

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет



5049 Методичні вказівки
до практичних робіт
із дисципліни «Енергетична електроніка»
для студентів спеціальності 171 «Електроніка»
всіх форм навчання

Суми
Сумський державний університет
2021

Методичні вказівки до практичних робіт із дисципліни
«Енергетична електроніка» / укладачі: А. І. Новгородцев,
В. М. Гапич. – Суми : Сумський державний університет, 2021. –
44 с.

Кафедра електроніки і комп'ютерної техніки

ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	4
Практичне заняття 1	
Розрахунок однофазних трансформаторів	5
Практичне заняття 2	
Розрахунок однофазних випрямлячів, що працюють на активне навантаження	10
Практичне заняття 3	
Розрахунок однофазних випрямлячів та порівняння результатів	15
Практичне заняття 4	
Розрахунок однофазного випрямляча, що працює на активно-індуктивне навантаження	18
Практичне заняття 5	
Розрахунок однофазних керованих випрямлячів. Розрахунок пасивних фільтрів	22
Практичне заняття 6	
Розрахунок трифазного мостового випрямляча з ємнісним фільтром	26
Практичне заняття 7	
Розрахунок Г-образного LC-фільтра трифазного нульового випрямляча	33
Практичне заняття 8	
Розрахунок трифазного мостового випрямляча з урахуванням комутаційних процесів	38
Список літератури	43

Вступ

Метою вивчення дисципліни «Енергетична електроніка» є оволодіння основними принципами дії малопотужних випрямлячів електричної енергії, їх систем управління, аналіз, розрахунок та проектування джерел вторинного електроживлення. Для досягнення поставленої мети навчальним планом передбачено виконання студентами практичних завдань, які сприяють більш поглибленому вивченню теоретичного матеріалу, формуванню вмінь використання знань на практиці.

Усі засоби електроживлення розподіляються на первинні та вторинні. До первинних джерел відносять такі, які перетворюють неелектричну енергію в електричну.

Безпосереднє використання первинних джерел утруднене тим, що їх вихідна напруга здебільшого не збігається за рівнем із необхідною, не піддається регулюванню, а стабільність її недостатньо висока. Тому більшість електронних пристроїв містить вторинне джерело електроживлення, яке підключається до мережі змінного струму або до одного з первинних джерел.

Джерела вторинного електроживлення перетворюють змінну напругу одного рівня у сталу, або змінну іншого, або декількох рівнів, забезпечуючи за необхідності стабілізацію чи регулювання напруги і струму навантаження за заданим законом.

Під час виконання практичних завдань, студенти набувають навиків розрахунку основних типів силових та інформаційних перетворювальних систем, а також побудовою їх структурних та принципівих схем. Розглядають основні методи розрахунку та аналізу пристроїв промислової електроніки у різних режимах роботи і за різних умов.

За результатами розрахунків з практичних завдань, отримують порівняльний аналіз однофазних та трифазних схем випрямлячів, що працюють на різні види навантаження. Отримують навички побудови тимчасових діаграм, які поглиблюють знання з принципу перетворення електричної енергії.

Практичне заняття 1

Розрахунок однофазних трансформаторів

Завдання 1

За заданими параметрами однофазного трансформатора визначити:

- номінальну потужність трансформатора S_N ;
- е. р. с. вторинної обмотки трансформатора E_2 ;
- напругу вторинної обмотки трансформатора U_2 ;
- номінальний струм первинної обмотки трансформатора I_{1N} ;
- коефіцієнт трансформації K_T ;
- магнітний потік Φ_T ;
- побудувати навантажувальну характеристику $U_2(\beta)$;

Вихідні дані для розрахунку:

$$U_{1N} = 220\text{В}, w_1 = 400 \text{ вит}, f = 50\text{Гц}, I_{2N} = 20,8 \text{ А}, \\ w_2 = 22 \text{ вит}, \Delta U_2 = 5 \% U_2, \text{ при } \beta = 1, \eta = 0,95.$$

Розрахунок

1. Визначимо магнітний потік осердя трансформатора.

При х.х. трансформатора $E_1 = U_1, E_2 = U_{2H}$.

Магнітний потік знаходимо з виразу:

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_T, \text{ звідки} \\ \Phi_m = \frac{E_1}{4,44 \cdot f \cdot w_1} = \frac{220}{4,44 \cdot 50 \cdot 400} = 0,0024 \text{Вб}.$$

1. Е. р. с. вторинної обмотки трансформатора:

$$E_{21} = 4,44 \cdot f \cdot w_{21} \cdot \Phi_T = 11,7\text{В}.$$

При $I_{2H} = 0, U_2 = E_2 = 11,7\text{В}$.

2. Номінальна напруга вторинної обмотки U_{2H} при $\beta = 1$:

$$U_{2H} = U_2 - 0,05U_2 = 11,7 - 0,05 \cdot 11,7 = 11,12\text{В}.$$

3. Коефіцієнт трансформації

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{220}{11,7} = 18,8.$$

4. Номінальна потужність трансформатора

$$S_H = I_{2H} \cdot U_{2H} = 20,8 \cdot 11,12 = 243 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

5. Номінальний струм первинної обмотки

$$I_{1H} = \frac{256}{220} = 1,16 \text{ А}.$$

6. Побудова навантажувальної характеристики $U_2 = f(\beta)$

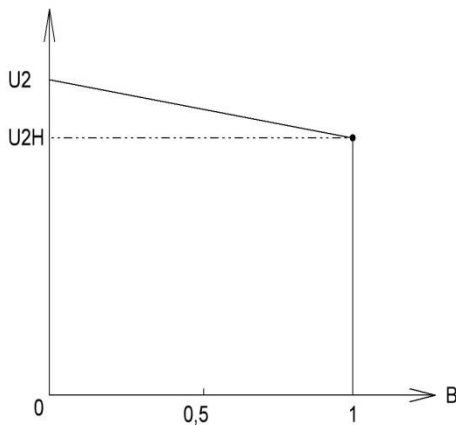


Рисунок 1 – Навантажувальна характеристика трансформатора

Завдання 2

За заданими параметрами однофазного трансформатора визначити:

- номінальний струм первинної обмотки I_{1H} ;
- струм холостого ходу I_{xx} ;
- коефіцієнт трансформації K_T ;

- номінальний струм вторинної обмотки I_{2H} ;
 - струм вторинної обмотки при $Z_H = 15 \text{ Ом}$;
 - коефіцієнт навантаження трансформатора β ;
 - напругу U_2 при $Z_H = 15 \text{ Ом}$ і $\cos\varphi_{2H} = 0,8$;
 - параметри Т-подібної схеми заміщення трансформатора.
- Початкові дані для розрахунку: $S_H = 50 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; $U_{1H} = 6 \text{ кВ}$;
 $U_{2H} = 525 \text{ В}$; $\cos\varphi_{10} = 0,1$; $\cos\varphi_{1k} = 0,48$; $P_0 = 350 \text{ Вт}$;
 $Z_H = 15 \text{ Ом}$; $\cos\varphi_{2H} = 0,1$; $U_k = 5,5 \% U_1$.

Розрахунок

1. Номінальний струм первинної обмотки

$$I_{1H} = \frac{S_H}{U_{1H}} = \frac{50 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^3} = 8,3 \text{ А.}$$

2. Струм холостого ходу

$$I_{xx} = \frac{P_0}{U_{1H} \cdot \cos\varphi_{10}} = 0,58 \text{ А.}$$

3. Коефіцієнт трансформації

$$K_T = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = 6 \cdot 10^3 / 525 = 11,4.$$

4. Номінальний струм вторинної обмотки

$$I_{2H} = \frac{S_H}{U_{2H}} = \frac{50 \cdot 10^3}{525} = 95,2 \text{ А.}$$

5. Струм у вторинній обмотці трансформатора при $Z_H = 15 \text{ Ом}$

$$I_2 = \frac{U_{2H}}{Z_H} = \frac{525}{15} = 35 \text{ А.}$$

6. Коефіцієнт навантаження трансформатора

$$\beta_{2H} = \frac{I_2}{I_{2H}} = \frac{35}{95,2} = 0,36.$$

7. Напруга U_2 при $Z_H = 15 \text{ Ом}$ і $\cos\varphi_{2H} = 0,8$

$$\Delta U_2 = \beta(U_a \cdot \cos \varphi_{2H} + U_p \cdot \sin \varphi_{2H}) = 9,3B, \quad \partial e$$

$$U_a = U_n \cdot \cos \varphi_{1k} = 0,055 \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,48 = 158,4B,$$

$$U_p = U_n \cdot \sin \varphi_{1k} = 0,055 \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,87 = 287B.$$

8. Параметри Т-образної схеми заміщення трансформатора (рис. 2).

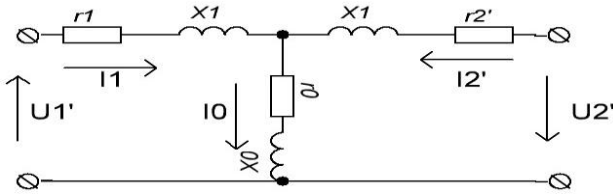


Рисунок 2 – Схема заміщення трансформатора

У режимі короткого замикання, складова намагніченого струму I_{1k} первинної обмотки у сотні разів менша струмів I_1 і I_2 , оскільки $U_k \ll U_H$. Тому гілкою зі струмом i_{1x} (рис. 2) можна знехтувати і прийняти $I_1 = I_2$.

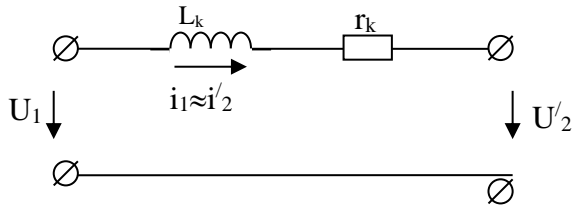


Рисунок 3 – Спрощена схема дослідження трансформатора

Втрати у трансформаторі при досліді короткого замикання, визначаються практично лише нагріванням обмоток, тому що напруга U_1 і магнітний потік у сердечнику дуже малі.

