Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ЕНЕРГОСИСТЕМ

Методичні вказівки
до проведення практичних занять для здобувачів вищої освіти
першого (бакалаврського) рівня денної і заочної форм здобуття освіти за
спеціальностями 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»,
015.33 «Професійна освіта (Енергетика, електротехніка та електромеханіка)»

Електронний ресурс

Харків – 2026

УДК 621:536.7
П 27

Рецензенти:

Ю. С. Олійник – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри електротехніки та електроенергетики навчально-наукового інституту «Українська інженерно-педагогічна академія»;

О. Б. Єгоров – кандидат технічних наук, доцент кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки ХНУМГ імені О. Бекетова.

Затверджено до розміщення в мережі Інтернет рішенням Науково-методичної ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № 8 від 21 травня 2026 року)

П 27 **Перетворювальна** техніка енергосистем : методичні вказівки до проведення практичних занять для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня денної і заочної форм здобуття освіти за спеціальностями 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 015.33 «Професійна освіта (Енергетика, електротехніка та електромеханіка)» [Електронний ресурс] / уклад. П. В. Васюченко, О. М. Пономаренко. – Харків : Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2026. – (PDF 33 с.).

У методичних рекомендаціях наведені завдання до практичних завдань з дисципліни для здобувачів вищої освіти денної та заочної форм навчання, викладені методичні вказівки до виконання завдань, а також приклади розрахунків окремих частин завдання.

У додатках наведені довідкові матеріали, які необхідні для виконання практичних завдань.

УДК 621:536.7

© Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2026
© Васюченко П. В., Пономаренко О. М., уклад., 2026

ЗМІСТ

Вступ 4
Початкові умови до виконання практичних завдань 4
Зміст звіту по проведенню практичних занять 7
1. Вибір силового трансформатора 7
1.1. Розрахунок параметрів і вибір силового трансформатора 7
1.2. Перевірка вибраного силового трансформатора 9
2. Вибір елементів вентильної частини перетворювача 12
2.1. Попередній вибір тиристорів 12
2.2. Перевірка по нагріву і уточнення вибору тиристорів 15
2.3. Перевірка тиристорів на струмикороткого замикання і вибір запобіжників 16
3. Вибір згладжуючого реактора 22
Оформлення звіту про виконання практичних завдань 25
Додаток 1 26
Додаток 2 27
Додаток 3 30
Додаток 4 31
Список використаних джерел 32

ВСТУП

Мета практичних занять – закріплення і систематизація знань в області перетворювальної техніки шляхом рішення комплексної задачі проектування тиристорного перетворювача для електроприводу постійного струму. Для полегшення роботи студентів наведений приклад розрахунку, який ілюструє використання всіх методик розрахунку.

ПОЧАТКОВІ УМОВИ ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАВДАНЬ

Спроектувати однокомплектний рекуперуючий тиристорний перетворювач, що живить якір електродвигуна постійного струму, призначеного для приводу підіймального механізму за наступних умов:

а) механізм виконує підйом вантажу і його спуск; при підйомі перетворювач працює у випрямному режимі, забезпечуючи розгін двигуна і його обертання номінальною частотою; гальмування при підйомі здійснюється при замкнутому перетворювачі за рахунок маси вантажу; при спуску двигун розганяється під дією маси вантажу (якір обертається в інший бік, двигун переходить в генераторний режим, а перетворювач - в інверторний); після розгону двигуна до потрібної частоти обертання перетворювач в інверторному режимі пропускає заданий струм; гальмування здійснюється різким збільшенням струму, що інвертується;

б) режим повторно-короткочасного навантаження; для заданого варіанту вибирається відповідно до таблиці 1.1 і рисунку 1.1;

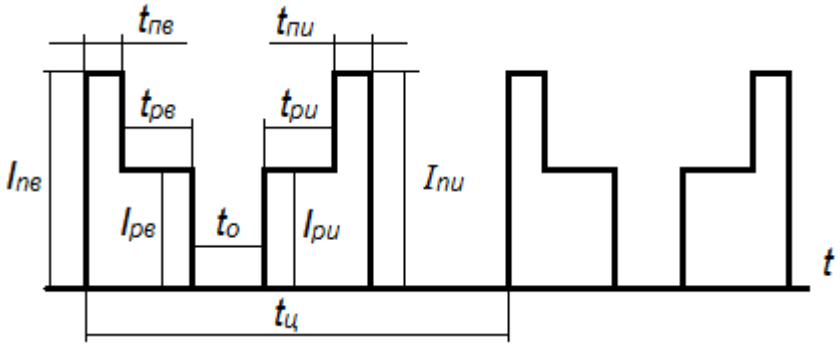


Рисунок 1.1 – Графік навантаження

$I_{пв}$, $I_{пп}$ - струми перевантаження відповідно у випрямному та інверторному режимах;

$I_{рв}$, $I_{ри}$ - струми робочого навантаження у випрямному і інверторному режимах;

$t_{пв}$, $t_{пи}$ - часи перевантажень у випрямному і інверторному режимах;

$t_{рв}$, $t_{ри}$ - часи робочих навантажень у випрямному і інверторному режимах;

$t_ц$ - час циклу, $t_о$- час паузи в навантаженні між випрямним і інверторному режимом (для спрощення розрахунків в таблиці варіантів прийнято $I_{пв} = I_{пи} = I_п$; $I_{рв} = I_{ри} = I_р$; $t_{рв} = t_{ри} = t_р$).

в) тип двигуна, його номінальна потужність $P_н$, і номінальна напруга $U_н$ приведені в таблиці 1.1, а його параметри - номінальний струм $I_н$, опір якірного ланцюга $r_я$, індуктивність якірного ланцюга $L_я$ і номінальна частота обертання n в таблиці 1.2;

г) номінальна лінійна напруга мережі $U_{сн}$ = 380 В;

д) коливання напруги мережі +/- 10%;

е) номінальна напруга на двигуні має бути забезпечена при струмі робочого навантаження $I_р$ і допустимих коливаннях напруги мережі;

ж) схема випрямлення – трифазна мостова;

з) коефіцієнт пульсації струму q при струмі навантаження $I_р$ не більше 2 %;

і) температура довкілля $T_а$ =+40 С;

к) охолодження повітряне (природне і примусове);

л) коефіцієнт передачі системи управління $K_{упр}$ =10˚/В

Таблиця 1.1

Вихідні дані

№ вар.	Тип двигуна	Рн, кВт	$U_н$, В	Графік навантаження					
				$t_ц$, С	$t_п$, С	$t_р$, С	$t_о$, С	$I_п/I_н$	$I_р/I_н$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Д41	16	220	50	2	10	5	2,0	0,8
2	Д808	37	220	50	2,5	12	6	2,0	0,9
3	Д810	55	440	45	2	10	7	1,8	1,0
4	Д812	75	220	45	2	12	5	2,0	0,8
5	Д816	150	220	40	2,5	10	6	1,8	1,0
6	Д818	185	440	45	2	11	7	2	0,7
7	Д32	12	220	50	1,5	12	5	М	0,9
8	Д806	22	220	45	1,5	10	6	2,0	0,8
9	Д41	15	440	50	2	11	7	2,0	0,9
10	Д41	16	220	40	2	9	5	2,0	0,8
11	Д806	22	220	50	2	12	6	1,9	0,9
12	Д806	32	220	40	1,5	10	7	1,8	0,9
13	Д808	37	220	50	2,5	11	5	2,0	0,8
14	Д 808	37	440	50	2	12	6	1,9	0,9
15	Д810	55	220	40	1,5	9	7	1,8	1,0
16	Д808	47	220	50	2	10	5	2,0	0,9
17	Д8Ю	55	440	45	2	9	5	1,8	0,9
18	Д810	55	220	50	2,5	10	5	2,0	0,8
19	Д812	75	220	45	2	10	7	1,9	1,0
20	Д812	70	440	45	2	12	5	1,8	0,8
21	Д814	110	220	40	2,5	10	6	2,0	0,9
22	Д814	110	440	45	2	11	7	2,0	0,8
23	Д816	150	220	50	1,5	10	6	2,0	1,0
24	Д816	150	440	45	1,5	10	5	2,0	0,8
25	А818	185	220	50	2,5	10	6	1,9	0,9
26	Д818	185	440	50	1,5	12	6	1,9	0,9
27	Д32	12	220	45	1,5	10	7	1,8	0,8
28	Д 806	12	220	50	2	10	5	1,9	1,0.
29	Д812	75	220	45	1,5	9	7	2,0	0,8

Продовження таблиці 1.1

30	Д814	110	440	40	1.5	9	5	2,0	0.8
31	Д41	16	220	50	2,5	10	6	1,8	0,8
32	Д 808	37	440	40	1.5	10	5	2,0	0,9
33	Д810	55	220	50	2	10	7	1,9	0,8
34	Д812	70	440	50	2	12	5	2,0	0,9
35	Д 816	150	220	40	1,5	10	5	2.0	0,8
36	Д818	185	440	50	2?5	10	7	2,0	0,9
37	Д32	12	220	45	2	10	6	1,9	0,8
38	Д 806	32	220	50	2	10	5	2,0	0,9
39	Д 808	37	220	40	1,5	8	5	1,9	0,8
40	Д 808	37	44.0	45	2	9	5	2,0	0,9
41	Д810	55	220	50	2	10	6	2,0	1,0
42	Д812	75	220	50	2,5	9	5	2,0	0,7
43	Д812	70	440	45	2	10	5	2,0	0,8
44	Д814	110	220	45	1,5	11	6	1,8	0,8
45	Д814	110	440	45	2	10	5	1,9	0,9
46	Д810	55	440	50	1,5	10	6	2,0	0,9
47	Д 808	47	220	40	1,5	9	5	1,8	0,9
48	Д812	75	220	50	2	11	5	1,9	0,8
49	Д816	150	440	45	2	10	6	1,9	0,8
50	Д818	185	220	50	2	11	7	2,0	0,8

