

1. РОЗРАХУНОК ОДНОФАЗНОГО ВИПРЯМЛЯЧА МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ З ЄМНІСНИМ ФІЛЬТРОМ

1.1. Мета розрахунку

Метою даної роботи є набуття навиків розрахунку однофазних випрямлячів малої потужності з ємнісним фільтром.

1.2. Вихідні дані

Вихідними даними для розрахунку є:

- 1) U_d, B - середнє значення випрямленої напруги за номінального навантаження;
- 2) I_d, A - середнє значення випрямленого струму (струму навантаження);
- 3) $K_n, \%$ - коефіцієнт пульсації випрямленої напруги (на виході фільтра);
- 4) U_m, B - напруга мережі живлення;
- 5) $f_m, Гц$ - частота мережі живлення.

Варіанти вихідних даних наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Вихідні дані для розрахунку випрямляча

Цифри номера залікової книжки		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
десятки	одиниці										
	U_d, B	60	48	24	60	48	24	60	48	24	60
	I_d, A	8	5	4	6	8	6	4	10	8	10
	$K_n, \%$	0,2	0,5	0,3	0,9	0,4	0,2	0,5	0,3	0,4	0,2
	U_m, B	127	220	127	220	127	220	127	220	127	220
	$f_m, Гц$	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Приклад вибору варіанта для номера залікової книжки 132:

з колонки 3 маємо: $K_n = 0,9 \%$, $f_m = 50 Гц$;

з колонки 2 - $U_d = 24 B$, $I_d = 4 A$; $U_m = 127 B$.

1.3. Теоретичні пояснення

Для живлення сучасних електронних пристроїв малої потужності найчастіше застосовують однофазні випрямлячі змінного струму, зазвичай двопівперіодні.

Величину пульсації вихідної напруги знижують до необхідної величини за допомогою фільтрів.

У якості вентилів найчастіше застосовують напівпровідникові кремнієві випрямні діоди.

Схема мостовою випрямляча з ємнісним фільтром наведена на рис. 1.1.

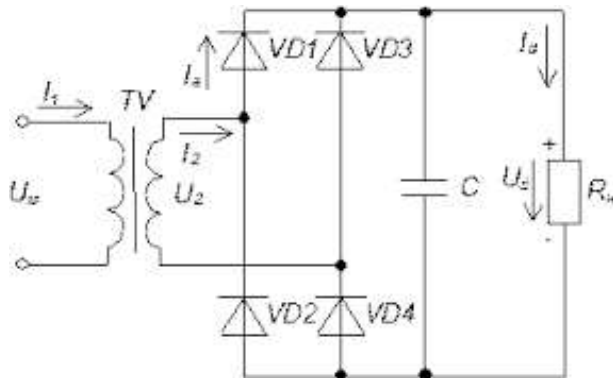


Рисунок 1.1 - Однофазний мостовий випрямляч з ємнісним фільтром

Такий випрямляч забезпечує двопівперіодне випрямлення і, порівняно зі схемою з нульовим виводом має менші габарити, масу і, відповідно, вартість трансформатора.

1.4. Приклад розрахунку однофазного мостового випрямляча з ємнісним фільтром

1.4.1. Вихідні дані:

- 1) середнє значення випрямленої напруги за номінального опору навантаження: $U_d = 48$ В;
- 2) струм навантаження $I_d = 0,3$ А;
- 3) коефіцієнт пульсації випрямленої напруги $K_n = 2,5$ %;
- 4) напруга мережі живлення $U_m = 127$ В;
- 5) частота мережі живлення $f_m = 400$ Гц.

1.4.2. Необхідно визначити:

- 1) тип і параметри вентилів;
- 2) режими роботи схеми (значення струмів в елементах та напругу на них);
- 3) к.к.д. випрямляча;
- 4) ємність та тип конденсатора фільтра.
- 5) навести схему розраховано випрямляча

1.4.3. Порядок розрахунку

1.4.3.1. Визначимо орієнтовні значення параметрів вентилів та габаритну потужність трансформатора.