Параметри схеми заміщення можуть бути визначені за формулами:

- опір короткого замикання;

$$Z_K = \frac{U_K}{I_k} = \frac{U_K}{I_{1H}} = \frac{0,055 \cdot 6 \cdot 10^3}{8,3} = 39,7 \text{ Ом};$$

- активний опір короткого замикання;

$$r_k = \frac{P_k}{I_{1H}^2}, \text{ де } P_k = U_1 \cdot I_{1H} \cdot \cos \varphi_{1k} = 1314,7 \text{ Вт, тоді}$$

$$r_k = \frac{1314,7}{8,3^2} = 19 \text{ Ом};$$

- індуктивний опір короткого замикання;

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = 34,8 \text{ Ом.}$$

- опір первинної обмотки;

$$r_1 = r_2' = \frac{r_k}{2} = \frac{19}{2} = 9,5 \text{ Ом} \text{ — активний};$$

$$x_1 = x_2' = \frac{x_k}{2} = \frac{34,8}{2} = 17,4 \text{ Ом} \text{ — реактивний};$$

- опори вторинної обмотки трансформатора:

$$r_2 = \frac{r_2'}{K_T^2} = \frac{9,5}{11,4^2} = 0,073 \text{ Ом} \text{ — активний},$$

$$x_2 = \frac{x_2'}{K_T^2} = \frac{17,4}{11,4^2} = 0,133 \text{ Ом} \text{ — реактивний}.$$

Практичне заняття 2

Розрахунок однофазних випрямлячів, що працюють на активне навантаження

Завдання 3

Розрахувати однофазний двопівперіодний випрямляч, що працює на активне навантаження за поданими вихідними даними і накреслити тимчасові діаграми основних струмів і напруг.

Чинне значення напруги на вторинній обмотці трансформатора $U_2 = 220$ В. Опір навантаження $R_d = 22$ Ом.

Втрати у випрямлячі відсутні.

Формалізуємо вихідні дані:

Схема – однофазна мостова. Елементи схеми – ідеальні.

$$U_2 = 220 \text{ В}, R_d = 22 \text{ Ом}.$$

Визначити: $U_d, I_d, P_d, k_T, I_2, P_2, I_1, P_1, P_{тр}, I_{Вф},$

$I_B, I_{Вм}, U_{обр}, \Delta P_B$. Привести тимчасові діаграми

характерних струмів і напруг.

Розрахунок

1. Розрахувати випрямляч – це означає знайти всі позначені величини:

U_d, I_d – середнє значення випрямленої напруги і струму;

P_d – потужність навантаження;

$$k_T = \frac{U_1}{U_2} \text{ – коефіцієнт трансформації;}$$

I_1, I_2 – діючі значення струмів первинної і вторинної обмоток;

$P_1, P_2, P_{тр}$ – габаритна (типова) потужність відповідно первинної, вторинної обмоток і трансформатора в цілому;

$I_{всп}, I_B, I_{Вм}$ – струм вентиля (діода, тиристора) – відповідно середнє значення, діюче значення і максимальне;

$U_{зв}$ – зворотна максимальна напруга на вентилі;

ΔP_B – втрати потужності на вентилі.

2. Перш ніж перейти до вирішення завдання, зауважимо, що не всі зазначені величини можна знайти, тому що не задано напругу на первинній обмотці. У зв'язку з цим можливі два варіанти вирішення завдання:

– виключити з певних величин ті, які визначити неможливо (в нашому випадку це k_T , I_1).

Вибираємо перший варіант.

3. За словесним описом ідентифікуємо схему, якщо вона не приведена у вихідних даних, і позначимо усі струми і напруги так, як показано на рисунку 3.

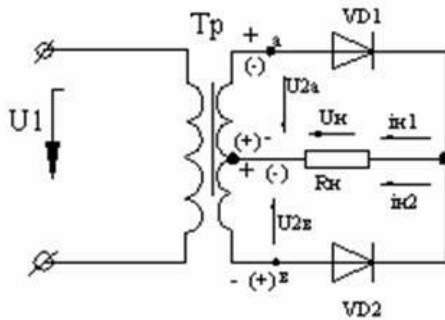


Рисунок 3 – Однофазний двопівперіодний випрямляч

4. Випрямлену напругу визначимо із співвідношення:

$$\frac{U_2}{U_d} = 1,11 \Rightarrow U_d = \frac{U_2}{1,11} = \frac{220}{1,11} = 198 \text{ В.}$$

5. Випрямлений струм (середнє значення):

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{198}{22} = 9 \text{ А.}$$

6. Потужність випрямленого струму:

$$P_d = U_d \cdot I_d = 198 \cdot 9 = 1782 \text{ Вт.}$$

7. Коефіцієнт трансформації:

$$k_T = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{198} = 1,11.$$

8. Діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора знайдемо із виразу:

$$\frac{I_2}{I_d} = 1,11 \Rightarrow I_2 = 1,11 I_d = 1,11 \cdot 9 = 10 \text{ А.}$$

9. Діюче значення струму первинної обмотки трансформатора:

$$\frac{I_1 \cdot k_T}{I_d} = 1,11 \Rightarrow I_1 = \frac{1,11 \cdot I_d}{k_T} = \frac{1,11 \cdot 9}{1,11} = 9 \text{ А.}$$

10. Габаритні потужності первинної і вторинної обмоток трансформатора для мостової схеми:

$$\frac{P_1}{P_d} = \frac{P_2}{P_d} = \frac{P_{\text{тр}}}{P_d} = 1,23 \Rightarrow$$

$$P_1 = P_2 = P_{\text{дд}} = 1,23 \cdot P_d = 1,23 \cdot 1782 = 2191,9 \text{ ВА.}$$

Розрахованих даних досить, щоб вибрати відповідний трансформатор за каталогом, або скласти технічне завдання на його проектування.

11. Для вибору діодів випрямляча, розрахуємо максимальну зворотну напругу, що прикладається до вимкненого діода:

$$\frac{U_{\text{зв.м}}}{U_d} = 1,57, U_{\text{зв.мак}} = 1,57 \cdot 198 = 310,8 \text{ В.}$$

Допустима зворотна напруга, яку повинен витримати діод, вибирають із деяким запасом:

$$U_{\text{зв.доп}} = \frac{U_{\text{зв.м}}}{k_{\text{зп}}},$$

де $k_{zn} = 0,5 \div 0,9$ – деякий коефіцієнт запасу за напругою, причому менше значення береться для більш надійного перетворювача.

12. Середнє значення струму діода:

$$\frac{I_{Bcp}}{I_d} = 0,5 \Rightarrow I_{Bcp} = I_d \cdot 0,5 = 9 \cdot 0,5 = 4,5 \text{ А.}$$

13. Діюче значення струму вентиля (діода):

$$\frac{I_B}{I_d} = 0,785 \Rightarrow I_B = 0,785 \cdot I_d = 0,785 \cdot 9 = 7 \text{ А.}$$

14. Максимальне значення струму вентиля:

$$\frac{I_{Bm}}{I_d} = 1,57 \Rightarrow I_{Bm} = 1,57 \cdot I_d = 1,57 \cdot 9 = 14,1 \text{ А.}$$

15. Втрати потужності в одному діоді:

$$\Delta P_{\partial} = I_{Bcp} \cdot \Delta U_0 + I_B^2 \cdot r_{\partialин},$$

де ΔU_0 , $r_{\partialин}$ – параметри апроксимованої ВАХ, відповідно залишкове зниження напруги (за нульового струму) і динамічний опір діода в робочій точці. У цьому разі діоди ідеальні – $\Delta U_0 = 0$; $r_{\partialин} = 0$.

16. Далі з тієї самої таблиці беремо інші параметри випрямляча, які знадобляться нам, наприклад, при виборі фільтра.

Число пульсацій напруги на періоді мережі $m_{\pi} = 2$.

Частота першої гармоніки $f_1 = m_{\pi} \cdot f_c = 2 \cdot 50 = 100$ Гц.

Коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги за першою гармонікою:

$$k_n \% = \frac{U_{1m} \cdot 100\%}{U_d} = 66,7\%.$$

Часові діаграми основних струмів та напруг, до яких відносять $U_1, U_2, U_d, I_d, i_2, i_B, U_B$, наведені на рисунку 4.