Таблиця 1.2

Характеристика двигунів

Тип двигуна	Рн	Uн	Iн	$r_я$	$L_я$	n
	кВт	В	А	Ом	мГн	мин$^{-1}$
Д32	12	220	65	0,2650	13,1	740
Д41	16	220	86	0,1610	10,9	670
Д41	15	440	40	0,6720	• 45,3	695
Д806	22	220	116	0,1140	8,56	635
Д 806	32	220	165	0,0532	3,9	980
Д808	37	220	192	0,0593	3,81	565
Д808	47	220	240	0,0348	3,41	770
Д 808	37	440	96	0,2170	23,2	565
Д8Ю	55	220	280	0,0388	4,17	540
Д8Ю	55	440	140	0,1540	16,4	550
Д812	75	220	380	0,0239	3,32	500
Д812	70	440	176	0,1030	4,0	510
Д814	110	220	550	0,0147	2,39	490
Д814	110	440	274	0,0572	9,39	490
Д816	150	220	740	0,0099	1,81	470
Д816	150	440	370	0,0370	7,1	430
Д818	185	220	920	0,0076	1,56	440
Д818	185	440	460	0,0293	6,29	440

ЗМІСТ ЗВІТУ ПО ПРОВЕДЕННЮ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

1. Вибір силового трансформатора
   1.1 Розрахунок параметрів і вибір силового трансформатора
   1.2 Перевірка вибраного силового трансформатора
2. Вибір елементів вентильної частини перетворювача
   2.1 Попередній вибір тиристорів
   2.2 Перевірка по нагріву і уточнення вибору тиристорів
   2.3 Перевірка тиристорів на струми короткого замикання і вибір запобіжників
3. Вибір згладжуючого реактора

1. ВИБІР СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1.1. Розрахунок параметрів і вибір силового трансформатора

Вибір трансформатора виконується по розрахункових значеннях первинного і вторинного струмів *(I_1, I_2)*, напруги*(U_1,U_2)* і типової потужності S_m.

Трансформатор спільно з перетворювачем повинен забезпечувати номінальне значення напруги на якорі двигуна при допустимих коливаннях напруги мережі і заданому робочому струмі навантаження I_p . Тому вторинна напруга з нового трансформатора розраховується для мінімальної напруги мережі $U_{c\ min}$. Розрахункове значення фазної напруги вторинної обмотки трансформатора

$$U_2 = \frac{K_R}{K_U \cdot K_{c\min}} \cdot U_H , \qquad (1.1)$$

де K_R - коефіцієнт, що враховує падіння напруги за рахунок комутації і активних опорів трансформатора, вентилів, згладжуючого реактора; приблизно K_R = 1,05;

K_u - коефіцієнт схеми (для трифазної мікросхеми K_u =2.34);

$K_{c\ min}$ - коефіцієнт, що враховує допустиме напруга мережі до $U_{c\ min}$:

$$K_{c\ min} = U_{c\ min} / U_{сн} \qquad (1.2)$$

У каталогах на трансформатори зазвичай вказується лінійна вторинна напруга $U_{2л} = \sqrt{3}\, U_2$. Тоді розрахунковий коефіцієнт трансформації при схемі з'єднання трансформатора "зірка-зірка"

$$K_т = U_{1л}/U_{2л}. \qquad (1.3)$$

Розрахункове значення струму вторинної обмотки при струмі навантаження I_d

$$I_2 = K_I \cdot I_d, \qquad (1.4)$$

де K_I - коефіцієнт схеми, що характеризує відношення струмів I_2/I_d в ідеальному випрямлячі при $X_d = \infty$ (для трифазної мостової схеми $K_I = \sqrt{2/3}$).

При розрахунку струмів можна заздалегідь прийняти, що номінальний струм випрямляча I_d дорівнює робочому струму 1_p .

Розрахункове значення струму первинної обмотки

$$I_1 = \frac{I_2}{K_T}. \qquad (1.5)$$

Розрахункове значення типової потужності трансформатора

$$S_T = \frac{3(U_1 I_1 + U_2 I_2)}{2}. \qquad (1.6)$$

За розрахунковими даними за допомогою Додатку 1 вибирається силовий трансформатор, параметри якого задовольняють умовам:

$$U_{1л} = U_{сн}; \quad S_{тн} \geq U_2; \quad I_{2н} \geq I_2. \qquad (1.7)$$

Для подальших розрахунків мають бути відомі також наступні параметри трансформатора:

втрати холостого ходу P_{xx} при $U_{сн}$;

втрати короткого замикання $P_{кз}$ при $I_{1н}$;

напруга короткого замикання $U_к\%$;

струм холостого ходу $I_{xx}\%$;

величина і тривалість допустимих перевантажень.

<u>Приклади розрахунку</u>

Відповідно до варіанту 00 заданий двигун з параметрами, приведеними в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Тип двигуна	$P_н$, кВт	$U_н$ В	$I_н$ А	$r_я$, Ом	$L_я$, мГн	n, $хв^{-1}$
Д 816	150	220	740	0,0099	1,81	470

Заданий графік навантаження (таблиця 1.4 і рисунок 1.1).

Таблиця 1.4

№ варіанту	$t_ц$, С	$t_п$, С	$t_р$, С	$t_о$, С	$I_п/I_н$	$I_р/I_н$
00	50	2	10	6	2,0	0,8

Розрахункова вторинна напруга трансформатора (фазне і лінійне) відповідно до формули (1.1):

$$U_2 = \frac{K_R}{K_U \cdot K_{c\min}} \cdot U_H = \frac{1.05 \cdot 220}{2.34 \cdot 0.9} = 109 \ B;$$

$$U_{2л} = \sqrt{3}\, U_2 = \sqrt{3} \cdot 109 = 188.6 \ B.$$

Робочий струм навантаження:

$$1_p = 740 \cdot 0{,}8 = 592 \ A.$$

Розрахунковий вторинний струм трансформатора при струмі навантаження I_p відповідно до формули (1.4):

$$I_2 = \sqrt{2/3} \cdot 592 = 483 \ A.$$

Розрахунковий коефіцієнт трансформації:

$$K_т = U_{сн}/U_{2л} = 380/188{,}6 = 2{,}02.$$

Розрахунковий первинний струм трансформатора:

$$I_1 = I_2/K_m = 483/2{,}02 = 239\ A.$$

Розрахункова типова потужність трансформатора згідно (1.6):

$$S_T = \frac{3(U_1 I_1 + U_2 I_2)}{2} = \frac{3(220 \cdot 239 + 109 \cdot 483)}{2} = 158\ кВА$$

Вибираємо по Додатку 1 трансформатор *ТСЗПМ-200/0,7* з параметрами, приведеними в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

$S_{тн}$, кВА	$U_{1лн}$, В	$U_{2лн}$, В	$I_{2лн}$, А	$u_к$, %	$I_{хх}$, %	$P_{хх}$, Вт	$P_{кз}$, Вт
182,5	380	205	514	5,5	1,5	800	3100

Допустимі перевантаження відповідно до примітки 1 в Додатку 1.

Із зіставлення таблиці 1.5 і попереднього розрахунку видно, що

$$U_{1л} = U_{сн}; \quad S_{тн} \geq U_2; \quad I_{2н} \geq I_2.$$

Таким чином, заздалегідь можна зробити висновок, що трансформатор вибраний правильно. Проте необхідно ще виконати додаткову перевірку.

1.2. Перевірка вибраного силового трансформатора

При перевірці трансформатора необхідно з'ясувати, чи забезпечує він потрібну напругу на виході випрямляча, чи витримує задані перевантаження і чи задовольняє умовам допустимості нагріву.

Знаючи втрати і напругу короткого замикання трансформатору, можна знайти активний, повний і індуктивний опір фази трансформатора, приведені до вторинної сторони. Активний, повнийі індуктивний опори фази трансформатора, приведені до вторинної сторони:

$$r_a = \frac{P_{кз}}{3I_{2y}^2}; \tag{1.8}$$

$$Z_a = \frac{U_K\% \cdot U_{2H}}{100 \cdot I_{2H}}; \tag{1.9}$$

$$X_a = \sqrt{Z_a^2 - r_a^2}. \tag{1.10}$$

Випрямлена напруга на вводі двигуна при куті управління (α = 0 з врахуванням максимального пониження напругимережі, падіння напруги на трансформаторі, вентилях і згладжуючому реакторі (для трифазної мостової схеми)

$$U = 2.34K_{c\min} \cdot U_{2H} - 2U_{T(TO)} - (\frac{3}{\pi} X_a + 2r_a + r_1 + 2r_T)I_d. \tag{1.11}$$

Тут $U_{(TC)}$, r_T - порогова напруга і динамічний опір у відкритому стані тиристора;

r_l - згладжуючий активний опір реактора.

При розрахунку замість I_d слід поставити значення I_p. Оскільки при первинному розрахунку трансформатора ще не вибрані тиристори і згладжуючий реактор, доцільно скористатися спрощеною формулою:

$$U = 2.34K_{c\min} \cdot U_{2H} - 2U_{TM} - (\frac{3}{\pi} X_a + 2r_a)I_p, \qquad (1.12)$$

де U_{TM} - імпульсна напруга у відкритому стані тиристора (можна заздалегідь прийняти $U_{TM} = 2$ *В*).