Для цього необхідно задати значення допоміжних коефіцієнтів B , D і F . Для мостової схеми їх вибирають в інтервалах:

$$B = 0,95 \dots 1,1; \quad D = 2,1 \dots 2,2; \quad F = 6,8 \dots 7,2.$$

Нехай для попереднього розрахунку задамося: $B = 1,06$; $D = 2,15$; $F = 7,0$ (1.1)

Тоді амплітуда зворотної напруги на вентилі становитиме:

$$U_{зв.м} = 1,5U_d = 1,5 \cdot 48 = 72 \text{ В.} \quad (1.2)$$

Середнє та амплітудне значення струму через вентиль відповідно:

$$I_a = \frac{I_d}{2} \quad (1.3)$$

$$I_{ам} = I_d \cdot 0,5F. \quad (1.4)$$

Отже:

$$I_a = \frac{0,3}{2} = 0,15 \text{ А};$$

$$I_{ам} = 0,3 \cdot 0,5 \cdot 7 = 1,05 \text{ А.}$$

1.4.3.2. Габаритна потужність трансформатора:

$$S_T = U_d I_d 0,707BD \quad (1.5)$$

Отже габаритна потужність трансформатора

$$S_T = 48 \cdot 0,3 \cdot 0,707 \cdot 1,06 \cdot 2,15 = 23,2 \text{ ВА.}$$

За визначеним значенням габаритної потужності з табл. 1.2 знаходимо максимальне значення індукції B_m для сталі марки Е360, забезпечуючи виконання умови $S_T > 23,2$ ВА:

$$B_m = 1,47 \text{ Тл для } S_T = 40 \text{ ВА.}$$

Таблиця 1.2 - Рекомендовані значення максимальної індукції B_m та ККД η_T трансформатора для марок сталей Е340, Е350, Е360

Габаритна потужність S_T , ВА	Індукція B_m , Тл		ККД, η_T	
	$f_m = 50$ Гц	$f_m = 400$ Гц	$f_m = 50$ Гц	$f_m = 400$ Гц
10	1,2	1,15	0,85	0,78
20	1,4	1,33	0,89	0,83
40	1,5	1,47	0,92	0,86
70	1,6	1,51	0,94	0,88
100	1,6	1,5	0,95	0,9
200	1,43	1,4	0,96	0,92
400	1,43	1,3	0,97	0,94
> 400	1,35	1,2	0,97	0,95

1.4.3.3. Вибираємо тип вентилів за табл. 1.3, забезпечуючи виконання умов:

$$U_{зв. \partial} > U_{зв.м} ; \quad (1.6)$$

$$I_{aн} > I_a ; \quad (1.7)$$

$$I_{a. max} = \pi I_{a.н} > I_{a.т} \quad (1.8)$$

В якості вентилів вибираємо кремнієві діоди типу КД205Д. Виконаємо їх перевірку на відповідність заданим умовам роботи:

$$U_{зв \partial} = 100 \text{ В} > 72 \text{ В};$$

$$I_{aн} = 0,5 \text{ А} > 0,15 \text{ А};$$

$$I_{a max} = \pi I_{aн} = \pi \cdot 0,5 = 1,57 \text{ А} > 1,05 \text{ А};$$

$$U_{np} = 1 \text{ В}$$

1.4.3.4. Знаходимо опір діода у провідному стані:

$$r_{np} = \frac{U_{np}}{I_{aн}} ; \quad (1.9)$$

$$r_{np} = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ Ом}.$$

1.4.3.5. Знайдемо величину активного опору обмоток трансформатора:

$$r_T = \frac{k_r U_d}{I_d f_m B_m} 4 \sqrt{\frac{S f_m B_m}{I_d U_d}} \quad (1.10)$$