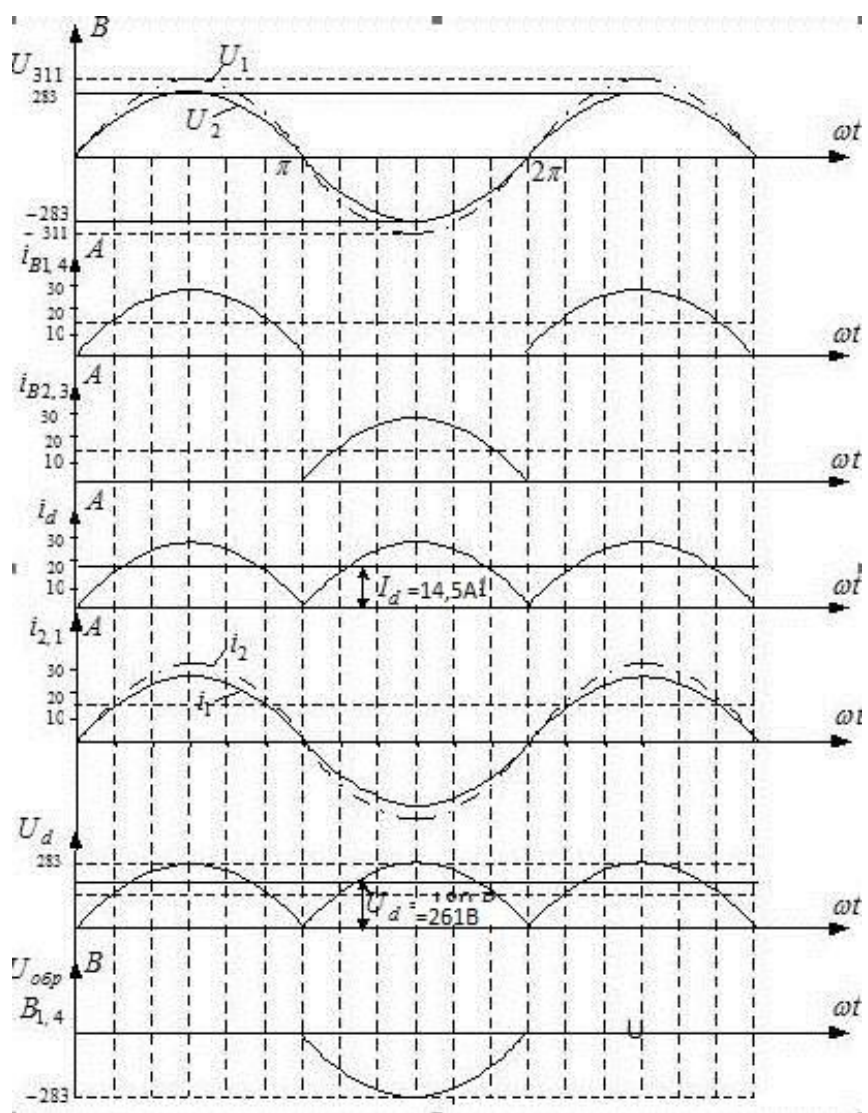


Рисунок 4 – Часові діаграми струмів і напруг

Практичне заняття 3

Розрахунок однофазних випрямлячів та порівняння результатів

Завдання 4

Розрахувати та порівняти однофазний випрямляч з середньою точкою і однофазний однопівперіодний випрямляч, які працюють на активне навантаження без фільтра, якщо випрямлена напруга на навантаженні дорівнює 215 В, потужність у навантаженні дорівнює 1640 Вт, напруга мережі живлення 220 В, частота мережі 50 Гц.

Вихідні дані для розрахунку:

Схеми – однофазна з середньою точкою (нульова) і однофазна однопівперіодна (рис. 5). $P_d = 1\ 640$ Вт; $U_d = 215$ В;

$U_{ж} = 220$ В, $f = 50$ Гц.

Визначити:

I_d , R_d , k_T , U_2 , I_2 , P_2 , I_1 , P_1 , $P_{тр}$, I_{Bcp} , I_B , I_{Bm} , $U_{обр}$, ΔP_B .

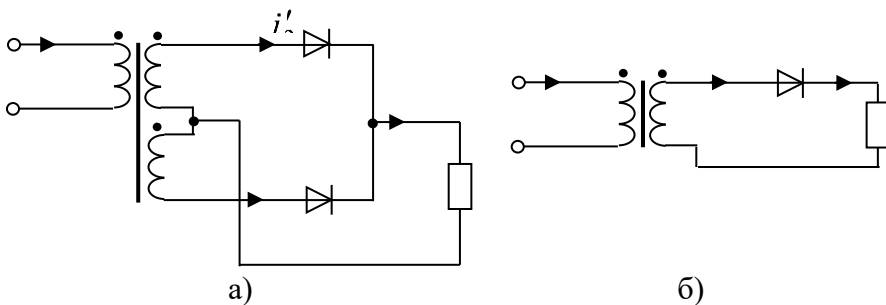


Рисунок 5 – Схеми випрямлячів: а) двопівперіодний; б) однопівперіодний

Розрахунок

1. Визначаємо струм у навантаженні:

$$I_d = P_d / U_d = 1640 / 215 = 7,62 \text{ А.}$$

2. Визначаємо опір у навантаженні:

$$R_d = U_d / I_d = 215 / 7,62 = 28,22 \text{ Ом.}$$

3. Для однофазного нульового двопівперіодного випрямляча:

$$\frac{U_2}{U_d} = 1,11 \Rightarrow U_2 = 1,11 \cdot 215 = 238,65 \text{ В} - \text{ напруга на вторинній}$$

обмотці трансформатора;

$$\frac{I_2}{I_d} = 0,785 \Rightarrow I_2 = 0,785 \cdot 7,62 = 5,98 \text{ А} - \text{ струм у вторинній}$$

обмотці трансформатора;

$$I_{a \text{ ср}} = 0,5 \cdot I_d = 0,5 \cdot 7,62 = 3,81 \text{ А} - \text{ середній струм діода;}$$

$K_{\text{тр}} = U_1 / U_2 = 215 / 238,65 = 0,9$ – коефіцієнт трансформації трансформатора;

$I_1 = 1,11 \cdot I_d / K_{\text{тр}} = 1,11 \cdot 7,62 / 0,9 = 9,4 \text{ А}$ – струм у первинній обмотці трансформатора;

$$\frac{S_2}{P_d} = 1,74 \Rightarrow S_2 = 1,74 \cdot P_d = 1,74 \cdot 1640 = 2853,6 \text{ В} \cdot \text{А} - \text{ потужність}$$

вторинної обмотки трансформатора;

$$\frac{S_1}{P_d} = 1,23 \Rightarrow S_1 = 1,23 \cdot P_d = 1,23 \cdot 1640 = 2017,2 \text{ В} \cdot \text{А} - \text{ потужність}$$

первинної обмотки трансформатора;

$S_{\text{тр}} / P_d = 1,48$, $S_{\text{тр}} = 1,48 \cdot P_d = 1,48 \cdot 1640 = 2427,2 \text{ В} \cdot \text{А}$ – потужність трансформатора;

$U_{\text{зв max}} / U_d = 3,14$, $U_{\text{зв max}} = 3,14 \cdot 215 = 675 \text{ В}$ – максимальна зворотна напруга на діоді;

$I_{2m} = \pi/2 \cdot I_d = 1,57 \cdot I_d = 1,57 \cdot 7,62 = 11,96 \text{ А}$ – амплітуда струму у вторинній обмотці трансформатора.

4. Для однофазного однопівперіодного випрямляча:

$$\frac{U_2}{U_1} = 2,22 \Rightarrow U_2 = 2,22 \cdot U_d = 2,22 \cdot 215 = 477,3\text{В} - \text{напряга на}$$

вторинній обмотці трансформатора;

$I_2 = 7,62\text{А}$ – струм у вторинній обмотці трансформатора;

$I_d = 7,62\text{А}$ – струм у навантаженні;

$K_{\text{тр}} = U_1/U_2 = 220/477,3 = 0,46$ – коефіцієнт трансформації трансформатора;

$I_1 = K_{\text{тр}} \cdot I_d = 0,46 \cdot 7,62 = 3,5\text{А}$ – струм у первинній обмотці трансформатора;

$$\frac{S_2}{P_d} = 3,48 \Rightarrow S_2 = 3,48 \cdot P_d = 3,48 \cdot 1640 = 5707,2\text{В}\cdot\text{А} - \text{потужність}$$

вторинної обмотки трансформатора;

$$\frac{S_1}{P_d} = 2,69 \Rightarrow S_1 = 2,69 \cdot P_d = 2,69 \cdot 1640 = 4411,6\text{В}\cdot\text{А} - \text{потужність}$$

первинної обмотки трансформатора;

Таблиця 1 – Порівняння розрахункових параметрів

Параметр	Двопівперіодний	Однопівперіодний	Примітки
$U_d, \text{В}$	215	215	
$U_2, \text{В}$	238,65	477,3	238,65
$I_2, \text{А}$	5,98	11,96	5,98
$I_a \text{ ср. А}$	3,81	7,62	3,81
$K_{\text{тр}}$	0,9	0,46	0,44
$I_1, \text{А}$	9,4	3,5	5,9
$S_2, \text{В}\cdot\text{А}$	2853,6	5707,2	2853,6
$S_1 \text{ В}\cdot\text{А}$	2017,2	4411,6	1605,6
$S_{\text{тр}} \text{ В}\cdot\text{А}$	2427,2	5067,6	2640,4
$U_{\text{зв max}}, \text{В}$	675	675	–
$K_{\text{п}}$	0,67	1,57	0,9

$S_{\text{ТР}} / P_d = 3,09$; $S_{\text{ТР}} = 3,09 \cdot P_d = 3,09 \cdot 1640 = 5067,6 \text{ В} \cdot \text{А}$ – потужність трансформатора;

$U_{\text{ЗВ max}} / U_d = 3.14$; $U_{\text{ЗВ max}} = 3,14 \cdot 215 = 675 \text{ В}$ – максимальна зворотна напруга на діоді;

$I_{2m} = \pi/2 \cdot I_d = 1.57 \cdot I_d = 1,57 \cdot 7,62 = 11.96 \text{ А}$ – амплітуда струму у вторинній обмотці трансформатора. Порівняльні розрахунки для двох видів випрямлячів, наведені в таблиці 1.

Практичне заняття 4

Розрахунок однофазного випрямляча, що працює на активно-індуктивне навантаження

Завдання 5

Розрахувати однофазний випрямляч з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора (рис. 6), який працює на активно-індуктивне навантаження. Початкові дані для розрахунку:

- напруга живлення мережі $U_1 = 220 \text{ В}$;
- коефіцієнт трансформації $K_T = 2,2$;
- опір навантаження $R = 10 \text{ Ом}$;
- індуктивний опір навантаження X_d , набагато більший активного, втрати в елементах схеми відсутні ($X_d > R_d$).

Визначити такі параметри: U_d , I_d , P_d , I_1 , P_1 , $P_{\text{ТР}}$, $I_{\text{ср}}$, I_B , $I_{\text{ВМ}}$, $U_{\text{ЗВ max}}$, ΔP_B .

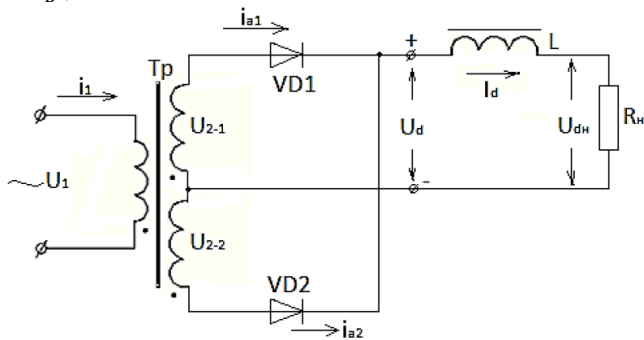


Рисунок 6 – Двопівперіодний випрямляч з активно-індуктивним навантаженням

Розрахунок

Особливістю випрямляча, який працює на активно-індуктивне навантаження при ($X_d > R_d$), є те, що струм навантаження I_d , ідеально згладжений, причому $I_d = I_{dm} = I_{вм}$.