Формула (1.12) не враховує падіння напруги на активному опорі згладжуючого реактора, тому розрахована напруга має бути вище $\boldsymbol{U_н}$ на 3...15 В, причому необхідний запас зростає із зменшенням потужності і зростанням номінальної напруги.

Якщо розрахована напругавиявиться недостатньою, то потрібно вибрати трансформатор більш великої потужності (або з більшою напругою) і повторити перевірку.

Після цього необхідно також перевірити, чи витримує трансформатор передбачені перевантаження. Допустимі перевантаження для трансформаторів вказані в Додатку 1. Вторинний струм трансформатора при перевантаженні відповідно до формули (1.11).

Трансформатор вважається задовольняючим вимогам по нагріву, якщо він витримує вказані вище перевантаження, а середньоквадратичне значення струму при циклічних навантаженнях (з часом циклу меншим часу усереднювання, заданого для даного типа трансформатора) не перевищує номінальний струм. Середньоквадратичне значення вторинного струму трансформатора $I_{2скв}$, визначається по значенням вторинного струму під час робочого навантаження і перевантаженнях у випрямному та інверторному режимах $I_{2рв}$, $I_{2рн}$, $I_{2ив}$, $I_{2пи}$.

$$I_{2СКВ} = \sqrt{\frac{1}{t_ц}(I_{2ПВ}^2 t_{ПВ} + I_{2РВ}^2 t_{РВ} + I_{2ПИ}^2 t_{ПИ} + I_{2РН}^2 t_{РН})}. \qquad (1.13)$$

Якщо вказані перевірки трансформатора підтверджують його придатність, то вибір трансформатора можна вважати закінченим.

Якщо при перевірці виявляються великі запаси, то доцільно перевірити можливість використання трансформатора меншої потужності.

<u>Прикладрозрахунку</u>

Номінальна вторинна фазна напруга:

$$U_{2H} = \frac{U_{2ЛН}}{\sqrt{3}} = \frac{205}{\sqrt{3}} = 118.4 \ B.$$

Активний, повний і індуктивний опори фази трансформатора, приведені до вторинної сторони, відповідно до формул (1.8...1.10):

$$r_a = \frac{P_{кз}}{3I_{2y}^2} = \frac{3100}{3 \cdot 514^2} = 0.0039 \ Ом;$$

$$Z_a = \frac{U_{K}\,\%_0 \cdot U_{2H}}{100 \cdot I_{2H}} = \frac{5.5 \cdot 118.4}{100 \cdot 514} = 0.0127 \ Ом;$$

$$X_a = \sqrt{Z_a^2 - r_a^2} = \sqrt{0.0127^2 - 0.0039^2} = 0.0121 \ Ом.$$

Напруга на двигуні (без врахування падіння напруги на згладжуючому реакторі) при струмі I_p і напрузі в мережі $U_{c\,min}$, визначена по формулі (1.12):

$$U = 2.34 K_{c\min} \cdot U_{2H} - (\frac{3}{\pi} X_a + 2r_a) I_p - 2U_{TM} = 2.34 \cdot 0.9 \cdot 118.4 - (\frac{3}{\pi} 0.0121 + 2 \cdot 0.0039) \cdot 592 -$$

$$- 2 \cdot 2 = 233.9 \ В;$$

$$U > U_{н} \text{ на } 13.9 \ В,$$

отже, вибраний трансформатор забезпечує необхідну напругу на двигуні.

Струм, споживаний двигуном при перевантаженні:

$$I_п = I_н \cdot (I_п / I_н) = 740 \cdot 2{,}0 = 1480 \ А.$$

Вторинний струм трансформатора при заданому перевантаженні протягом *2 с*:

$$I_{2П} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot I_{П}} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot 1480} = 1209 \ А.$$

Допустимий вторинний струм трансформатора протягом *10 с* при перевантаженні 150 % :

$$I_{2п\ доп} = 2.5 \cdot I_{2H} = 2.5 \cdot 517 = 1285 \ А.$$

Трансформатор витримає, оскільки струм перевантаження (*1209 А*) час його дії (*2 с*) нижче допустимих значень (*1209 А <1285 А*); (*2 с < 10 с*).

Середньоквадратичний струм, споживаний від трансформатора, з врахуванням формули (2.6):

$$I_{2СКВ} = \sqrt{\frac{1}{t_ц}(I_{2ПВ}^2 t_{ПВ} + I_{2РВ}^2 t_{РВ} + I_{2ПИ}^2 t_{ПИ} + I_{2РН}^2 t_{РН})} = \sqrt{\frac{1}{50}(1209^2 \cdot 2 + 483^2 \cdot 10 + 1209^2 \cdot 2)} = 459 \ А$$

Середньоквадратичний струм $I_{2\,скв}$ менше номінального $I_{2н}$ (*459 А < 514 А*). Таким чином, трансформатор задовольняє всім вимогам. Перехід на трансформатор меншої потужності неможливий, оскільки струм перевантаження близький до граничного значення.

2. ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ВЕНТИЛЬНОЇ ЧАСТИНИПЕРЕТВОРЮВАЧА

2.1. Попередній вибір тиристорів

Максимальна величина зворотної напруги, що прикладається до тиристора, $U_{a\ max}$ визначається при максимальній напрузі мережі $U_{c\ max}$. Для трифазної мостової схеми

$$U_{A\max} = K_{C\max} \cdot \sqrt{6} \cdot U_{2H} \quad (2.1)$$

Імпульсна робоча напруга тиристора в закритому стані U_{DWM} і імпульсна робоча зворотна напруга U_{RWM} має бути більше $U_{a\ max}$ (умова 1). Значень U_{DWM} і U_{RWM} пов'язані з тими, що повторюються імпульсною напругою в закритому стані - U_{DRM} і імпульсною зворотною напругою U_{RRM}, що повторюється, співвідношеннями:

$$U_{DWM}=0.8U_{DRM} \cdot U_{RWM} = 0.8U_{RRM} \quad (2.2)$$

Перенапруження, що виникають при комутації вентилів, можуть перевершувати імпульсну робочу напругу в закритому стані і імпульсну робочу зворотну напругу, але вони мають бути менше імпульсної напруги, що повторюється, в закритому стані і імпульсної зворотної напруги, що повторюється. Для обмеження цих перенапружень тиристори шунтують *RC* - ланцюгами.

При згоранні запобіжників, що захищають тиристори, на них виникають перенапруження, які прикладаються до тиристорів. Максимальна напруга на тиристорі $U_{a\ пер}$ при цьому досягає $(1{,}5. ..2)U_{a\ max}$.

Імпульсна напруга, що не повторюється, в закритому стані U_{DSM} і імпульсна зворотна напруга U_{RSM}, що не повторюється, повинні з коефіцієнтом запасу $K_s=(1{,}2..1{,}4)$ перевищувати напругу $U_{a\ пер}$ (умова 2)

$$U_{DSM} = U_{RSM} =(1.5... 2)\cdot K_S \cdot U_{a\ max} \quad (2.3)$$

Значення імпульсної напруги U_{DSM} і U_{RSM}, що не повторюється, пов'язані із значеннями імпульсної напруги U_{DRM} і U_{DRM}, що повторюється, коефіцієнтами, визначуваними заводами виготівниками :

$$U_{DSM}=K_{НЕЛ}\, U_{DRM};\ U_{RSM} = K_{НЕЛ}\, U_{RRM} \quad (2.4)$$

При виконанні контрольної роботи можна прийняти $K_{НЕЛ} = 1{,}12$ для нелавинних приладів і $K_{НЕЛ}=1{,}2$ для лавинних. Перенапруження виникають в перетворювачах тиристорів і при відключенні трансформаторів на холостому ходу. Для захисту від них на вході моста тиристора з боку змінної напруги включається додаткові *RC* - ланцюг або вентильно-конденсаторні схеми.

Тип тиристорів визначається по струму. Оскільки допустимі перевантаження тиристорів вельми короткочасні, то в повторно-короткочасних режимах тиристори зазвичай вибираються по максимальному струму перевантаження. Якщо режим роботи тривалий, а перевантаження дуже рідкі і короткочасні, то можливий вибір тиристорів по тривалому струму. Остаточно тип тиристора приймається після його перевірки на нагрів.

Максимально допустимий середній струм характеризує здатність навантаження тиристорів. Залежно від умов роботи розрізняють:

а) граничний струм I_{TAVm} (максимально допустимий середній струм при заданій температурі корпусу T_c) - середнє за період значення прямого струму, що протікає через тиристор, що працює в однофазній однонапівперіодній схемі випрямлення з активним навантаженням при частоті 50 Гц, синусоїдальній формі струму з кутом провідності 180°, коли при сталому тепловому стані температура корпусу T_c дорівнює заданому значенню, а температура переходу T_j рівна максимально допустимій T_{jm}, цей струм визначає тип тиристора;

6) максимально допустимий середній струм за заданих умов роботи. Максимально допустимий середній струм за заданих умов роботи I_{TAV} пов'язаний з граничним струмом K_V рядом коефіцієнтів, що враховують ці умови:

$$I_{TAV\,м} = K_\lambda K_f K_T K_V I_{TAVm}, \qquad (2.5)$$

де K_λ - коефіцієнт, що враховує відмінність кута провідності від 180 эл. град, і відмінність форми струму від синусоїдальної; при прямокутній і трапецеїдальній формі струму з кутом провідності, близьким 120 эл. град., можна прийняти $K_\lambda = 0,8$;

K_f - коефіцієнт, що враховує вплив частоти; при частоті 50 Гц $K_f = 1$;

K_T - коэффициент, що враховує температуру довкілля T_a ; при T_a =40° можна прийняти $K_T=1$;

K_V - коефіцієнт, що враховує швидкість повітря, що охолоджує; при номінальній швидкості $K_V = 1$, при природному охолодженні без обдування K_V знижується до $0,25...0,4$.

