрати потужності на тиристорі при заданому куті керування α:

$$\Delta P = U_o \cdot I_a + R_o \cdot I_T^2 \qquad (15.11)$$

$$\Delta P = 1{,}02 \cdot 19{,}42 + 1{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot 34{,}12^2 = 21{,}78\ Вт$$

10. Знаходимо температуру нагрівання тиристора при заданому куті керування α:

$$\Delta T = R_T\ \Delta P \qquad (15.12)$$

$$\Delta T = 0{,}4 \cdot 21{,}78 = 8{,}72\ °C.$$

Тоді найбільша температура напівпровідникової структури тиристора складе:

$$T_{max} = T_c + \Delta T < T_{max\ доп}\ , \qquad (15.13)$$

$$T_{max} = 25 + 8{,}72 = 33{,}72\ °C < T_{max\ доп} = 140°C,$$

де $T_c = 25°C$ - температура оточуючого середовища;

$T_{maxдоп}$ - максимально допустима температура нагріву кремнієвої напівпровідникової структури, $T_{max\ доп} = 140°C$.

11. Знаходимо величину опору додаткового резистора у колі керування тиристора:

$$R_{1,2} = \frac{U_{ж} - U_{к}}{I_{к}} \qquad (15.14)$$

$$R_{1,2} = \frac{12-4}{0,15} = 53,33 \ Ом.$$

За табл. Д1 вибираємо найближче стандартне значення - 56*Ом*. Потужність, що розсіюється в цьому резисторі:

$$P_{1,2} = R_{1,2} I_{к}^{2} \qquad (15.15)$$

$$P_{1,2} = 56 \cdot 0,15^{2} = 1,2 \ Вт.$$

З табл. Д3 вибираємо резистори R1, R2 типу С2-33 потужністю 2 *Вт*.

12. Електричну принципову схему розрахованого регулятора наведено на рис. 2.4.

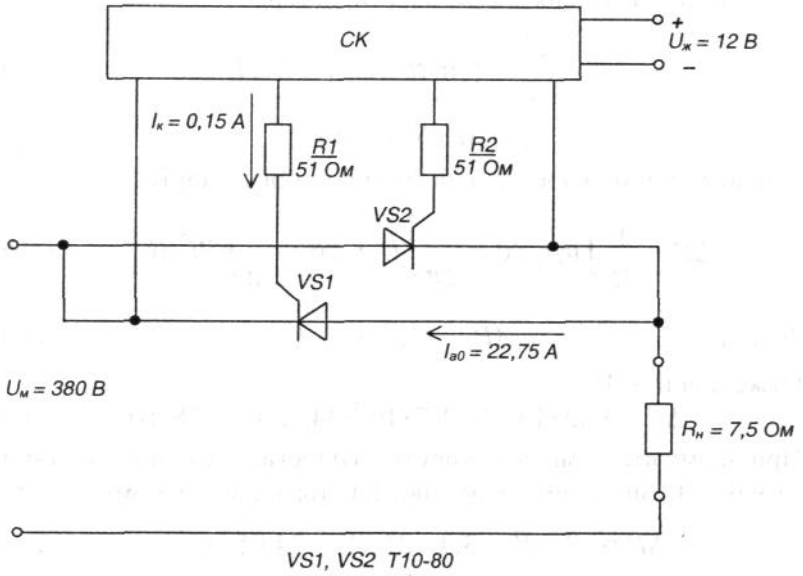

Рис. 2.4 - Однофазний регулятор змінної напруги на тиристорах.

2.5. Контрольні питання

1. Поясніть, для чого призначені тиристорні регулятори напруги змінного струму та як їх класифікують.

2. Поясніть, за якими параметрами вибирають тиристори для регуляторів змінної напруги.

3. Поясніть подібність форми кривих графіків залежностей струму тиристора та напруги на навантаженні від величини кута керування.

4. Поясніть, чим визначаються втрати потужності у відкритому тиристорі.

5. Поясніть, для чого у коло керування тиристора вводиться додатковий резистор.

ДОДАТКИ

Таблиця Д1 - Ряди номінальних значень

Індекс ряду	Позиції ряду	Допустиме відхилення від номінальної величини, %
E24	1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1	±5

Таблиця Д3 - Постійні резистори

Тип резистора	Діапазон опорів	Номінальна потужність, Вт
МЛТ	1 Ом ÷ 3,01 МОм 1 Ом ÷ 5,1 МОм 1 Ом ÷ 10 МОм	0,01; 0,025; 0,05; 0,125 0,25; 0,5 1;2
С2-33	1 Ом ÷ 3 МОм 1 Ом ÷ 5,1 МОм 0,1 Ом ÷ 5,1 МОм 1 Ом ÷ 10 МОм 1 Ом ÷ 22 МОм	0,125 0,25 0,5 1 2
ПЕВ-5 ПЕВ-8 ПЕВ-10; ПЕВ-16; ПЕВ-25; ПЕВ-50	45 Ом ÷ 430 Ом 5 Ом ÷ 33 кОм 5 Ом ÷ 10 кОм	5 8 10; 16; 25; 50

Таблиця Д9 – Основні параметри тиристорів типу Т10

Параметр	Позначення	Тиристор						Умови режиму
		Т10-10	Т10-16	Т10-25	Т10-40	Т10-63	Т10-80	
Зворотна напруга, В (для всіх тиристорів)	$U_{зв.д}$	50; 100; 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1100; 1200						-
Граничний струм (середнє значення), А	$I_г = I_{ан}$	10	16	25	40	63	80	Штучне охолодження температура корпусу 85°С
Граничний струм з типовим охолоджувачем (середнє значення), А	$I_{г0}$	8	10	12	14	20	25	Охолодженя природне повітряне; температура оточуючого середовища 25°С

Ударний струм, А	$I_{уд}$	240	240	600	960	1300	1500	Тривалість імпульсу струму 10 мс
Порогова напруга, В	U_0	1,64	1,44	1,26	1,16	1,094	1,02	-
Динамічний опір у відкритому стані, мОм	$R_д$	10	7	6,4	4,4	1,8	1,7	-
Відмикаючий струм керування, не більше, А	$I_к$	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	За прямої напруги на тиристорі
Відмикаюча напруга керування, не більше, В	$U_к$	3	3	3	4	4	4	-
Загальний встановлений тепловий опір, °С/Вт	R_T	5,9	5,3	4,9	3,69	3,5	3,4	З типовим охолоджувачем за природного повітряного охолодження