1. Знаходимо фазну напругу U_2 , тобто напругу вторинної напівобмотки:

$$U_2 = \frac{U_1}{K_T} = \frac{220}{2,2} = 100 \text{ В.}$$

2. Випрямлену напругу визначимо із формули

$$U_d = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2 = 0,9 \cdot U_2 = 0,9 \cdot 100 = 90 \text{ В.}$$

3. Струм у навантаженні

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{90}{10} = 9 \text{ А.}$$

4. Потужність навантаження

$$P_d = U_d \cdot I_d = 90 \cdot 9 = 810 \text{ Вт.}$$

5. Діюче значення струму вторинної обмотки

$$I_2 = I_d / \sqrt{2} = \frac{9}{\sqrt{2}} = 6,36 \text{ А.}$$

6. Діюче значення струму первинної обмотки

$$I_1 = I_d / K_T = 9 / 2,2 = 4,1 \text{ А.}$$

7. Габаритна потужність вторинних обмоток

$$S_2 = m_2 \cdot U_2 \cdot I_2 = 2 \cdot 100 \cdot 6,36 = 1272 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

8. Відносна габаритна потужність вторинних обмоток

$$\frac{S_2}{P_d} = \frac{1272}{810} = 1,57,$$

тобто перевищує потужність навантаження у 1,57 раза.

9. Габаритна потужність первинної обмотки трансформатора

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 = 200 \cdot 4,1 = 902 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

$$\frac{S_1}{P_d} = \frac{902}{810} = 1,11.$$

10. Габаритна потужність трансформатора загалом

$$S_{\text{тр}} = (S_1 + S_2)/2 = (1272 + 902)/2 = 1087 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

$$S_{\text{тр}}/P_d = 1087/810 = 1,34.$$

Таким чином, габаритна потужність трансформатора у 1,34 раза перевищує потужність навантаження.

11. Середнє значення струму через вентиль

$$I_{\text{вср}} = I_d/2 = 9/2 = 4,5 \text{ А}.$$

12. Діюче значення струму через вентиль дорівнює діючому значенню струму через вторинну обмотку

$$I_B = I_2 = 6,36 \text{ А}.$$

13. Максимальне значення струму через вентиль

$$I_{Bm} = I_d = 9 \text{ А}.$$

14. Зворотна максимальна напруга на діоді

$$U_{\text{зв.мах}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_2 = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 100 = 283 \text{ В}.$$

Відповідно розрахункам із довідника вибираємо вентилі за параметрами: $I_{\text{пр.мах}} = \text{А}$, $U_{\text{зв.мах}} = \text{В}$.

15. Тимчасові діаграми струмів і напруг наведені на рисунку 7.

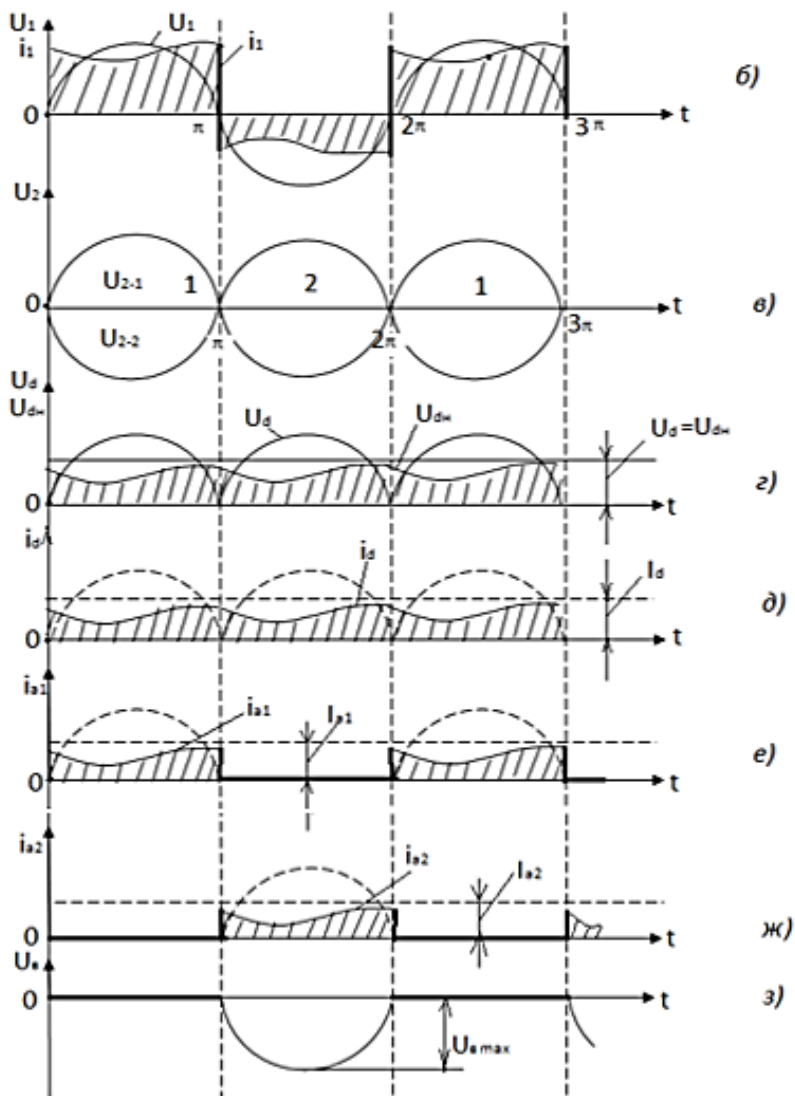


Рисунок 7 – Тимчасові діаграми роботи випрямляча

Практичне заняття 5

Розрахунок однофазних керованих випрямлячів.

Розрахунок пасивних фільтрів

Завдання 6

Розрахувати кут керування тиристорами та струм первинної обмотки трансформатора однофазного випрямляча з середньою точкою, який працює на активне навантаження. Втратами у випрямлячі нехтуємо.

Початкові дані для розрахунків:

- $R_d = 6 \text{ Ом}$ – активне навантаження;
- $U_{1\phi} = 220 \text{ В}$ – напруга мережі;
- $U_{2\phi} = 100 \text{ В}$ – напруга вторинної обмотки трансформатора;
- $I_d = 10 \text{ А}$ – струм у навантаженні.

Визначити: α – кут керування; I_1 – струм первинної обмотки трансформатора. Привести тимчасові діаграми характерних струмів і напруг.

Розрахунок

1. Наведемо схему керованого випрямляча з позначенням відповідних струмів і напруг (рис. 8).

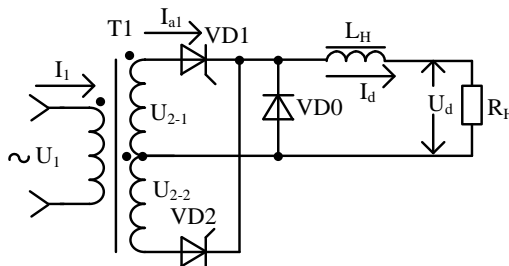


Рисунок 8 – Схема керованого випрямляча

1. Середнє значення випрямленої напруги за деякого кута керування

$$U_{d\alpha} = I_{d\alpha} \cdot R_d = 10 \cdot 6 = 60 \text{ В.}$$

2. Напряга за активного навантаження пов'язана з напругою вторинної обмотки та кутом керування тиристорами співвідношенням

$$U_{d\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} \cdot U_{2\phi} \cdot \sin t dt = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{2\phi} (1 + \cos \alpha), \quad (1,1)$$

звідси можна знайти кут керування тиристорами.

3. При куті керування $\alpha = 0$, що відповідає схемі некеруваного випрямляча, із (1,1) отримаємо

$$U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{2\phi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot 100 = 90 \text{ В,}$$

тоді вираз (1,1) можна переписати у вигляді

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right). \quad (1,2)$$

Із (1,1) знаходимо

$$\begin{aligned} & \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{2\phi} (1 + \cos \alpha) \rightarrow \\ \rightarrow \alpha & = \arccos \left[\frac{U_{d\alpha}}{\sqrt{2} \cdot U_{2\phi}} \pi - 1 \right] = \left[\frac{60 \cdot \pi}{\sqrt{2} \cdot 100} - 1 \right] = 1,231 \text{ рад, що} \end{aligned}$$

відповідає $\alpha^0 = \frac{180^0}{\pi} \cdot 1,231 = 70,6^0$.

Аналогічно із (1,2): $1 + \cos \alpha = \frac{2U_{d\alpha}}{U_{d0}} \rightarrow$

$$\rightarrow \cos \alpha = \arccos \left[\frac{2U_{d\alpha}}{U_{d0}} - 1 \right] = \arccos \left[\frac{2 \cdot 60}{90} - 1 \right] = 1,23 \text{ рад.}$$

$$\alpha^0 = 70,6^0.$$

4. Для визначення струму первинної обмотки необхідно знайти коефіцієнт трансформації

$$K_{\text{тр}} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{220}{100} = 2,2.$$

5. Діюче значення струму первинної обмотки

$$I_1 = \frac{I_{2m}}{K_{\text{тр}}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right]}.$$

Амплітудне значення струму вторинної обмотки

$$I_{2m} = \frac{U_{2m}}{R_d} = \frac{\sqrt{2}}{R_d} \cdot U_2 = \frac{\sqrt{2}}{6} 100 = 23,6 \text{ A}.$$

Тоді $I_1 = \frac{23,6}{2,2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \frac{1,23}{2} + \frac{1}{4} \sin (2 \cdot 1,23) \right]} = 6,39 \text{ A}.$

Тимчасові діаграми характерних величин керованого випрямляча наведені на рисунку 9.