Знаючи необхідний струм тиристора в режимі перевантаження, можна використовуючи вказані коефіцієнти, знайти граничний струм $I_{TAVм}$ і заздалегідь вибрати тип тиристора.

Якщо тиристори на задані параметри відсутні, то доводиться йти на послідовне і паралельне з'єднання тиристорів. Для поліпшення розподілення напруги по послідовно включених тиристорах застосовують шунтуючі елементи: опори і *RC*- ланцюги. Нерівномірність ділення напруги характеризується коефіцієнтом $K_н$. Для поліпшення розподілу струмів по паралельно включених тиристорах встановлюють дільники струму, реактори або застосовують підбір тиристорів.

Нерівномірність ділення струмів характеризується коефіцієнтом $K_в$. При гарних дільниках $K_в = 1,05...1,1$.

При паралельному з'єднанні $n_в$ вентилів струм через вентиль

$$I'_a = K_в \frac{I_a}{n_в} \qquad (2.6)$$

Засобидля розподілу напругиі струмівв рамках практичних занять не вибираються і не розраховуються.

<u>Приклад розрахунку</u>

Максимальна зворотня напруга відповідно до (2.1):

$$U_{A\max} = K_{C\max} \cdot \sqrt{6} \cdot U_{2H} = 1.1 \cdot \sqrt{6} \cdot 118.4 = 319 \ B.$$

Імпульсна робоча напруга тиристора в закритому стані і імпульсна робоча зворотна напруга має бути більше $U_{a\ max}$ *:*

$$U_{DWM}=U_{RWM} > 319\ B.$$

Тоді імпульсна напруга, що повторюється, в закритому стані і імпульсна зворотна напруга, що повторюється, відповідно до формули (2.2):

$$U_{DRM} = U_{RRM} = 319/0,8 = 399\ B \approx 400\ B.$$

Таким чином, по умові 1 можна вибрати тиристори четвертого класу.

Імпульсна напругав закритому стані, що не повторюється, і імпульсна зворотна напруга, що не повторюється, відповідно до формули (2.3) для умови 2:

$$U_{DSM} = U_{RSM} = (1.5...2)\cdot K_S \cdot U_{a\ max} = 2\cdot 1,3\cdot 319 = 829\ B.$$

Тоді по формулі (2.4) імпульсна напруга, що повторюється, для нелавинних приладів.

$$U_{DRM} = U_{RRM} = 829/1,12 = 740\ B.$$

Округливши значення у більшу сторону, з врахуванням умов 1 і 2 по Додатку 2 остаточно приймаємо тиристори восьмого класу.

Середній струм вентиля при перевантаженні

$$I_{an} = \frac{I_n}{3} = \frac{1480}{3} = 493\ A.$$

Необхідний граничний струм з врахуванням формули (2.5)

$$I_{TAVi} = \frac{I_{an}}{K_\lambda K_f K_T K_V} = \frac{493}{0.8\cdot 1\cdot 1\cdot 1} = 617\ A.$$

$$I_{TAV\,м} = K_\lambda K_f K_T K_V I_{TAVm}.$$

Заздалегідь по Додатку2 вибираємо тиристор *T143-630-8* зохолодження типу *0243-150*, що має параметри, приведені в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

Параметри тиристорів

Найменування параметра і позначення	Одиниця виміру	Значення
Граничний струм	*A*	630
$I_{TAV\,м}$ (температура корпусу *Tc= 85°C*, кут провідності *λ= 180°, f= 50 Гц*)		
Ударний струм, що не повторюється, у відкритому стані I_{TSM} при максимально допустимій температурі переходу I_{jm}	*кА*	12
Максимально допустима температура переходу T_{jm}	*°C*	125
Порогова напруга $U_{T(TO)}$	*В*	1,0
Диференціальний опір у відкритому стані r_m	*мОм*	0,43

2.2. Перевірка по нагріву і уточнення вибору тиристорів

Допустиме навантаження тиристорів по струму обумовлюється як електричним режимом його роботи, так і умовами охолодження. При різних схемах випрямлення, кутах регулювання і видах навантаження тривалість і форма струму, що протікає через тиристор, різна. Перетворювачі можуть працювати в тривалому, короткочасному і повторно-короткочасному режимах. Тому при однакових середніх значеннях струму втрати у вентилях будуть відмінні, що визначає різний нагрів напівпровідникової структури за однакових умов відведення тепла. Відведення тепла визначається тепловими параметрами тиристорів і їх охолоджувачів, а також температурою довкілля. Таким чином, після попереднього вибору типа тиристора необхідна його перевірка на нагрів.

<u>Приклад розрахунку</u>

Анодні струми вентилів при перевантаженні і в робочому режимі:

$$I_{an} = \frac{I_n}{3} = \frac{1480}{3} = 493\ A; \qquad (2.7)$$

$$I_{ap} = \frac{I_p}{3} = \frac{592}{3} = 197\ A.$$

Втрати в тиристорах при перевантаженні і в робочому режимі:

$$P_{TП} = U_{T(TO)} \cdot I_{an} + K_\phi^2 \cdot r_T \cdot I_{an}^2 = 1{,}0 \cdot 493 + (\sqrt{3})^2 \cdot 0{,}43 \cdot 10^{-3} \cdot 493^2 = 806\ Bm; \qquad (2.8)$$

$$P_{TP} = U_{T(TO)} \cdot I_{ap} + K_\phi^2 \cdot r_T \cdot I_{ap}^2 = 1{,}0 \cdot 197 + (\sqrt{3})^2 \cdot 0{,}43 \cdot 10^{-3} \cdot 197^2 = 247\ Bm.$$

де $U_{T(TO)}$ – порогова напруга;

I_{an}, I_{ap} – анодні струми;

r_T – динамічний опір тиристора у відкритому стані;

K_ϕ – коефіцієнт форми анодного струму, $K_\phi = \sqrt{3}$

Тривалість еквівалентного прямокутного імпульсу по формулі:

$$t_э = \frac{P_{TП} t_n + P_{TP} t_p + P_{TP} t_p + P_{TП} t_n}{P_{TП}} = \frac{806 \cdot 2 + 247 \cdot 10 + 247 \cdot 10 + 806 \cdot 2}{806} = 10\ c \qquad (2.9)$$

Максимальна температура переходу при швидкості охолоджуючого повітря 6 м/с, визначається по формулі

$$T_j = T_a + P_{TП}\left[\frac{t_э}{t_ц} R_{thja} + (1 - \frac{t_э}{t_ц}) Z_{(t_ц - t_э)} - Z_t + Z_{t_э}\right] =$$

$$= 40 + 806\left[\frac{10}{50} \cdot 0.125 + (1 - \frac{10}{50}) \cdot 0.08 - 0.075 + 0.06\right] = 99.6\ ^oC \qquad (2.10)$$

Оскільки отримана температура переходу далека від максимально допустимою (T_{jm}=*125°C*), то перевіримо можливість роботи тиристора при меншій швидкості охолоджуючого повітря (3 м/с). За розрахунком T_j = *107°C* отже, тиристор може працювати при меншій швидкості охолоджуючого повітря. При природному охолодженні, як показав розрахунок, тиристор

нагрівається до недопустимої температури T_j =139 °C . Результати розрахунків приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Результати розрахунку

Tj, °C		
V=0	*V=3м/с*	*V=6м/с*
139	*107*	*99,6*

2.3. Перевірка тиристорів на струмикороткого замикання і вибір запобіжників

Аварійні режими в перетворювачах, що характеризуються протіканням великих струмів, діляться на зовнішні аварії, викликані короткими замиканнями (КЗ) в навантаженні, внутрішні аварії, обумовлені пошкодженнями окремих вентилів, і опрокидування інвертора, що відбуваються із-за неправильного вибору кута, або порушення нормальної роботи системи управління.

Для захисту перетворювачів від аварійних режимів застосовують захисну апаратуру - швидкодіючі автоматичні вимикачі і швидкодіючі плавкі запобіжники.

Для захисту від зовнішніх КЗ і опрокидування інвертора найчастіше застосовують автоматичні вимикачі, що встановлюються на стороні змінного і постійного струму. В рамках практичних занять вибір автоматичних вимикачів не виконується, але на принциповій схемі їх слід показати. Для захисту від внутрішніх КЗ, викликаних пошкодженнями вентилів, послідовно з вентилями встановлюють плавкі запобіжники. У малопотужних установках плавкі запобіжники можуть встановлюватися також для захисту від зовнішніх КЗ замість автоматичних вимикачів.

Найбільші аварійні струми виникають при внутрішніх КЗ, тому в практичних завданнях обмежимося вибором запобіжників, що захищають тиристори від внутрішніх КЗ.

При розрахунку аварійних струмів зазвичай використовують відносні одиниці, приймаючи за базу I_m амплітуду сталого трифазного струму короткого замикання:

$$I_m = \frac{K_{C\max} U_{rm}}{Z_a}, \qquad (2.11)$$

де $K_{c\ max}$ враховує можливе підвищення напруги в мережі.

При внутрішньому короткому замиканні із-за наявності аперіодичної складової амплітуда струму короткого замикання (СКЗ) в перший напівперіод може істотно перевищити значення I_m. Амплітуда СКЗ

$$I_{уд=} I^*_{уд} \cdot I_m \qquad (2.12)$$

Теплова дія на вентилі перетворювача характеризується інтегралом граничного навантаження. Аварійний режим має бути ліквідований за одну півхвилю напруги мережі (0,01с).