де k_r - коефіцієнт, що залежить від схеми випрямлення: для мостової схеми $k_r = 3,5$;

B_m - амплітуда магнітної індукції в магнітопроводі трансформатора, Тл;

S - число стержнів трансформатора, на яких розміщено обмотки: для броньового трансформатора з Ш-подібними пластинами магнітопроводу $S=1$.

$$r_T = \frac{3,5 \cdot 48}{0,3 \cdot 400 \cdot 1,47} 4 \sqrt{\frac{1 \cdot 400 \cdot 1,47}{48 \cdot 0,3}} = 2,41 \text{ Ом}$$

Таблиця 1.3 - Основні параметри випрямних діодів.

Тип діода	Граничні електричні параметри за температури оточуючого середовища $25 \pm 5^\circ\text{C}$		
	Допустима зворотна напруга $U_{ЗВ. \partial}$, В	Середнє значення випрямленого струму $I_{aн}$, А	Пряме падіння напруги U_{np} (за $I_{a \max}$), В
КД105Б	400	0,3	1
КД105В	600	0,3	1
КД205А	500	0,5	1
КД205Б	400	0,5	1
КД205В	300	0,5	1
КД205Г	200	0,5	1
КД205Д	100	0,5	1
КД208А	100	1,5	1
2Д220Д	400	3	1,1
2Д220Е	600	3	1,1
КД202Г	70	3,5	0,9
КД202А	50	5	1
КД202В	100	5	1
КД202Д	200	5	1
КД202Ж	300	5	1
КД202К	400	5	1
КД213В	100	10	1,2
КД213А	200	10	1
Д112-10	100	10	1,35
Д112-16	100	16	1,35
Д112-25	100	25	1,35
Д112-32	100	32	1,35
Д112-40	100	40	1,35
ДЛ112-10	400	10	1,35
ДЛ112-16	400	16	1,35
ДЛ112-25	400	25	1,35
ДЛ112-32	400	32	1,35
ДЛ112-40	400	40	1,35

1.4.3.6. Знаходимо індуктивність розсіювання обмоток трансформатора:

$$L_S = k_L S \frac{U_d}{I_d f_M B_m} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{S f_M B_m}{I_d U_d}}} \quad (1.11)$$

де k_L - коефіцієнт, що залежить від схеми випрямлення: для мостової схеми $k_L = 5 \cdot 10^{-3}$.

$$L_S = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot \frac{48}{0,3 \cdot 400 \cdot 1,47} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{1 \cdot 400 \cdot 1,47}{48 \cdot 0,3}}} = 0,54 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (1.12)$$

1.4.3.7. Визначаємо кут ϕ , що характеризує співвідношення між індуктивним і активним опором випрямляча:

$$\phi = \arctg \frac{2\pi f_m L_S}{r} \quad (1.13)$$

де r - активний опір випрямляча.

У загальному випадку:

$$r = r_T + n_q r_{np}, \quad (1.14)$$

де n_q - кількість послідовно увімкнених і одночасно працюючих вентилів (для мостової схеми $n_q = 2$).

$$r = 2,41 + 2 \cdot 2 = 6,41 \text{ Ом};$$

$$\phi = \arctg \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 400 \cdot 0,54 \cdot 10^{-3}}{6,41} = 12^\circ$$

1.4.3.8. Знаходимо величину основного розрахункового коефіцієнта:

$$A_0 = \frac{I_d r}{m U_d}, \quad (1.15)$$

де m - число пульсацій випрямляча (для мостової схеми $m = 2$).

Отже, величина основного розрахункового коефіцієнта:

$$A_0 = \frac{0,3 \cdot 6,41}{2 \cdot 48} = 0,02.$$

1.4.3.9. За знайденими значеннями A_0 і кута ϕ за графіками, наведеними на рис. 1.2-1.5, знаходимо величини допоміжних коефіцієнтів: $B = 0,825$; $D = 2,57$; $F = 7,25$; $H = 5,5 \cdot 10^3$.