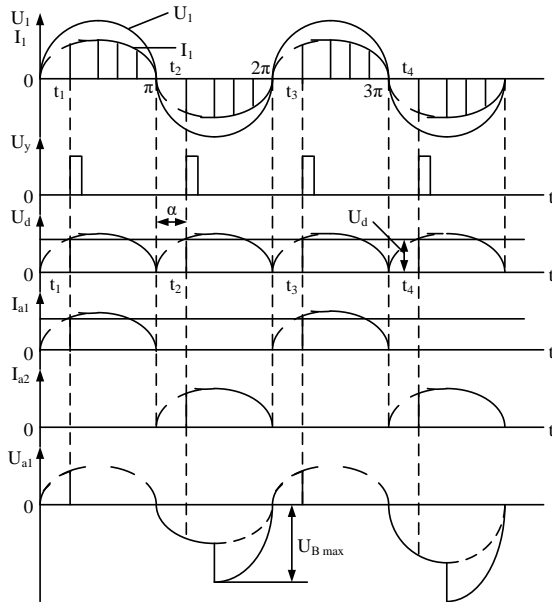


Рисунок 9 – Тимчасові діаграми характерних величин

Розрахунок пасивних фільтрів

Завдання 7

Розрахувати індуктивний та ємнісний фільтри (рис. 10) для однофазного мостового випрямляча, що отримує живлення безпосередньо від мережі з напругою $U = 220$ В при опорі навантаження $R_H = 50$ Ом. Коефіцієнт пульсацій напруги навантаження $K_{\text{пн}} = 0,2$. Як зміниться ефективність фільтрів, якщо навантаження збільшиться вдвічі ($R_H = 25$ Ом)?

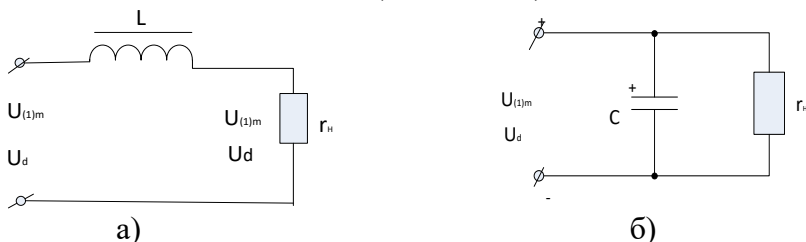


Рисунок 10 – Індуктивний (а) та ємнісний (б) фільтри

Розрахунок

1. Середнє значення напруги для однофазної мостової схеми випрямляча

$$U_d = 0,9 \cdot U_2 = 0,9 \cdot 220 = 198 \text{ В.}$$

2. Коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги на вхід фільтра

$$K_{\text{п}} = 2/(m_n^2 - 1) = 2/(2^2 - 1) = 0,667.$$

3. Коефіцієнт згладжування індуктивного фільтра

$$K_{\text{сг}} = K_{\text{п}}/K_{\text{пн}} = 0,667/0,2 = 3,335.$$

4. Величина індуктивності фільтра

$$L_{\phi} = \frac{K_H}{m_n \omega} \sqrt{(K_{\text{зг}}^2 - 1)} = \frac{50}{2 \cdot 314} \sqrt{(3,335^2 - 1)} = 0,253 \text{ Гн.}$$

5. При зменшенні опорі навантаження вдвічі коефіцієнт згладжування фільтра становить

$$K_{зг} = \frac{\sqrt{R_H^2 + (m\omega L_\phi)^2}}{R_H} = \frac{\sqrt{25^2 + (2 \cdot 314 \cdot 0,253)^2}}{25} = 6,43.$$

Таким чином, фільтр стає більш ефективним майже вдвічі.

6. Ємність конденсатора фільтра

$$C = \frac{I_d \cdot \pi}{2\omega K_{пн} U_d} = \frac{\pi}{2\omega K_{пн} R_H} = \frac{3,14}{2 \cdot 314 \cdot 0,2 \cdot 50} = 500 \text{ мкФ}.$$

Якщо опір навантаження зменшиться вдвічі, то коефіцієнт пульсацій на навантаженні збільшиться вдвічі і становить $K_{пн} = 0,4$, тобто ємнісний фільтр із зростанням навантаження стає неефективним.

Практичне заняття 6

Розрахунок трифазного мостового випрямляча з ємнісним фільтром

Завдання 8

Розрахувати параметри трансформатора і вентилів трифазного мостового випрямляча, що працює на активне навантаження з ємнісним фільтром за такими вихідними даними:

- фазна напруга мережі – $U_1 = 220\text{В}$;

- частота напруги мережі – $f = 50\text{ Гц}$.

- схема – трифазна мостова (Ларіонова) з ємнісним фільтром;

$U_d = 210\text{ В}$; $P_d = 1400\text{ Вт}$; $k_{п1} = 0,01$; $U_1 = 220\text{В}$; $f = 50\text{ Гц}$.

Визначити: I_d , C , U_2 , k_T , I_2 , P_2 , I_1 , P_1 , $P_{тр}$, $I_{Вср}$, I_B ,

$I_{Вм}$, $U_{обр.м}$, ΔP_B . Навести тимчасові діаграми величин.

Розрахунок

1. Оскільки в задачі не зазначена схема з'єднання первинних обмоток трансформатора, то беремо їх (на свій розсуд), з'єднаними в «зірку». Схема зображена на рисунку 11.

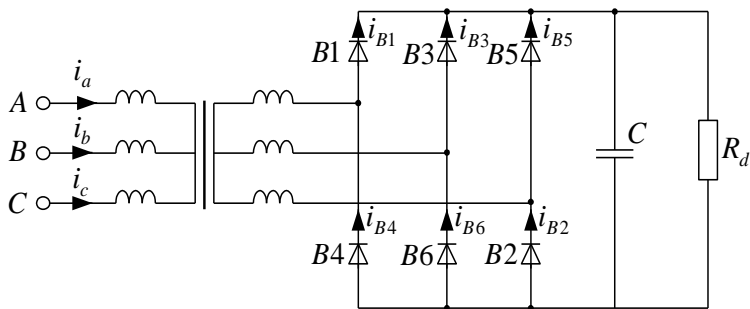


Рисунок 11 – Схема трифазного мостового випрямляча

Оскільки навантаження з ємнісним фільтром, то необхідно врахувати в схемі елементи, які обмежують струм вентилів. З цього приводу в завданні нічого не сказано.

Будемо вважати, що струм в вентилях обмежується активним і індуктивним опорами трансформатора (індуктивний опір відповідає індуктивному опору розсіювання магнітного потоку трансформатора), приведеними до вторинної обмотки. Тоді схема набирає вигляду, наведеного на рисунку 12.

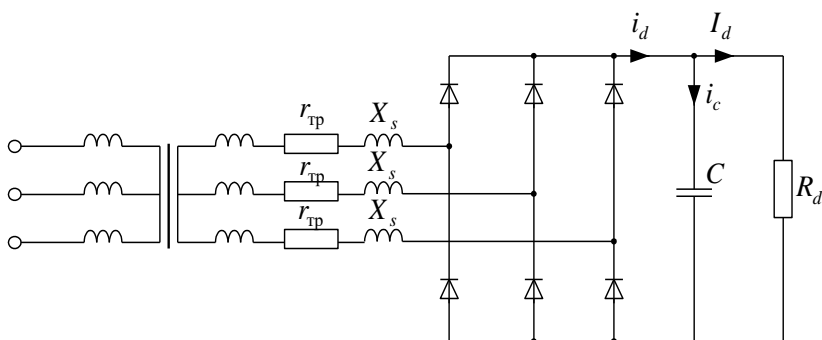


Рисунок 12 – Трифазна схема з обмежувальними опорами у ланцюзі обмоток

2. Струм у вентилях і в обмотках буде обмежуватися активними і індуктивними опорами фази трансформатора, які орієнтовно можна розрахувати за формулою

$$r_{\text{тр}} = r_1' + r_2 = K_r \frac{U_d}{I_d \cdot f_c \cdot B_m} \cdot \sqrt[4]{\frac{S \cdot f_c \cdot B_m}{U_d \cdot I_d}},$$

де $K_r = 4,5$ — для мостової трифазної ($\Delta-\Delta$);

$$U_d = 210 \text{ В}; I_d = \frac{P_d}{U_d} = \frac{1400}{210} = 6,7 \text{ А}; f_c = 50 \text{ Гц}; B_m = 1,5 \text{ Тл};$$

3. Індуктивний опір розсіювання фази трансформатора

$$X_S = \omega L_S = K_L \cdot \frac{\omega \cdot S \cdot U_d}{(p-1)^2 I_d \cdot f_c \cdot B_m} \sqrt[4]{\frac{U_d \cdot I_d}{S \cdot f_c \cdot B_m}},$$

де $K_L = 1,9 \cdot 10^{-3}$; $p = 2$ - для двообмоткової конструкції;

$S = 3$ - для трифазного трансформатора;

$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314$ рад/сек - колова частота напруги мережі.

$$\text{Тоді } X_S = 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{314 \cdot 3 \cdot 210}{1 \cdot 6,7 \cdot 50 \cdot 1,5} \sqrt[4]{\frac{210 \cdot 6,7}{3 \cdot 50 \cdot 1,5}} = 7,2 \text{ Ом.}$$

4. Розраховуємо параметр A за формулою

$$A = \frac{\pi \cdot r}{m \cdot R_d} = \frac{\pi \cdot 5,8}{6 \cdot 31,5} = 0,096,$$

$$\text{де } R_d = \frac{U_d}{I_d} = \frac{U_d \cdot U_d}{P_d} = \frac{U_d^2}{P_d} = \frac{210^2}{1400} = 31,5 \text{ Ом.}$$

$m = m_{\text{п}} = 6$, $m_{\text{п}}$ - число пульсацій для мостової схеми дорівнює $m_{\text{п}} = 2m_2 = 2 \cdot 3 = 6$, де m_2 - число вторинних фаз.

5. За кривою для графічного розрахунку $\theta = f(A)$ визначаємо кут відсічення $\theta = 22^\circ$, або $0,384$ рад.

Визначаємо кут провідності вентиля $\lambda^\circ = 2\theta = 44^\circ$, або $\lambda = 0,768$ рад.