Інтеграл граничного навантаження

$$W=I_м^2 \cdot W^* \qquad (2.13)$$

У довідкових даних на тиристори (Додаток 2) наводяться значення ударного струму, що не повторюється, у відкритому стані I_{TSM}, а по ним може бути визначений захисний показник $W_T = \int I^2 dt$ - значення інтеграла від квадрата ударного прямого струму синусоїдальної форми за час напівперіоду напруги мережі:

$$W_T = \int_0^{0.01} I_{TSM}^2 \sin^2 \omega t dt = 0.005 I_{TSM}^2. \qquad (2.14)$$

Ці величини характеризують перевантажувальну здатність тиристора при аварійних струмах. Для надійної роботи тиристорів необхідно, аби значення ударного струму I_{TSM} і захисного показника W_T не перевищувалися ні в яких режимах.

Зазвичай значення ударного струму, що не повторюється, і захисного показника тиристорів істотно менше, ніж амплітуда СКЗ $I_{уд}$ і інтеграл граничного навантаження W. Отже, вже при тривалості аварійного струму 0,01с тиристори вийдуть з ладу. Тому швидкодіючі плавкі запобіжники повинні протягом одного напівперіоду обмежити амплітуду ударного струму і його теплову дію, що характеризується величиною $\int i_{уд}^2 dt$.

Для забезпечення селективності відключення пошкоджень характеристики автоматичних вимикачів і запобіжників в різних ланцюгах мають бути погоджені між собою. Наприклад, при внутрішніх пошкодженнях повинні спрацьовувати лише запобіжники (*FU4 - FU21)* і не спрацьовувати (*FU1 - FU3* і *FU22, FU23)*, а при зовнішніх не повинні спрацьовувати запобіжники (*FU4 - FU21)* (рисунок 2.1).

При існуючих запобіжниках при внутрішніх коротких замиканнях можливе селективне відключення пошкодженого вентиля лишепри числі паралельних вентилів, більшому два. При цьому запобіжник в ланцюзі"здорового" вентиля не повинен початиплавитися. Абизапобіжники не згоріли при зовнішніх коротких замиканнях, на стороні постійного струму ставиться швидкодіючий автоматичний вимикач і реактор, що обмежує швидкість наростання струму. Інколи ставиться лише автоматичний вимикач на стороні змінного струму.

Вибір запобіжників по напрузі виконується відповідно до лінійної напругина вторинній стороні трансформатора по додатку 3.

Вибір номінального струмуплавкої вставки виконується відповідно до значення діючого струму через тиристор при робочому навантаженні

$$I_{адр} = \sqrt{3}\ I_{ар}. \qquad (2.15)$$

Плавка вставка вибирається з умови, що номінальний струм плавкої вставки

$$I_{пл.н} > I_{адр}. \qquad (2.16)$$

Якщо не удається виконати умову (2.16), то слід перейти на паралельне з'єднаннятиристорів і подальшірозрахунки вести для випадку паралельної роботи тиристорів. Післязавершення розрахунків доцільно було б знов перевірити тепловий режим тиристорів, перейшовши, наприклад, на природне охолодження або застосувати тиристор на менший граничний струм.

При паралельній роботі тиристорів з врахуванням нерівномірного розподілу струмів, що враховується коефіцієнтом $K_в$, значення діючого струму через тиристор при робочому навантаженні

$$I'_{адр} = \frac{K_B I_{адр}}{n_B}. \qquad (2.17)$$

Вибір номінального струмуплавкої вставки виконується з врахуванням нерівності (2.16). Післявибору номінального струмуплавкої вставки необхідно перевірити по часострумовим характеристикам (Додаток 3), чи витримає вона перевантаження. Значення діючого струму перевантаження, що протікає через тиристор при одиночному включенні

$$I_{адр} = \sqrt{3}\ I_{ар} \qquad (2.18)$$

і при паралельній роботі

$$I'_{адр} = \frac{K_B I_{адр}}{n_B}. \qquad (2.19)$$

Якщо запобіжник не витримує перевантаження, то плавка вставка вибирається з умови забезпечення режиму перевантаження.

Параметром запобіжника, що характеризує його до утворення дуги, є інтеграл плавлення $W_{пл}$, який визначається кількістю енергії, необхідної для плавкої вставки за час $t_{пл}$ менше *10 мс*. Значення $W_{пл}$ характеризує властивість самої плавкої вставки і не залежить від параметрів аварійного ланцюга.

Після розплавлення запобіжника виникає дуга, через яку продовжує проходити струм, що нагріває неушкоджені вентилі. Теплова дія за час горіння дуги характеризується інтегралом дуги $W_д$, залежним від параметрів аварійного контуру. Загальна теплова дія за час проходження аварійного струму по ланцюгу із запобіжником і вентилем, що захищається, характеризується повним інтегралом відключення $W_{пр}$ і дорівнює сумі інтегралів плавлення і дуги. У інформаційних матеріалах наводяться залежності $W_{пр}$ від значення першої півхвилі діючого СКЗ в аварійному контурі $I_{уд.д}$ (Додаток 3):

$$I_{уд.д} = I_{уд.д} / \sqrt{2}\ . \qquad (2.20)$$

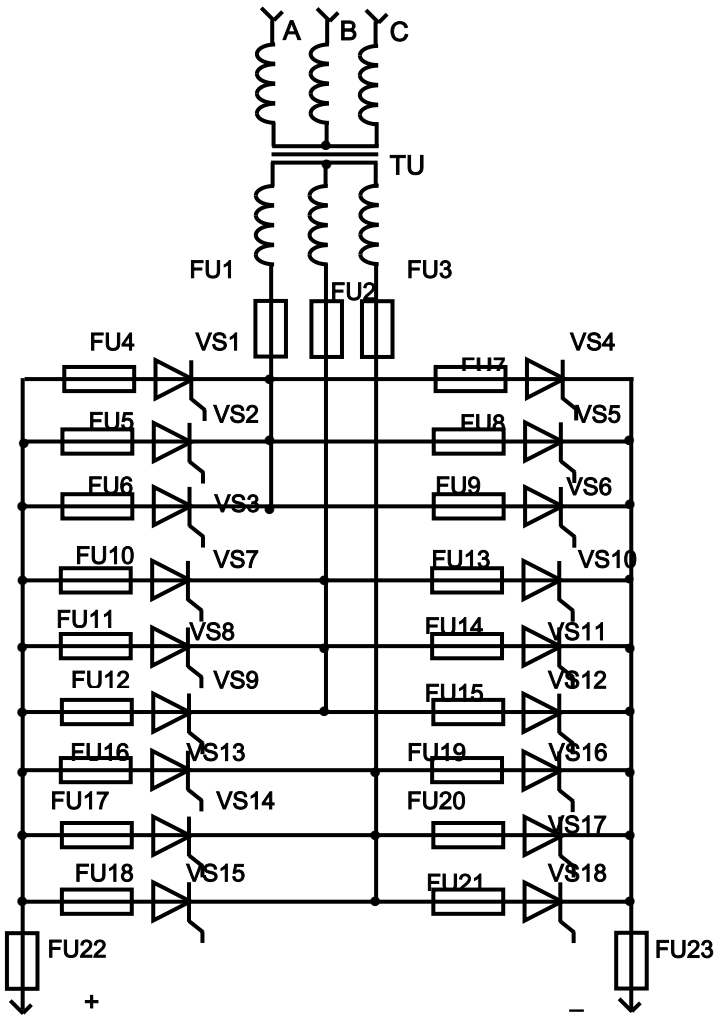


Рисунок 2.1 - Схема трифазного мостового перетворювача із запобіжниками для захисту від внутрішніх (FU2) і зовнішніх КЗ (FU1; FU3)

Швидкодіючі запобіжники мають певний розкид значень $W_{пл}$, $W_{д}$, $W_{пр}$. Тому при розрахунках використовують верхні або нижні значення з допустимої області розкиду залежно від вирішуваного завдання.

Важливим параметром запобіжника є його струмообмежувальна характеристика. Вона визначає залежність граничного струму $I_{пр}$, обмеженого запобіжником, від значення першої півхвилі діючого СКЗ (Додаток 3). Знаючи значення $I_{уд.д}$, по цій характеристиці можна визначити максимальну амплітуду струму $I_{пр}$.

Для забезпечення захисту ”здорових” тиристорів при внутрішньому короткому замиканні необхідне виконання двох умов:

а) максимальна амплітуда аварійного струму через ”здоровий” тиристор, яка обмежується запобіжником, не повинна перевищувати допустимий ударний струм I_{TSM}:

$$I_{TSM} > I_{пр}; \qquad (2.21)$$

б) максимально можливий обмежений запобіжником інтеграл струму через будь-який неушкоджений тиристор має бути менше його захисного показника:

$$W_T > W_{np}. \qquad (2.22)$$

При перевірці виконання умов (2.21) і (2.22) необхідно враховувати кількість паралельно включених вентилів *nâ* і коефіцієнт нерівномірності розподілу струмів по вентилях *Кв.* При цьому повинні виконуватися умови:

$$I_{TSM} > \frac{K_B I_{np}}{n_B}; \qquad (2.23)$$

$$W_T > \frac{K_B^2 W_{np}}{n_B^2}. \qquad (2.24)$$

При виконанні нерівностей (2.21)...(2.24) необхідно мати запас не менше 1,2.