Знаючи величини коефіцієнтів B , D , F і H , можна знайти уточнені параметри трансформатора і вентиля, за якими перевіримо правильність їх вибору.

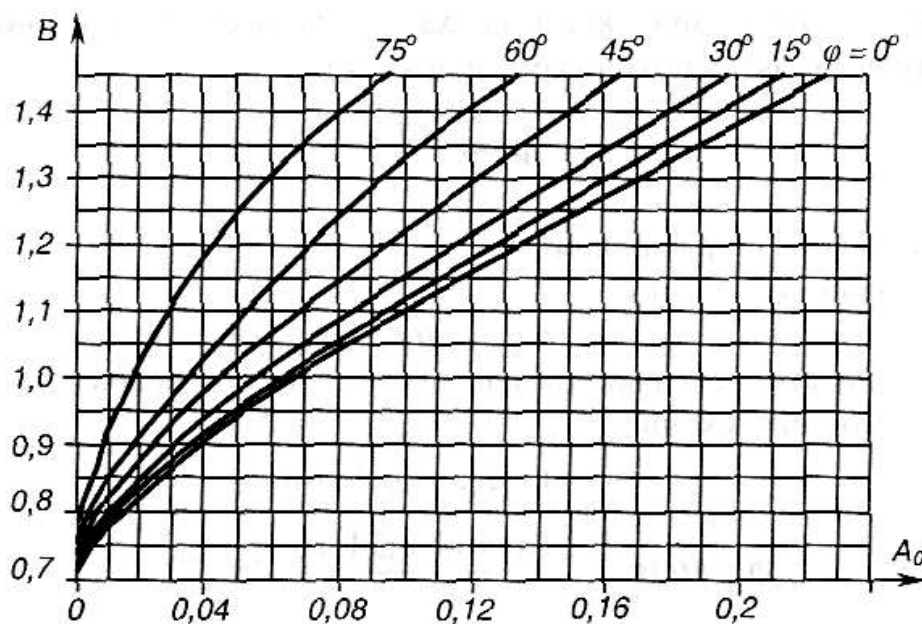


Рис. 1.2 - Залежності коефіцієнта B від основного розрахункового коефіцієнта A_0 для різних значень кута ϕ .

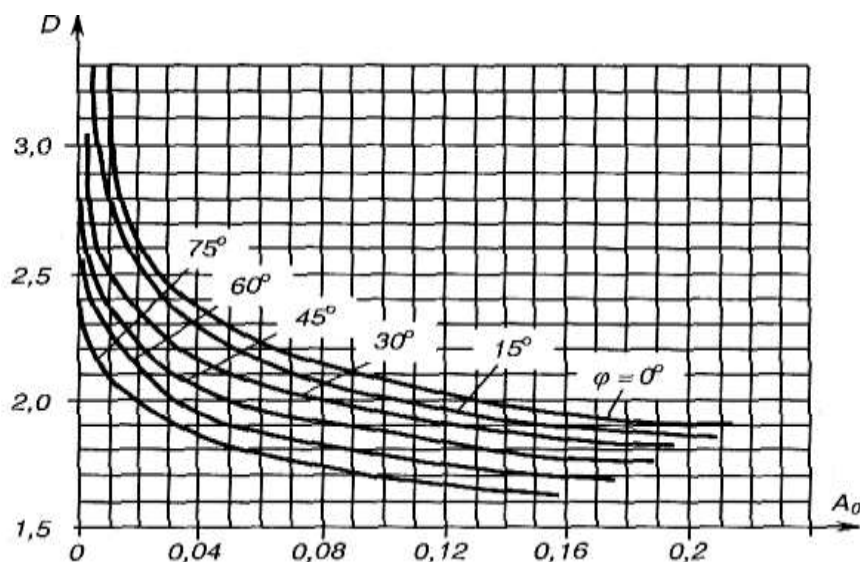


Рис. 1.3-Залежності коефіцієнта D від основного розрахункового коефіцієнта A_0 для різних значень кута ϕ .