6. Перевіряємо умову, щоб кут провідності вентиля не перевищував періодичності кривої випрямленої напруги:

$$\lambda^\circ < \frac{360^\circ}{m_{\text{п}}} \quad (44^\circ < 60^\circ), \text{ або в радіанах } (0,768 < 1,05).$$

Умова виконується, отже, графоаналітичний розрахунок дійсний, струм у вентилях матиме приблизно синусоїдальну форму на кути провідності вентиля.

7. Характерні діаграми струмів і напруг у схемі, наведені на рисунку 13. На діаграмі наведені: U_a, U_b, U_c – фазні напруги мережі; U_{dc} – напруга на конденсаторі фільтра;

U'_d – випрямлена напруга, що діє в контурі заряду конденсатора фільтра; $i_{B1}, i_{B2}, i_{B3}, i_{B4}, i_{B5}, i_{B6}$ – струми вентилів;

i_a, i_b, i_c – струми первинних обмоток трансформатора.

8. Визначаємо коефіцієнти

$$x = \operatorname{tg} \varphi = \frac{2 \cdot X_s}{2 \cdot r} = \frac{2 \cdot 7,2}{2 \cdot 5,8} = 1,24.$$

9. За кривою $B = f(A)$ для $A = 0,094$, $x = 1,4$ визначаємо коефіцієнт фазної ЕДС $B = 0,85$.

$$B = \frac{U_{2\text{лин}}}{U_d} = \frac{\sqrt{3}U_2}{U_d}, \text{ оскільки випрямляється вторинна}$$

лінійна напруга (завжди ввімкнено два вентиля моста). Звідси визначаємо

$$U_2 = \frac{B \cdot U_d}{\sqrt{3}} = \frac{0,85 \cdot 210}{\sqrt{3}} = 105 \text{ В.}$$

10. Коефіцієнт форми фазного струму за графіками $D = f(A)$ при $x=1,4$, $m = 2m_2 = m_{\text{п}} = 6$ і $A = 0,094$ для однофазного шестифазного випрямляча

$$D(A) = 2,5, \text{ але } D(A) = \frac{I'_2 \cdot m}{I_d} \Rightarrow 2,79 \text{ А.}$$

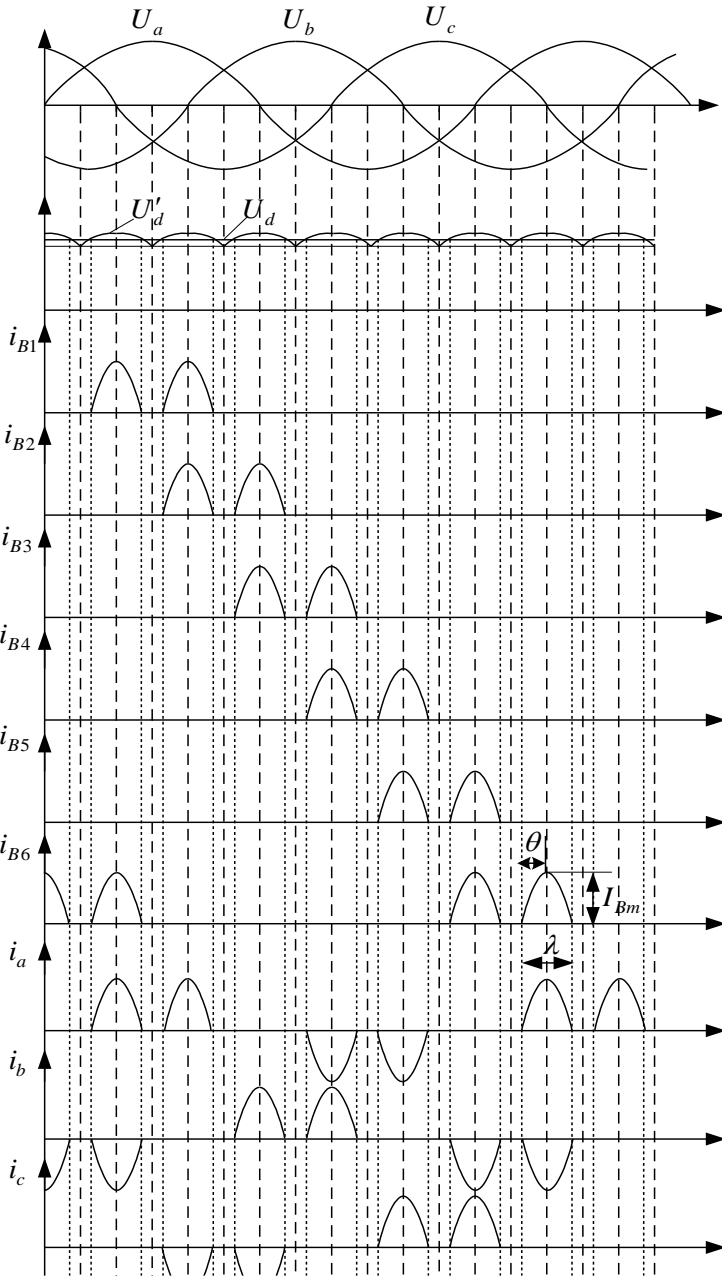


Рисунок 13 – Часові діаграми роботи трифазного випрямляча

Але у нас трифазний мостовий випрямляч, через обмотку якого проходить чотири імпульси струму, що відповідають одному однофазному, отже,

$$I_2 = \sqrt{4} \cdot I_2' = 2 \cdot 2,79 = 5,58 \text{ А.}$$

11. Коефіцієнт M постійної складової струму вентиля для шестифазного однофазного випрямляча визначаємо за графіком $M = f(A)$ за $x = 1,4$ і $A = 0,094$.

$$M = \frac{I_{Bm}}{I_{Bcp}} = \frac{I_{Bm} \cdot m}{I_d} = 7,3.$$

Тоді амплітудне значення струму діода

$$I_{\hat{a}\hat{o}} = \frac{M \cdot I_d}{m_2} = \frac{7,3 \cdot 6,7}{3} = 16,3 \text{ А.}$$

при $x = 1,4$ і $A = 0,094$.

Тут ми підставили $m = m_2 = 3$, тому що періодичність струму у вентилі мостового випрямляча дорівнює числу фаз вторинної обмотки. У нашому випадку $m = m_2 = 3$.

12. Коефіцієнт трансформації визначається як $\frac{I_2}{I_1} = K_{тр}$.

13. Габаритна потужність обмотки

$$P_2 = m_2 \cdot U_2 \cdot I_2 = 3 \cdot 105 \cdot 5,58 = 1757 \text{ ВА.}$$

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 = 3 \cdot 220 \cdot 3,1 = 2046 \text{ ВА.}$$

14. Коефіцієнт $H(A)$ для розрахунку пульсацій напруги на навантаженні знайдемо за графіками $H = f(A)$ за $A = 0,094$, $m_2 = m_{\pi} = 6$, $x = 1,4$. $H(A) \approx 600$.

15. Тоді коефіцієнт пульсацій напруги на навантаженні визначаємо за формулою

$$k'_{\pi 1} = \frac{H(A)}{r \cdot f \cdot C [\text{мкФ}]},$$

звідкіля можна знайти ємність C [мкФ] за відомим $k'_{\text{п1}} = 0,03$:

16. Середнє значення струму діода

$$I_{a \text{ ср}} = I_d / 3 = 6,7 / 3 = 2,23 \text{ А.}$$

17. Дійсне значення струму діода в $\sqrt{2}$ разів менше від струму вторинної обмотки, тому що через обмотку струм проходить двічі за період, а через вентиль – один раз.

$$I_a = \frac{I_2}{\sqrt{2}} = \frac{5,58}{\sqrt{2}} = 3,96 \text{ А.}$$

18. Амплітудне значення струму діода дорівнює амплітудному значенню струму вторинної обмотки, яке ми вже визначили в п. 10:

$$I_{\text{ам}} = I_{2\text{м}} = 16,3 \text{ А.}$$

19. Максимальна зворотна напруга, що прикладається до вимкненого вентиля:

$$U_{\text{зв max}} = \sqrt{6} \cdot U_2 = \sqrt{6} \cdot 105 = 252 \text{ В.}$$

За розрахунковими параметрами $U_{\text{зв max}} = 252 \text{ В}$,

$I_{\text{ам}} = 16,3 \text{ А}$, $I_a = 3,96 \text{ А}$, вибираємо вентиль Т112-20-3 з параметрами:

$$U_{\text{зв max}} = 300 \text{ В}; \quad I_{\text{пр}} = 20 \text{ А.}$$

20. Вибираємо конденсатор фільтра за такими вихідними даними:

- постійна складова напруги дорівнює напрузі на навантаженні $U_d = 230 \text{ В}$;

- амплітуду змінної складової напруги знайдемо з умови

$$k'_{\text{п1}} = \frac{U_{\text{км}\sim}}{U_d} = 0,03 \Rightarrow U_{\text{км}} = 0,03 \cdot U_d = 0,03 \cdot 210 = 6,3 \text{ В};$$

- частота змінної складової $f_1 = m_{\text{п}} \cdot f_c = 6 \cdot 50 = 300 \text{ Гц}$;

- ємність конденсатора фільтра $C = 152 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$.

За цими даними з довідника [Електричні конденсатори і конденсаторні установки / за заг. ред. д-ра техн. наук Г. С. Кучинського. С. 131] вибираємо оксидний алюмінієвий полярний конденсатор із фольговими обкладинками К50-27, призначений для роботи в колах постійного і пульсуючого струмів і в імпульсних режимах.

Практичне заняття 7

Розрахунок Г-образного LC- фільтра трифазного нульового випрямляча

Завдання 9

Розрахувати параметри згладжувального Г-подібного LC-фільтра, встановленого на виході трифазного випрямляча з нульовою точкою (рис. 14). Втрати у випрямлячі відсутні.

Початкові дані: $U_2 = 400\text{В}$; $f_c = 50\text{ Гц}$; $k_n^1 = 2\%$;

$R_H = 300\text{ Ом}$; $\eta = 1$. Визначити: L , I_d , $I_{d\sim}$, $U_{d\sim}$, f_1 , $P_{др}$, $\gamma_{др}$, $I_{др}$, C , $U_{C\sim}$, $U_{C\text{ннo}} = U_d$, $U_{C\text{max}}$.