Прикладрозрахунку

Розраховуємо амплітуду базового струму згідно формулі (2.11)

$$I_m = \frac{K_{C\max} U_{rm}}{Z_a} = \frac{1.1 \cdot 118{,}4 \cdot \sqrt{2}}{0{,}0127} = 14480 \text{ А}.$$

Визначуваний ударний ТКЗ і інтеграл граничного навантаження. Параметр трансформатора

$$rà \ / xa = 0{,}0039 / 0{,}0121 = 0{,}322.$$

*I*уд* = 1,2; *W** = 7,410-3·, в абсолютних одиницях ударний струм і інтеграл граничного навантаження будуть дорівнювати:

$$Iуд = 1{,}214480 = 17376 \cdot \text{А};$$

$$W = 7{,}410\text{-}3144802 \cdot \cdot = 1{,}55 \cdot 10^6 \text{ А2с}.$$

Знаходимо ударний струм тиристора, що повторюється, у відкритому стані (відповідно до таблиці. 2.2) *Itsm=12103* ·А.

Визначуваний захисний показник

$$WT = 0{,}005 \bullet \text{I2tsm} = 0{,}005122106 \cdot = 0{,}72106 \cdot \text{А2 с}.$$

З порівняння видно, що тиристори не витримують ударний струм: *Itsm < Iуд; WT < W.* Необхідна установка запобіжників.

Проведемо попередній вибір запобіжника. Номінальна лінійна напруга на вторинній стороні трансформатора *U2лн* = 205 Ст.

З даних, приведених в Додатку 3, видно, що можна вибрати запобіжники типа ПН-57 на напругу 220 В. Діюче значення струму через тиристор при струмі *Iš*

$$Iадр = \sqrt{3}\ Iар = \sqrt{3} \bullet 197 = 341 \text{ А}.$$

Найбільший номінальний струмплавких вставок на номінальну напругу220В - 250А, тому потрібно застосувати паралельне з'єднання двох тиристорів. При цьому

$$I'_{адр} = \frac{K_B I_{адр}}{n_B} = \frac{1{,}1 \cdot 341}{2} = 188 \text{ А}.$$

Вибираємо запобіжник типу ПП-57-3427 на номінальну напругу змінного струму 220В, номінальний струм 250А з плавкою вставкою на номінальний струм 250 А.

Перевіряємо плавку вставку на перевантаження. При перевантаженні значення струму, що діє, через тиристор при паралельному з'єднанні

$$I'_{адр} = \frac{K_B \sqrt{3} I_{адр}}{n_B} = \frac{1{,}1 \cdot \sqrt{3} \cdot 493}{2} = 469 \text{ А}.$$

По часострумових характеристиках (Додаток 3) плавка вставка витримує це перевантаження протягом 10 хв., що значно більше заданого часу (2 с). Можна переконатися, що плавка вставка на найближчий менший номінальний струм (160 А) витримає перевантаження лише протягом 0,5 с. Таким чином, вибрана плавка вставка забезпечує роботу перетворювача при заданих навантаженнях.

Перевіряємо умови захисту тиристора. Що діє значення першої півхвилі ТКЗ при внутрішньому КЗ рівно

$$Iуд.д = Iуд.д / \sqrt{2} = 17376 / \sqrt{2} = 12306 \text{ А}.$$

Потім по характеристиках для інтеграла відключення і струму, обмеженого запобіжником (Додаток 3), знайдемо $Iñ = Iуд.д$ і $Wпр = 2{,}8105 \cdot 10^5$ А2с, $Iцš = 10$ кА.

Тоді

$$\frac{K_B I_{пр}}{n_B} = \frac{1{,}1 \cdot 10 \cdot 10^3}{2} = 5{,}5 \cdot 10^3 \text{ А} < 12103 \cdot \text{А};$$

$$\frac{K_B^2 W_{пр}}{n_B^2} = \frac{1{,}1^2 \cdot 2{,}8 \cdot 10^5}{2^2} = 0{,}847 \cdot 10^5 \text{ А2с} < 2{,}8105 \cdot \text{А2 с}.$$

Умови захисту виконуються з великим запасом, отже, при виході з ладу одних з тиристорів запобіжник забезпечує захист останніх.

Тепер можна вважати, що тиристори і запобіжники вибрані остаточно.

3 ВИБІР ЗГЛАДЖУЮЧОГО РЕАКТОРА

Згладжуючий ректор виконує три функції: згладжує пульсації випрямленого струму, зменшує зону переривистих струміві обмежує швидкість наростання аварійного струму через тиристори при короткому замиканні на стороні випрямленого струму. Розрахувавши необхідну індуктивність для виконання кожній з цих функцій, слід прийняти максимальну. Оскільки вимоги до зони переривистих струмів і до обмеження ТКЗ в завданні не сформульовані, то розрахуємо лише індуктивність, потрібну для згладжування. Надалі при розрахунку зовнішніх характеристик визначимо зону переривистих струмів.

При розрахунку індуктивності згладжуючого реактора виходять з допустимого рівня пульсацій випрямленого струму при робочому навантаженні і номінальній напрузі на двигуні. У курсовій роботі коефіцієнт пульсації визначений завданням.

Перша гармоніка пульсацій має максимальну величину і найгірше фільтрується, тому останні гармоніки не розглядаються. Амплітуда першої гармоніки пульсацій при заданій номінальній напрузі на двигуні *Uh* визначається кутом управлінняα, який можна визначити, перетворивши рівняння зовнішньої характеристики:

$$Cos\alpha = \frac{U_H + (\frac{3}{\pi} X_a + 2r_a + r_1 + 2r_T) I_d + 2U_{T(TO)}}{U_{do}}. \qquad (3.1)$$

У формулі не враховано падіння напругина активному опорі реактора, оскільки воно ще не відоме. Похибка, що припускається, мала, і нею можна нехтувати.

У трифазній мостовій схемі амплітудне значення першої гармоніки випрямленої напруги *Udm(1)* пов'язане з його середнім значенням *Ud0* і кутом α співвідношенням

$$U_{dm(1)} = \frac{2\cos\alpha}{m^2 - 1} \sqrt{1 + m^2 tg^2 \alpha U_{do}}. \qquad (3.2)$$

У формулах (6.1) і (6.2) правильніше підставляти максимальне значення $Ud0_{max}$ при максимальній напрузі в мережі:

$$Ud0_{max=2,34} Kc_{max} U2н. \qquad (3.3)$$

Необхідна індуктивність ланцюга випрямленого струму *Ld* може бути визначена по напрузі *Udm(1)* заданому коефіцієнту пульсації *q:*

$$L_d = \frac{U_{dm(1)}}{m\omega q I_p}. \qquad (3.4)$$

Якщо розрахована індуктивність менше індуктивності якоря *Ля*, то установка реактора не потрібна. Якщо більше, то потрібний додатковий реактор з індуктивністю

$$L >> Ld - Ля. \qquad (3.5) >>$$

Реактор можна вибрати по Додатку 4 відповідно до струму *Iš*. Реактор

необхідно перевірити на допустимість перевантажень:

$$In < 2{,}5IL_н; \qquad tn < tLn. \tag{3.6}$$

Після цього уточнюються сумарна індуктивність і сумарний індуктивний опір *xd* в ланцюзі випрямленого струму.

Оскільки тепер вибрані всі елементи можна остаточно перевірити, чи дає випрямляч на виході задану напругу *Uķ* при струмі двигуна *Iš* і мінімальній напрузі мережі:

$$U = 2.34K_{c\min} \cdot U_{2H} - 2U_{T(TO)} - (\frac{3}{\pi} X_a + 2r_a + r_1 + 2r_T)I_d \tag{6.7}$$

<u>Прикладрозрахунку</u>

Розраховуємо випрямлену напругу при максимальній напрузі в мережі відповідно до формули (3.3)

$$Ud0_{max} = 2{,}34\ Kc_{maxU2н} = 2{,}341{,}1118{,}4 = \cdot\cdot 305 \text{ Ст.}$$

Визначимо кут α при номінальній напрузі на двигуні *Uķ*, струмі *Iš* і максимальній напрузі мережі (падіння напруги на активному опорі реактора доки невідоме, але воно мале, і їм можна нехтувати).

$$Cos\alpha = \frac{U_H + (\frac{3}{\pi} X_a + 2r_a + r_1 + 2r_T)I_d + 2T(TO)}{U_{do}} =$$

$$= \frac{220 + (\frac{3}{\pi} 0{,}0121 + 2 \cdot 0{,}0039 + 2 \cdot 0{,}000215) \cdot 592 + 2 \cdot 1{,}0}{305} = 0{,}766 = 40\, ел.град.$$

Знаходимо амплітуду першої гармоніки пульсацій напруги

$$U_{dm(1)} = \frac{2\cos\alpha}{m^2 - 1}\sqrt{1 + m^2 tg^2\alpha} \cdot U_{do} = \frac{2 \cdot 0{,}766}{6^2 - 1}\sqrt{1 + 6^2 \cdot 0{,}838^2} \cdot 305 = 68{,}4 \text{ В.}$$

Визначаємо необхідну індуктивність в ланцюзівипрямленого струму

$$L_d = \frac{U_{dm(1)}}{m\omega q I_p} = \frac{68{,}4}{6 \cdot 314 \cdot 0{,}02 \cdot 592} = 3{,}06 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Якщо розрахована індуктивність менше індуктивності якоря *Ля*, то установка реактора не потрібна. Якщо більше, то потрібний додатковий реактор з індуктивністю.