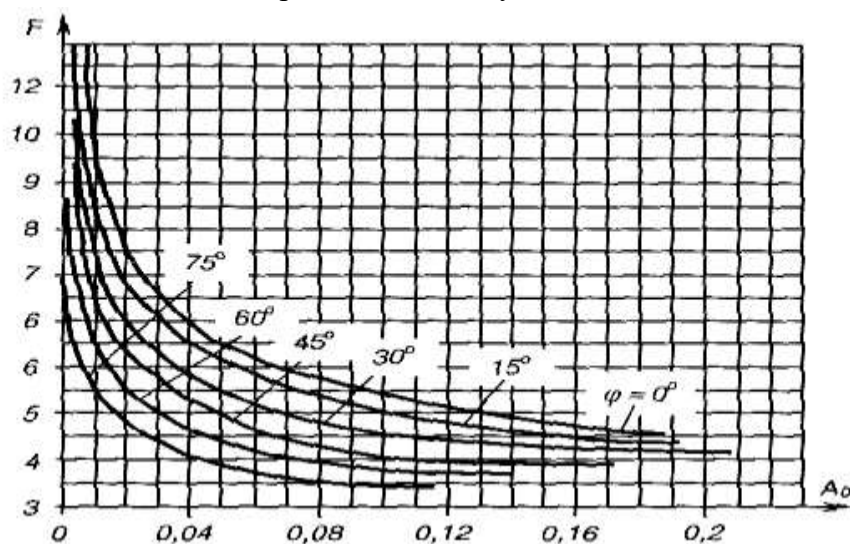


Рис.1.4 - Залежності коефіцієнта F від основного розрахункового коефіцієнта A_0 для різних значень кута ϕ .

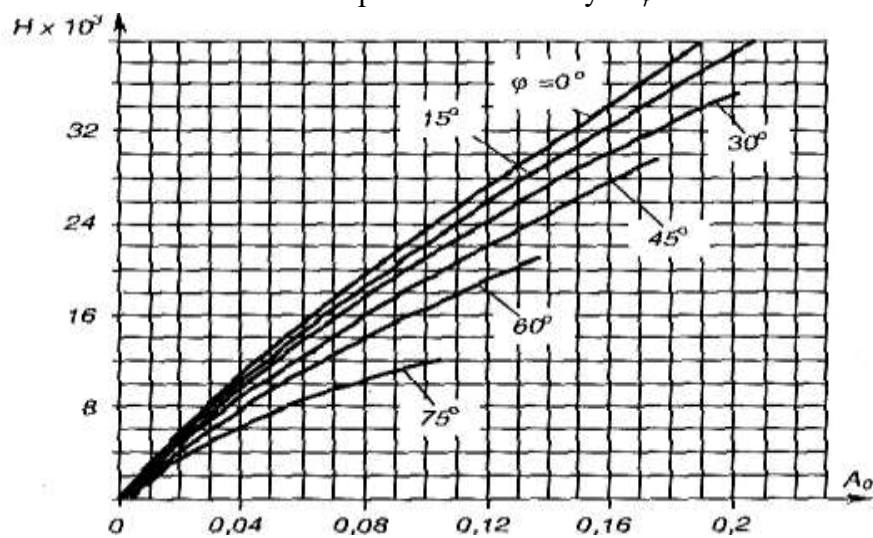


Рис.1.5 - Залежності коефіцієнта H від основного розрахункового коефіцієнта A_0 для різних значень кута ϕ .