Розрахувати параметри LC-фільтра це означає:

- для дроселя знайти величину індуктивності L ;
- величину струму підмагнічування дроселя, змінну складову струму дроселя, ефективне значення струму дроселя;
- змінну складову напруги, що визначає габаритну потужність дроселя і частоту першої гармоніки;
- активний опір обмотки дроселя;
- для конденсатора потрібно знайти ємність, змінну складову напруги на конденсаторі і її частоту, номінальну напругу і її максимальне значення.

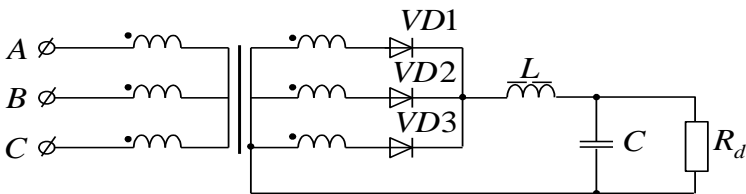


Рисунок 14 – Схема трифазного випрямляча з фільтром

Розрахунок

1. Середнє значення випрямленої напруги

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} \cdot U_2 = 1,17 \cdot U_2 = 468 \text{ В.}$$

2. Коефіцієнт пульсацій на вході фільтра

$$k_{\Pi} = \frac{2}{m_{\Pi}^2 - 1} = \frac{2}{3^2 - 1} = \frac{2}{8} = 0,25. \quad k_{\Pi} = 25 \%.$$

3. Коефіцієнт згладжування, який повинен забезпечити фільтр

$$k_{зг} = \frac{k_{\Pi}}{k_{\text{ПВІХ}}} = \frac{25}{2} = 12,5.$$

4. Струм підмагнічування дроселя дорівнює випрямленому струму

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{468}{300} = 1,56 \text{ А.}$$

5. Щоб забезпечити режим неперервного струму у дроселі, величину індуктивності потрібно вибрати більше деякої критичної величини

$$L_{\text{кр}} = \frac{2R_d}{(m_1^2 - 1)m_1 \omega_c} = \frac{2 \cdot 300}{(9 - 1) \cdot 3 \cdot 314} = 79,6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Вибираємо $L = 100 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} > L_{\text{кр}}$.

6. Величину LC визначаємо за формулою

$$[LC] = \frac{k_{згЛ} + 1}{m_1^2 \cdot \omega_c^2} = \frac{12,5 + 1}{3^2 \cdot 314^2} = 15,2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \cdot \text{Ф.}$$

7. Тоді величина ємності визначається як

$$C = \frac{[LC]}{L} = \frac{15,2 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-3}} = 152 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

8. Індуктивний опір дроселя на частоті першої гармоніки

$$X_L = m_{\Pi} \omega_c L = 3 \cdot 314 \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 94,2 \text{ Ом.}$$

9. Ємнісний опір конденсатора на частоті першої гармоніки

$$X_c = \frac{1}{m_{\Pi} \omega_c C} = \frac{1}{3 \cdot 314 \cdot 152 \cdot 10^{-6}} = 7,14 \text{ Ом.}$$

10. Порівняння X_L , X_C с R_d дозволяє зробити висновок, що фільтрація відбувається в основному за рахунок ємності, оскільки $X_C = 7,14 \ll R_d = 300$, $X_L = 94,2 < R_d = 300$.

11. Хвильовий опір фільтра

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{100 \cdot 10^{-3}}{152 \cdot 10^{-6}}} = 75,6 \text{ Ом.}$$

Визначимо максимальне значення струму при вмиканні випрямляча

$$I_{Lmax} = \frac{U_d}{\rho} = \frac{468}{75,6} = 6,2A,$$

і максимальну напругу на конденсаторі при відмиканні навантаження

$$U_{Cmax} = U_d + I_d \cdot \rho = 468 + 1,56 \cdot 75,6 = 586B.$$

12. Резонансну колову частоту фільтра знайдемо з виразу

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{100 \cdot 10^{-3} \cdot 152 \cdot 10^{-6}}} = 254 \text{ рад/с.}$$

Якщо $\omega_p \leq \frac{1}{2} m_{\Pi} \omega_c = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 314 = 471 \text{ рад/с,}$ то

резонансні явища у фільтрі виключені.

13. Критичне значення опору навантаження, за якого струм дроселя стане переривчастим, можна знайти із співвідношення

$$R_{d_{кр.}} = \frac{1}{2} L \cdot (m_n^2 - 1) m_n \omega_c = \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot (9 - 1) \cdot 3 \cdot 314 = 376 \text{ Ом.}$$

Якщо опір R_d навантаження зросте від $R_d = 300 \text{ Ом}$ до $R_d = 376 \text{ Ом}$, то струм стане переривчастим. Щоб відсунути цю межу в бік великих опорів, потрібно збільшити індуктивність дроселя.

14. Для розрахунку змінної складової струму дроселя потрібно знайти еквівалентний опір фільтра на частоті першої гармоніки, тобто

$$Z_\phi = jX_L + \frac{-jX_C \cdot R_d}{R_d - jX_C}.$$

Враховуючи, що в нашому випадку $X_C \ll R_d$, наближено отримаємо

$$Z_\phi = jX_L - jX_C = j \cdot (X_L - X_C) = j(94,2 - 7,14) = j87,06 \text{ Ом.}$$

15. Амплітуда змінної складової струму дроселя

$$I_{d\sim} = \frac{U_{1m}}{Z_\phi}.$$

Ураховуючи, що $\frac{U_{1m}}{U_d} = k_n = 0,25$, знаходимо

$$U_{1m} = 0,25 \cdot U_d = 0,25 \cdot 468 = 117 \text{ В.}$$

Тоді $I_{d\sim} = U_{1m}/Z_\phi = 117 / 87,06 = 1,33 \text{ А.}$

16. Діюче значення струму дроселя визначимо за формулою

$$I_{др} = \sqrt{I_d^2 + \left(\frac{I_{d\sim}}{\sqrt{2}}\right)^2} = \sqrt{1,56^2 + \left(\frac{1,33}{\sqrt{2}}\right)^2} = 1,83 \text{ А.}$$

17. Габаритну потужність дроселя знайдемо як добуток діючого значення струму дроселя на діюче значення напруги першої гармоніки напруги.

Амплітуда змінної складової напруги

$$U_{L\sim} = \frac{U_{1m} \cdot jX_L}{j \cdot (X_L - X_C)} = \frac{117 \cdot 94,2}{87,06} = 127B.$$

Габаритна потужність дроселя

$$P_{др} = \frac{U_{L\sim}}{\sqrt{2}} \cdot I = \frac{127}{\sqrt{2}} \cdot 1,83 = 165 B \cdot A.$$

18. Таким чином, отримаємо такі параметри дроселя фільтра:

$$L = 100 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}; \quad I_d = 1,56A; \quad I_{d\sim} = 1,33A; \quad I_n = 2,85 A; \\ U_{L\sim} = 127B; \quad f_1 = 150 \text{ Гц}; \quad P_{др} = 165 B \cdot A.$$

За цими розрахунковими параметрами, необхідно із довідника вибрати дросель.

19. Номінальна напруга на конденсаторі дорівнює випрямленій напрузі на навантаженні:

$$U_C = U_d = 468 B.$$

20. Максимальна напруга на конденсаторі для перехідного режиму (за відсутності струму у навантаженні):

$$U_{Cmax} = U_d + I_d \cdot \rho = 468 + 1,56 \cdot 75,06 = 585B.$$

21. Змінну складову напруги з частотою 150 Гц на конденсаторі знайдемо як

$$U_{C\sim} = \frac{U_{1m} \cdot jX_C}{j \cdot (X_L - X_C)} = \frac{117 \cdot 7,14}{87,06} = 9,6 B.$$

Практичне заняття 8

Розрахунок трифазного мостового випрямляча з урахуванням комутаційних процесів

Завдання 10

Визначити величину середньої напруги на активному навантаженні трифазного мостового випрямляча і знайти його залежність від струму навантаження, якщо:

- фазна напруга первинної обмотки трансформатора дорівнює 220 В;

- частота $f = 50$ Гц;

- коефіцієнт трансформації $K_{\text{тр}} = 2,5$;

- середнє значення струму навантаження $I_d = 11$ А;

- індуктивності розсіювання первинної обмотки $L_{S1} = 13,2 \cdot 10^{-3}$ Гн;

- індуктивності розсіювання вторинної обмотки $L_{S2} = 0,32 \cdot 10^{-3}$ Гн. Активними опорами обмоток знехтувати.

Схема мостова трифазна «зірка-зірка».

Навантаження – активне.

Розрахунок

1. Наведемо схему випрямляча з позначенням відповідних струмів і напруг (рис. 15).

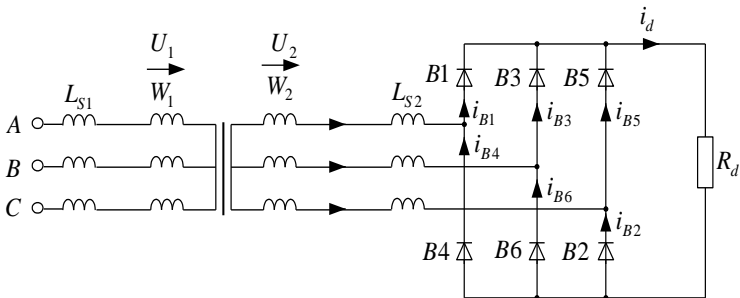


Рисунок 15 – Трифазна мостова схема випрямляча

Приводимо індуктивність розсіювання первинної обмотки до вторинної і підсумовуємо її з індуктивністю

розсіювання вторинної. Тоді сумарна індуктивність розсіювання трансформатора, приведена до вторинної обмотки, буде дорівнювати

$$L_{ST2} = L_{S2} + \frac{L_{S1}}{k_{\text{од}}^2} = 0,32 \cdot 10^{-3} + \frac{13,2 \cdot 10^{-3}}{(2,5)^2} = 2,43 \cdot 10^{-3}.$$

Зміниться відповідно і схема (рис. 15).