Розраховуємо індуктивність згладжуючого реактора

$$Ll = Ld - Ля = 3{,}06 \cdot 10\text{-}3 - 1{,}8110\text{-}3 \cdot = 1{,}2510\text{-}3 \cdot \text{Гн.}$$

По Додатку 4 вибираємо згладжуючий реактор типа ФРОС-1000/0,5 на номінальний струм 800А з індуктивністю *Ll* = 2,3 мГн і активним опором обмотки *rl=4,7* мОм.

Знаходимодопустимий струмреактора протягом 10 с при перевантаженні 150 % по формулі (3.6)

$$In_{доп=2,5ILн} = 2{,}5800 = \cdot 2000 \text{ А.}$$

Реактор витримає навантаження, оскільки струм перевантаження двигуна (*In*= 1480 А) менше по величині і по тривалості.

Визначаємо загальну індуктивність в ланцюзі випрямленого струму

$$Ll = Ld + Lя = 2,3 \cdot 10\text{-}3 + 1,81 \cdot 10^{-3} = 4,1110\text{-}3 \cdot \text{Гн},$$

а індуктивний опір

$$xd = \omega Ld = 3144,1110\text{-}3 \cdot = 1,29 \text{ Ом}.$$

Напруга на двигуні при мінімальній напрузі мережі і струмі знаходиться по формулі (3.7)

$$U = 2.34 K_{c\min} \cdot U_{2H} - 2U_{T(TO)} - (\frac{3}{\pi} X_a + 2r_a + r_1 + 2r_T) I_d =$$

$$2,34 \cdot 0,9 \cdot 118,4 - (\frac{3}{\pi} 0,0121 + 2 \cdot 0,0039 + 2 \cdot 000215 + 0,0047) \cdot 592 - 2 \cdot 1,0 = 232,9 \text{ В}.$$

Напруга $U > Un$, отже, випрямляч забезпечує заданий режим.

ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ ПРО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАВДАНЬ

Звіт про виконання практичних завдань представляється у вигляді записки розрахункового пояснення об'ємом 15-20 сторінками. У записці мають бути обґрунтовані всі прийняті рішення, вказані методи розрахунку, приведені всі розрахункові формули і співвідношення.

Має бути дана нумерація пунктів і підпунктів виконуваного завдання, приведена принципова схема спроєктованого випрямляча.

Оформлення записки розрахункового пояснення повинне відповідати вимогам ДСТУ і ЄСКД.

ДОДАТОК 1

Основні параметри силових трансформаторів для перетворювачів тиристорів електроприводів постійного струму середньої потужності

Структура умовного позначення (порядок відповідає розташуванню позначення в найменуванні):

X X X -X X

1. Число фаз (Т - трифазний).
2. Вигляд охолоджування (З - природне повітря при відкритому виконання, СЗ - те ж, але при захищеному виконанні).
3. Тип перетворювача (П - для напівпровідникових випрямлячів).
4. Типова потужність, кВА.
5. Клас напруги силової обмотки, кВ.

Основні параметри сухих трансформаторів середньої потужності приведені в таблиці П. 1.1.

Таблиця П. 1.1

Тип трансформатора	Номінальна потужність, кВА	Номінальна напруга, В			Номінальний струм, А		Напруга КЗ, Uk %	Струм ХХ, Іхх %	Втрати, Вт	
		Силової обмотки	Вентильної обмотки	Перетворювача	Змінної вентильної обмотки	Випрямлений перетворювача			ХХ	КЗ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ТСП-10/0,7	7,3	380	205	230	20,5	25	5,2	16	130	320
ТСП-16/0,7	14,6	380	205 410	230 460	41,0 20,5	50 25	5,5	10	140	550
ТСП-25/0,7	29,1	380	205 410	230 460	82,0 41,0	100 50	5,5	8	210	1100
	58	380 380	205 410	230 460	164 82	200 100	5,5	6	330	1900
ТСП-100/0,7	93	380	205	230	302	320	5,5	5	440	2300
ТСП-125/0,7	117	380	410	460	164	200	5,5	4	520	2700
ТСЗЛ-160/0,7	143	380	202	230	408	500	4,5	5,2	795	2400
ТС11-160/0,7	147	380	410	400	204	250	4,7	5,2	795	2400
.ТСЗПМ-200/0,7	182,5	380	205	230	514	630	5,5	1,5	800	3100
ТСЗПМ-200/0.7	206	380	410	460	290	350	5,75	1,5	800	3200
ТСЗП-250/0,7	235	380	208	230	653	800	4,7	3,4	95	3800
ТСЗП-250/0,7	235	380	410	400	326	400	4,7	3,4	915	3700

Примітки: 1. Відповідно до ГОСТ 16772-77 Трансформаторів і реактори для електроприводів повинні витримувати наступні перевантаження: 75% -1 хв., 100% - 1 5 з, 150% - 10 с.

2. При циклічних навантаженнях середньоквадратичне значення струму не повинне перевищувати номінальний струм. Час усереднювання - 10 хв.

ДОДАТОК 2

Основні параметри і теплові характеристики тиристорів

Структура умовного позначення (порядок відповідає розташуванню позначення в найменуванні):

Т Х Х Х Х -Х -Х -Х -Х -Х -Х -Х -Х

1. Тиристор
2. Вигляд тиристора
3. Номер модифікації
4. Конструктивного виконання
5. Середній струм, А
6. Клас
7. Група по динамічних параметрах
8. Межі імпульсної напруги
9. Кліматичного виконання і категорій розміщення.

Основні граничнодопустимі і характеризуючі електричні параметри низькочастотних тиристорів нових серій приведені в таблицю. П. 2.1. У табл. П. 2.2 приведені коефіцієнти апроксимації теплових перехідних опорі тиристорів з радіаторами.

Таблиця П. 2.1

Параметри низькочастотних тиристорів

Тип тиристора	Itavm, А	UDRM, URRM В	Itsm при Tj=Tjm, кА	UT(TO) не більш В	rт не більш мОм
1	2	3	4	5	6
Т112-16	16	100-1200	0,20	1,20	11,9
Т132 16	16	1300-2000	0,22	1,4	23,9
Т122-20	20	100-1200	0,30	1,15	17,2
Т132-25	25	1300-2000	0,33	1,3	11,5
Т122-25	25	100-1200	0,35	1,10	10,9
Т142-32	32	1300-2000	0,38	1,25	9,5
Т132-40	40	100-1200	0,75	1,05	5,6
Т142-40	40	1300-2000	0,70	1,25	7.6
Т132-50	50	100-1200	0,80	1,03	4,6
Т142-50	50	1300-2000	0,75	1,20	6,4
Т142-63	63	100-1200	1,20	0,95	4,1
Т152-63	63	1300-2000	1,10	1,15	5,3
Т142-80	80	100-2200	1,35	0,93	3,3
Т152-80	80	1300-2000	1,20	1,1	4,1
Т151-100	100	300-1600	2,0	1,15	2,54
Т161-125	125	300-1600	2,5	1,15	1,80
Т161-160	160	300-1600	4,0	1,15	1,40
Т171-200	200	300-1600	5,0	1,15	1,0
Т123-200	200	400-1600	3,3	1,1	1,5
Т171-250	250	300-1600	6,0	1,1	0,83
Т123-250	250	400-1200	4,5	1,0	1,08
Т171-320	320	300-1600	7,0	1,05	0,55
Т123-320	320	400-800	5,0	0,95	0,75
Т133-320	320	900-2000	6,0	1,2	1,1
Т133-400	400	400-1600	7,0	1,05	0,68
Т143-400	400	1800-2400	8,0	1,2	0,95
Т143-500	500	400-1600	10,0	1,1	0,57
Т143-630	630	400-1200	12,0	1,0	0,43
Т153-630	630	1300-2400	14,0	1,25	0,55
Т153-800	800	1000-1800	16,0	1,15	0,34
Т253-800	800	2000-2400	16,0	1,2	0.44
Т253-1000	1000	1000-1800	20,0	1,0	0,25
Т253 1250	1250	400-1200	26,0	1,0	0,14

Примітки:

1. Itavm - максимально-допустимий середній струм у відкритому стані (Tc 85°C, струм однонапівперіодний синусоїдальний, кут провідності 180°, частота 50 Гц).

2. UDRM і URRM - іпмпульсна напруга в закритому стані, що повторюється, і імпульсна зворотна напруга, що повторюється, при максимальній температурі переходу Tjm, частоті 50 Гц і розімкненому ланцюгу управління.

3. Itsm - ударний струм, що повторюється, у відкритому стані при Tjm (однонапівперіодний синусоїдальний одиночний імпульс тривалістю 10 мс)

4. $Ut_{(TO)}$ - порогова напруга.

5. rn - диференціальний опір у відкритому стані.