1.4.3.10. Діюче значення напруги вторинної обмотки трансформатора становить:

$$U_2 = BU_d \quad (1.16)$$

$$U_2 = 0,825 \cdot 48 = 39,6 \text{ В.}$$

1.4.3.11. Діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора:

$$I_2 = 0,707DI_d; \quad (1.17)$$

$$I_2 = 0,707 \cdot 2,57 \cdot 0,3 = 0,55 \text{ А.}$$

1.4.3.12. Повна потужність вторинної обмотки трансформатора:

$$S_2 = 0,707BDI_dU_d; \quad (1.18)$$

$$S_2 = 0,707 \cdot 0,825 \cdot 2,57 \cdot 0,3 \cdot 48 = 21,6 \text{ ВА.}$$

1.4.3.13. Діюче значення струму первинної обмотки трансформатора:

$$I_1 = I_2 n, \quad (1.19)$$

де $n = U_2 / U_1$ - коефіцієнт трансформації трансформатора ($U_l = U_m$).

Отже:

$$n = \frac{U_2}{U_1} = \frac{39,6}{127} = 0,31;$$

$$I_1 = 0,55 \cdot 0,31 = 0,17 \text{ А}$$

1.4.3.14. Повна потужність первинної обмотки трансформатора:

$$S_1 = U_1 I_1, \quad (1.20)$$

$$S_1 = 127 \cdot 0,17 = 21,6 \text{ ВА.}$$

1.4.3.15. Уточнимо повну потужність трансформатора:

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2}; \quad (1.21)$$

$$S_T = \frac{21,6 + 21,6}{2} = 21,6 \text{ Вт} < 40 \text{ Вт}$$

1.4.3.16. Уточнимо значення параметрів попередньо вибраного діода:

$$U_{3\phi} = 1,41BU_d \quad (1.22)$$

$$U_{3\phi} = 1,41 \cdot 0,825 \cdot 48 = 55,8 \text{ В} < 100 \text{ В};$$

$$I_a = I_d/2; \quad (1.23)$$

$$I_a = 0,3/2 = 0,15 \text{ А} < 0,5 \text{ А};$$

$$I_{am} = 0,5 \cdot F \cdot I_d; \quad (1.24)$$

$$I_{am} = 0,5 \cdot 7,25 \cdot 0,3 = 1,09 \text{ А} < 1,57 \text{ А}$$

Отже, тип діода вибрано правильно.

1.4.3.17. Знаходимо величину ємності конденсатора фільтра:

$$C > \frac{100H}{rK_n f_m} \quad (1.25)$$

$$C = \frac{100 \cdot 5,5 \cdot 10^3}{6,41 \cdot 2,5 \cdot 400} = 85,5 \text{ мкФ.}$$

Напруга на конденсаторі

$$U_C > 1,5 U_2 = 1,5 \cdot 39,6 = 59,4\text{В}$$

За табл. Д5 вибираємо конденсатор типу К50-7 з параметрами: ємність 100 мкФ, напруга $U_C = 160\text{В}$.

1.4.3.18. Будуємо зовнішню (навантажувальну) характеристику випрямляча $U_d = f(I_d)$. За допомогою цієї характеристики можна визначити відхилення випрямленої напруги U_d , від заданого значення за різних величин струму навантаження I_d , у тому числі напругу неробочого ходу U_{dXX} , струм короткого замикання $I_{к.з.}$ та величину внутрішнього опору випрямляча r_0 .

Для розрахунку зовнішньої характеристики будемо задавати значення I_d , від 0 до номінального значення та знаходити відповідні їм значення допоміжного коефіцієнта:

$$\gamma_0 = \frac{I_d r}{m U_2}; \quad (1.26)$$

$$\gamma_0 = I_d \frac{6,41}{2 \cdot 39,6} = 0,81 I_d.$$

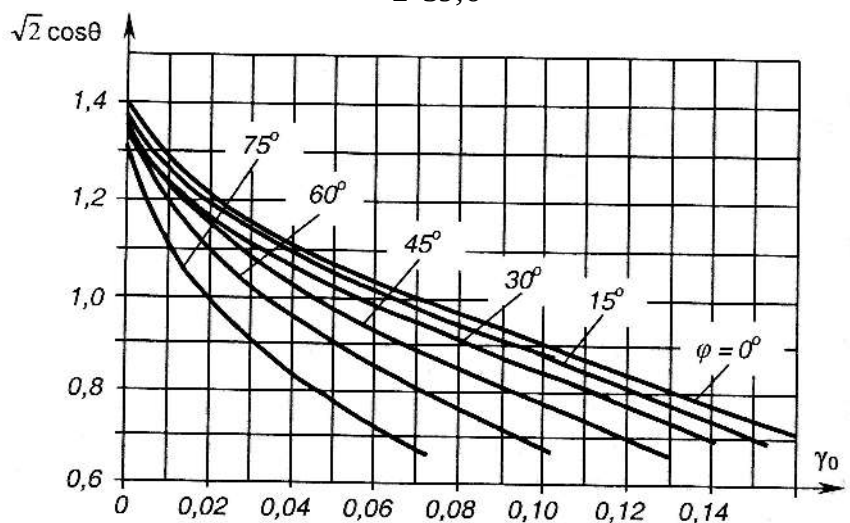


Рис. 1.6 – Залежність величини $\sqrt{2} \cos \theta$ від коефіцієнта γ_0 для різних значень кута ϕ

За графіком (рис. 1.6) знаходимо відповідні значення величини $\sqrt{2} \cos \theta$ (4-5 значень) залежно від γ_0 та ϕ , де θ - кут відтинання. Відповідні їм значення вихідної напруги випрямляча можна розрахувати за формулою:

$$U_d = U_2 \sqrt{2} \cos \theta; \quad (1.27)$$

$$U_d = 39,6 \cdot \sqrt{2} \cos \theta.$$

Результати розрахунку зведені у табл. 1.4 та відображені у вигляді графіка на рис. 1.7.

Таблиця 1.4 - Результати розрахунку навантажувальної характеристики випрямляча за $U_d = 48\text{В}$ та $I_d = 0,3\text{А}$

$I_d, \text{А}$	γ_0 для $\phi = 12^\circ$	$\sqrt{2} \cos \theta$	$U_d, \text{В}$
0	0	1,41	55,8
0,1	0,008	1,3	51,5
0,2	0,016	1,22	48,3
0,3	0,024	1,18	46,7

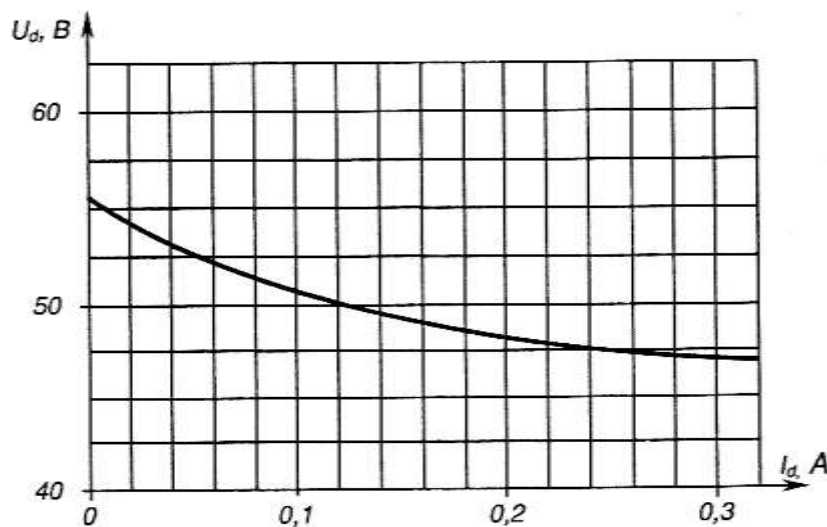


Рис. 1.7 - Навантажувальна характеристика випрямляча за $U_d = 48\text{В}$ та $I_d = 0,3\text{А}$.