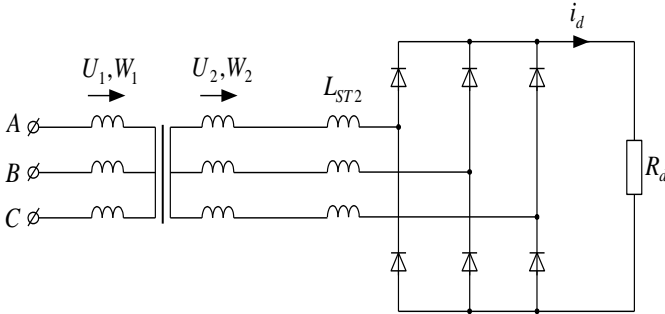


Рисунок 16 – Трифазна мостова схема без індуктивності розсіювання первинної обмотки

2. Для ідеального трансформатора можна знайти середнє значення напруги, яка буде напругою холостого ходу для реального трансформатора.

Для випрямляча із середньою точкою

$$U_{d \text{ xx cp.m}} = \sqrt{2} U_2 \cdot \frac{m_2}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m_2}. \quad (1)$$

Оскільки схема мостова, то її середнє значення буде подвоєне:

$$U_{d \text{ xx cp.m}} = 2\sqrt{2} \frac{U_2}{2} \cdot \frac{m_2}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m_2}. \quad (2)$$

3. Вторинна напруга (діюче значення)

$$U_2 = \frac{U_1}{k_{\text{од}}} = \frac{220}{2,5} = 88 \text{ В.}$$

Тоді напруга холостого ходу

$$U_{d_{xx\delta}} = 2\sqrt{2} \frac{88}{2} \cdot \frac{3}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{3} = 102 \text{ В.}$$

4. У разі збільшення струму навантаження, напруга на виході випрямляча, буде зменшуватися за рахунок зниження напруги на комутацію, обумовленою індуктивністю розсіювання.

Величина зниження напруги від комутації діодів випрямляча для схеми із середньою точкою визначається за формулою

$$\Delta U_{\text{cp}} = \frac{I_d \cdot X_{ST}}{2\pi/m_2},$$

де $X_{ST} = 2\pi f_c \cdot L_{ST2} = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,32 \cdot 10^{-3} = 0,1 \text{ Ом}$ – індуктивний опір розсіювання.

Оскільки мостовий випрямляч складається з двох нульових, увімкнених послідовно щодо навантаження, то й зниження напруги від комутації для мостового буде вдвічі більшим, тобто

$$\Delta U_{\text{cp}} = 2 \cdot \frac{I_d \cdot X_{ST}}{2\pi/m_2} = 2 \cdot \frac{11 \cdot 0,1}{2\pi/3} = 1,04 \text{ В.}$$

5. Тоді вихідна номінальна напруга випрямляча (напруга за номінального струму навантаження) буде дорівнювати

$$U_{d_{ii}} = U_{d_{xx}} - \Delta U_{xi} = 102 - 1 = 101 \text{ В.} \quad (5)$$

6. Необхідно звернути увагу, що вираз (3) справедливо і є точним за активно-індуктивного навантаження, причому $L_d/R_d \rightarrow \infty$. Для активного навантаження простого і точного виразу немає, тому в даному разі цей вираз і одержані результати будуть наближеними.

7. Порівняйте одержані значення напруг із напругами у завданні 3.3.1.

Залежність середнього значення випрямленої напруги від середнього значення струму навантаження називають

зовнішньою характеристикою і її можна одержати з (5) з урахуванням (3) і (4):

$$U_d = U_{d_{xx}} - 2 \cdot \frac{I_d \cdot X_{ST}}{2\pi} = U_{d_{xx}} - \frac{I_d \cdot X_{ST} \cdot m_2}{\pi}.$$

$$m_2$$

8. За виразом (6) за відомих значень $U_{d_{xx}}=102$ В; $X_{ST}=0,1$ Ом; $m_2 = 3$ будемо залежність $U_d = f(I_d)$.

Це буде пряма лінія з від'ємним нахилом, як показано на рисунку 17.

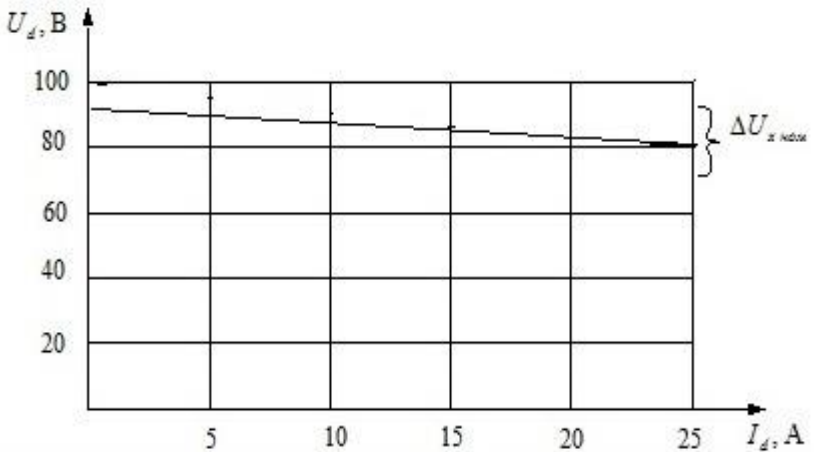


Рисунок 17 – Навантажувальна характеристика випрямляча

9. Щоб побудувати тимчасові діаграми струмів і напруг, необхідно розрахувати кут комутації. Для мостового випрямляча кут комутації дорівнює куту комутації нульового:

$$\gamma_x = \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot \Delta U_x}{U_{d0}} \right) = \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot 1}{102} \right) = 0,98 \text{ рад},$$

де $\gamma_x^\circ = 32,67^\circ$ – кут комутації венти́лів.

Тимчасові діаграми струмів і напруг наведені на рисунку 18.

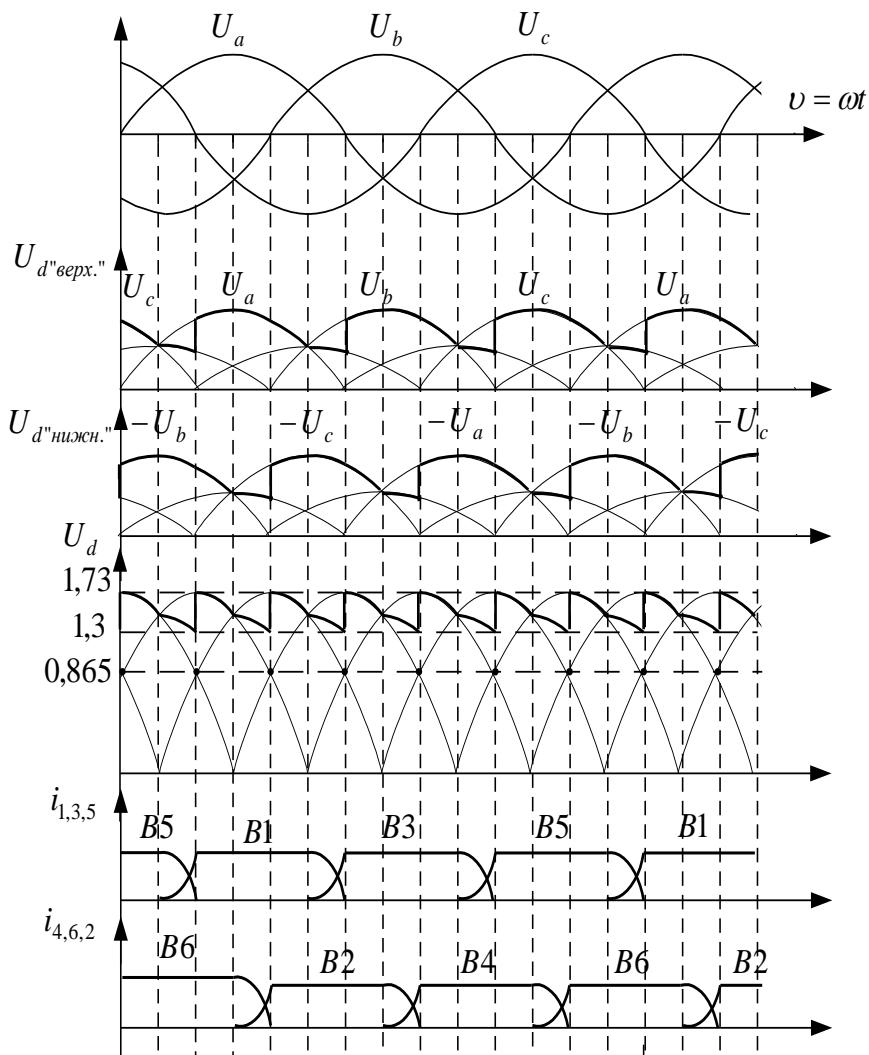


Рисунок 18 – Тимчасові діаграми струмів і напруг трифазного випрямляча з урахуванням кута комутації

Список літератури

1. Руденко В. С. Перетворювальна техніка / В. С. Руденко, В. І. Сенько. – Київ : ІСДО, 2014. – Ч. 1.
2. Руденко В. С. Перетворювальна техніка : підручник / В. С. Руденко, Ю. П. Гончаренков, О. В. Буденний. – Харків : Фоліо, 2010. – Ч. 2. – 360 с.
3. Иванов-Цыганов А. И. Электропреобразовательные устройства РЭС : учеб. для вузов по спец. «Радиотехника» / А. И. Иванов-Цыганов. – Москва : Высш. шк., 2011.
4. Забродин Ю. С. Промышленная электроника / Ю. С. Забродин. – Москва : Высш. шк., 2000.
5. 3281 Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Енергетична електроніка» для студентів напряму 171 «Електроніка» усіх форм навчання. – Суми : СумДУ, 2012.
6. Конспект лекцій.

Електронне навчальне видання

Методичні вказівки
до практичних робіт
із дисципліни «**Енергетична електроніка**»
для студентів спеціальності 171 «*Електроніка*»
всіх форм навчання

Відповідальний за випуск А. С. Опанасюк
Редактори: Н. З. Ключко, С. М. Симоненко
Комп'ютерне верстання А. І. Новгородцева

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 2,79. Обл.-вид. арк. 2,56.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.