Таблиця П. 2.2

Коефіцієнти апроксимації теплових перехідних опорі тиристорів з радіаторами

Тип тири-стора	Тип охла-дителя	V м/с	Rthja1 °C/Вт	Rthja2 °C/Вт	Rthja3 °C/Вт	t1, з	t2, з	t3, з
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Т112-16	0111-60	0	1,23	1,94	7,04	0,034	9,37	959
Т122-20	0221-60	0	0.79	1,18	2,17	0,032	13,4	819
Т122-25	0221-60	0	0,65	0,90	2,45	0,033	11,6	865
Т123-200 Т123-250 Т123-320	0123-100	0	0,068	0,21	0,52	0,015	19,3	463
		3	0,070	0,17	0,14	0,016	17,2	301
		6	0,070	0,15	0,10	0,016	15,0	433
		12	0.070	0.12	0,086	0,016	11,9	351
Т132-16	0221-60	0	0,90	1,711,	1,97	0,032	17,8	656
Т132-25	0221-60	0	0,58	04	2,67	0,023	12,2	804
Г132-40	0231-80	0	0.67	0,76	1,97	0,050	13.8	597
		3	0,67	0,90	0,27	0,100	16,0	454
		6	0,67	0,79	0,11	0,049	12,9	600
Т132-50	0241-У	0	0,41	0,70	2,13	0,031	12,2	581
		3	0,42	0,93	0,40	0,032	17,1 1	333
		6	0,41	0,86	0,27	0,031	15,0	592
Т133-320 ТІ33-400	0143-150	0	0,023	0,16	0,38	0,023	24,1	445
		3	0,023	0,11	0,086	0,023	16,6	463
		6	0,024	0,084	0,076	6,024	14,8	614
		12	0,025	0,065	0,064	0,025	14,2	391
Т142-32	0231-80	0	0,75	0,91	2,40	0,045	22,7	859
ТІ 42-40	0231-80	0	0,44	1,03	2,39	0,039	17,7	979
Т142-50	0231-80	0	0,37	0,91	2,45	0,036	22,0	826
Т142-63	0241-80	0	0,32	0,68	1,90	0,036	12,4	672
		3	0,33	0,90	0,41	0,037	17,2	866
		6	0,213	0,90	0,20	0,037	17,3	436
Т142-80	0241-80	0	0,30	0,61	1,87	0,033	14,7	933
		3	0,30	0,70	0,50	0,034	16,9	434
		6	0,30	0,72	0,27	0,034	17,7	263
ТІ43-400 Т143-500 Т143-630	0243-150	0	0,019	0,13	0,175	0,020	15,3	567
		3	0,022	0,075	0,053	0,022	12,2	423
		6	0,023	0,065	0,037	0,023	12,1	447
		12	0,023	0,050	0,037	0,023	10,4	502
Т151-100	0151-80	0	0,10	0,46	1,57	0,022	19,0	876
		3	0,17	0,50	0,56	0,022	20,5	547

		6	0,17	0,47	0,40	0,026	18,4	478
		12	0,17	0,37	0,36	0,021	12,7	507
T 152-63	0241-80	0	0,27	0,63	2,01	0,020	14,6	609
		3	0,27	0,87	0,47	0,020	20,5	546
		6	0,27	0,92	0,13	0,020	21,7	525
TI 52-80	0241-80	0	0,24	0,53	1,98	0,034	17,2	706
		3	0,24	0,63	0,65	0,034	20,4	326
		6	0,24	0,76	0,26	0,0341	24,2	531
T153-630 T153- 800	0153-150	0	0,017	0,080	0,20	0,011	17,1	820
		3	0,018	0,074	0,043	0,011	18,3	465
		6	0,018	0,061	0,037	0,011	13,6	503
		12	0,017	0,050	0,018	0,011	9,44	559
T161-125 T161-160	0171-80	0	0,11	0,23	0,92	0,025	13,5	591
		3	0,11	0,25	0,30	0,025	13,1	433
		6	0,11	0,22	0,21	0,025	11,2	267
		12	0,11	0,23	0,13	0,025	11,5	306
T171-200 T171-250	0181-110	0	0,076	0,15	0,59	0,019	17,6	973
		3	0,076	0,15	0,22	0,019	17,7	676
		6	0,076	0,13	0,16	0,018	13,5	362
		12	0,076	0,14	0,097	0,018	15,1	737
T171-320	0181-110	0	0,058	0,18	0,56	0,021	14,9	962
		3	0,059	0,23	0,13	0,021	20,0	829
		6	0,059	0,23	0,057	0,021	20,5	572
		12	0,057	0,17	0,073	0,020	12,9	503
T253-800 T253-1000 T253-1250	0153-150	0	0,0087	0,078	0,20	0,022	15,5	477
		3	0,010	0,070	0,050	0,026	19,0	435
		6	0,011	0,056	0,043	0,028	18,8	464
		12	0,012	0,057	0,016	0,030	26.6	593

Примітка:

V- швидкість повітря, що охолоджує; Rthja1,2,3 - перехідний тепловий опір, t1.2.3- постійні часу.

ДОДАТОК 3

Основні параметри і характеристики швидкодіючих плавких запобіжників

Призначення - захист напівпровідникових перетворювальних агрегатів при внутрішніх коротких замиканнях в ланцюгах змінного або пульсуючого струму частоти 50 Гц і в ланцюгах постійного струму. В даний час основне вживання знаходять запобіжники типу ПП57.

Структура умовного позначення:
ПП 57 -ХХ ХХХ

1. Запобіжник плавкий.
2. Номер серії.
3. Номінальний струм підстави (таблиця. П. 3.1.)
4. Номінальна напруга основи| запобіжника (2-220 В, 3-380 В).
5. Конструктивне виконання.

Таблиця П. 3.1.

Умовний струм підстави, А	100	250	400	630	800
Позначення	31	34	37	39	40

Класифікація запобіжників на напругу 220 і 380 В приведена в таблицю. П. 3.2.

Таблиця П. 3.2.

Тип запобіжника	Номінальний струм предох-ранителя, А	Номінальні струми плавких вставок, А	Номінально е напруга переменного струму, В	Найбільша допустима напруга постійного струму, В
ПП57-3127	100	25,40,63,100	220	200
ПП57-3427	250	160,250		160
Ш157-3137	100	40,63,100	380	440
ПП57-3427	250.	160,250		
Ш57-3737	400	315,400		
ПП57-3937	630	500,630		
ПП57-4038	800	800		

Примітка. Граничний струм відключення запобіжників 100 кА.

Технічні дані запобіжників.

Плавкі елементи не плавляться протягом однієї години при протіканні умовного струму неплавлення, рівного 1,3 номінального, і плавляться протягом 15 хв. при протіканні умовного струму плавлення, рівного 2,3 номінального.

ДОДАТОК 4

Основні параметри згладжуючих реакторів для електроприводів тиристорів постійного струму

Структура умовного позначення:

Х Х Х Х -Х / Х

1.Призначення (Ф - фільтровий, З - що згладжує).
2.Вигляд виробу (Р - реактор).
3.Число фаз (О - однофазний).
4.Охолоджування (З - повітря, сухе).
5.Типова потужність (умовна), кВА.
6. Клас напруги, кВ.

Основні параметри реакторів повітряно-охолоджуваний приведені в таблицю. П. 4.1.

Таблиця П. 4.1

Тип	Номінальний постійний струм, А	Номінальна індуктивність, мГн	Опір обмотки постійному струму 40° З, не більш, мОм
ФРОС 65/0,5	250	1,5	6,8
ФРОС 65/0,5	320	1,0	4,5
ФРОС 125/0,5	500	0,75	3,0
ФРОС 250/0,5	250	6,5	17,6
ФРОС 250/0,5	320	4,2	11,5
ФРОС 250/0,5	260	0,6	1,7
ФРОС 250/0,5	1000	0,35	1Д
ФРОС 500/0,5	500	3,25	7,5
ФРОС 1000/0,5	800	2,3	4,7
ФРОС 1000/0,5	1000	1,6	3,1
СРОС-63/0,5	100	16,0	40,0
СРОС-63/0,5	200	4,0	10,0
СРОС-100/0,5	160	9,0	36,0
СРОС-100/0,5	320	2,25	6,0
СРОС-200/0,5	100	60,0	80,0
СРОС-200/0,5	200	15,0	20,0
СРОС-400/0,5	200	30,0	30,0
СРОС-400/0,5	400	7,5	7,5

Примітки:

1. Величини опорів для реакторів серії СРОС приведені орієнтовно.
2. Допустимі перевантаження відповідно до примітки до таблиці П. 1.1.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. Вилучено з https://de.com.ua/uploads/0/1703-EnergyStratagy2030.pdf

2. Островерхов М.Я., Сенько В.І., Чибеліс В.І. Промислова електроніка. Напівпровідникові перетворювачі змінної напруги у постійну: Навчальний посібник. – Київ: Ліра-К, 2021. – 342 с.

3. Сучасна перетворювальна техніка. Конспект лекцій для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / М.В. Рогоза, Н.Ю. Рухлова, Бородай В.А.; Нац. техн. ун-т. «Дніпровська політехніка». – Д.: НТУ «ДП», 2022. – 68 с.

4. Штучний інтелект в енергетиці : аналіт. доповідь / Суходоля О. М.– К. : НІСД, 2022. – 49 с. – https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2022.09.

5. Інвертори і перетворювачі частоти: монографія / Сенько В.І., Трубіцин К.В., Чибеліс В.І. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2020. – 300 с.

6. Рябенький В.М., Ушкаренко О.О., Островерхов М.Я., М.С. Махмуд Аль Суод. Програмна реалізація методів розрахунку та аналізу електричнихз кіл: Навчальний посібник. – Київ: Ліра-К, 2021. – 462 с.

7. ДСТУ 2843-94. Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення.

8. ДСТУ 2815-94 Електричні та магнітні кола та пристрої.

9. ДСТУ 3120-95 Електротехніка. Літерні позначення основних величин.

Електронне навчальне видання комбінованого використання
Можна використовувати в локальному та мережному режимі

Васюченко Павло Вікторович
Пономаренко Олена Михайлівна

ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ЕНЕРГОСИСТЕМ

Методичні вказівки
до проведення практичних занять для здобувачів вищої освіти
першого (бакалаврського) рівня денної і заочної форм здобуття освіти за
спеціальностями 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»,
015.33 «Професійна освіта (Енергетика, електротехніка та електромеханіка)»

В авторській редакції

Підписано до розміщення 21.05.2026. Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 1,88. Обсяг 1,055 Мб. Зам. № 240/26.

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.2009
Видавництво ХНУ імені В. Н. Каразіна