За рис.1.7 можна зробити висновок, що параметри розрахованого випрямляча відповідають завданню, бо за $I_d = 0,3\text{А}$ маємо $U_d = 46,75\text{В}$, що відрізняється від заданого значення $U_d = 48\text{В}$ на 2,7%. Це відповідає допустимій точності при інженерних розрахунках (5%).

1.4.3.19. Знаходимо значення напруги холостого ходу випрямляча:

$$U_{d\text{х.х.}} = U_{2m} = U_2 \sqrt{2} \quad (1.28)$$

$$U_{d\text{х.х.}} = 1,41 \cdot 39,6 = 55,8 \text{ В.}$$

1.4.3.20. Величина струму короткого замикання становить:

$$I_{d\text{к.з.}} = \frac{\sqrt{2}U_2}{r}; \quad (1.29)$$

$$I_{d\text{к.з.}} = \frac{1,41 \cdot 39,9}{6,41} = 8,7 \text{ А}$$

1.4.3.21. Величина внутрішнього опору випрямляча складає:

$$r_0 = \frac{U_{d\text{х.х.}} - U_d}{I_d}; \quad (1.30)$$

$$r_0 = \frac{55,8 - 48}{0,3} = 26 \text{ Ом.}$$

1.4.3.22. Знайдемо величину ККД розрахованого випрямляча:

$$\eta = \frac{U_d I_d}{U_d I_d + P_T + P_B}, \quad (1.31)$$

де P_T - втрати потужності в трансформаторі;

P_B - втрати потужності у одночасно працюючих діодах: $n_q = 2$ - див. формулу (1.13).

Втрати потужності в трансформаторі:

$$P_T = S_T(1 - \eta_T) = 21,6 (1 - 0,86) = 3,02 \text{ Вт} \quad (1.32)$$

Втрати потужності в діодах:

$$P_B = I_a U_{np} n_q = 0,15 \cdot 1 \cdot 2 = 0,3 \text{ Вт} \quad (1.33)$$

Тоді ККД розрахованого випрямляча:

$$\eta = \frac{48 \cdot 0,3}{48 \cdot 0,3 + 3,02 + 0,3} = 0,81.$$

1.4.3.23. Електричну принципову схему розрахованого випрямляча наведено на рис 1.8.

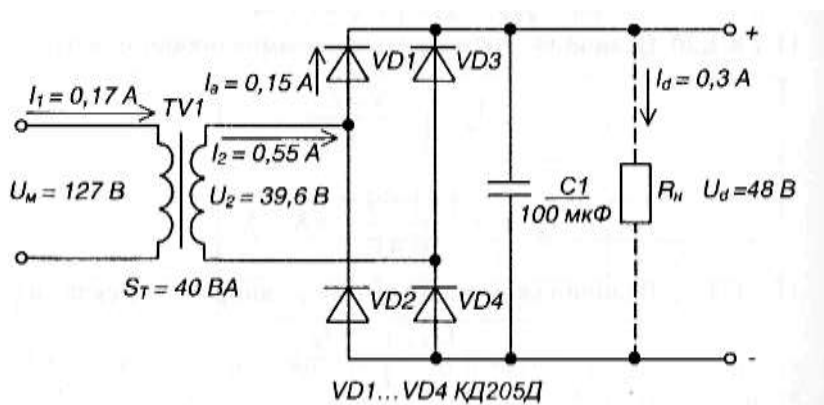


Рис. 1.8 - Однофазний мостовий випрямляч з ємнісним фільтром. Схема електрична принципова.

1.5. Контрольні запитання

1. Які випрямні схеми Вам відомі? Які з них використовуються без трансформатора?
2. Назвіть основні параметри, що характеризують роботу випрямляча?
3. Сформулюйте основні умови обирання випрямного діода у випрямлячах?
4. Для чого використовують згладжуючі фільтри? Які елементи в них використовуються, як вмикаються?
5. Наведіть структурну схему випрямляча і поясніть призначення його функціональних вузлів.

