

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

МЕХАНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

**Кафедра електроенергетики, електротехніки
та електромеханіки**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

для виконання практичних завдань із дисципліни

***«ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В СИСТЕМАХ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ»***

Харків 2024

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки 22 жовтня 2024 р., протокол № 3.

Рекомендовано для виконання практичних завдань і контрольної роботи для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньої програми «Електропостачання та ресурсозберігаючі технології» денної та заочної форм здобуття освіти.

Укладачі:

доценти О. І. Семененко,
Ю. О. Семененко

Рецензент

доц. О. Є. Зінченко

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Розрахунок перетворювачів системи тягового електропостачання постійного струму	6
1.1 Основні параметри і схеми трифазних багатопульсних випрямлячів	6
1.2 Приклад розрахунку трифазного багатопульсного випрямляча	12
1.3 Розрахунок широтно-імпульсного перетворювача пункту підвищення напруги тягової мережі постійного струму	17
1.4 Тепловий розрахунок ключів перетворювача	21
1.5 Розрахунок фільтрів перетворювача	23
2 Розрахунок тягового перетворювального блока електрорухомого складу змінного струму	26
2.1 Вибір силової схеми тягового перетворювача електрорухомого складу змінного струму	26
2.2 Розрахунок основних параметрів трифазного мостового інвертора напруги	28
2.3 Розрахунок чотириквADRантного перетворювача	31
Список літератури	36
Додаток А	37

ВСТУП

Метою контрольної роботи є вивчення здобувачами методик розрахунків тягових напівпровідникових перетворювачів систем електропостачання залізниць та електричного рухомого складу (ЕРС). У контрольній роботі для визначених за індивідуальним варіантом завдання перетворювачів слід:

- навести силові схеми і короткий опис їхньої роботи за сталих режимів;
- розрахувати основні параметри силових схем;
- вибрати силові напівпровідникові прилади та виконати тепловий розрахунок;
- виконати розрахунок силових фільтрів, передбачені схемою перетворювача.

У наступних розділах методичної розробки наведені основні схеми тягових перетворювачів систем електропостачання залізниць та ЕРС, послідовність виконання розрахунків і розрахункові формули. Базові схеми і розрахункові формули можуть видозмінюватися залежно від конкретного варіанта завдання на контрольну роботу.

Контрольну роботу оформлюють у відповідності з чинними стандартами УкрДУЗТ. Рекомендовано використовувати текстовий редактор *Microsoft Word* і графічні редактори. Рисунки та схеми слід вставляти в основний текст роботи. У контрольній роботі після вирішення завдання слід навести список використаної літератури.

Готуючись до захисту контрольної роботи, здобувачі повинні приділити основну увагу таким питанням:

- принцип дії перетворювачів, для яких виконано розрахунок, і їхніх окремих складових;

- фізичні процеси в сталих, перехідних і аварійних режимах роботи перетворювачів;
- характеристика вихідних величин і величин, що підлягають визначенню;
- основні ідеї методики розрахунку перетворювачів;
- значення вихідних, кінцевих і основних проміжних характеристик перетворювачів.

1 Розрахунок перетворювачів системи тягового електропостачання постійного струму

1.1 Основні параметри і схеми трифазних багатопульсних випрямлячів

Випрямлячі трифазного струму використовують для живлення постійним струмом потужних статичних активно-індуктивних навантажень, навантажень з протиЕРС і динамічних навантажень. Наприклад, у перетворювальних агрегатах тягових підстанцій систем електропостачання постійного струму також використовують трифазні шестипульсні та дванадцятипульсні схеми випрямлячів. Для виконання першого завдання контрольної роботи в таблиці 1.1 [1, 2] подані основні співвідношення параметрів трифазних некерованих випрямлячів.

Таблиця 1.1 – Основні співвідношення параметрів трифазних некерованих випрямлячів за активно-індуктивного навантаження

Параметр	Схема трифазного некерованого випрямляча			
	З нульовим виводом	Зі зрівн. реактором	Мостова	Дванадцяти-пульсна
1	2	3	4	5
Кількість діодів	3	6	6	12
Середнє значення випрямленої напруги $U_{cp} = U_d$	$1,17U_{2\phi}$	$1,17U_{2\phi}$	$2,34U_{2\phi}$	$U_{d1} = 2,34U_{2\phi Y}$ $U_{d2} = 1,35U_{2\phi \Delta}$
Середнє значення струму діода I_{VDcp}	$I_d / 3$	$I_d / 6$	$I_d / 3$	$I_d / 3$
Струм вторинної обмотки трансформатора I_2	$0,577I_d$	$0,289I_d$	$0,817I_d$	$I_{2Y} = 0,817I_d$ $I_{2\Delta} = 0,472I_d$
Струм первинної обмотки трансформатора I_1	$0,472k_T I_d$	$0,408k_T I_d$	$0,817k_T I_d$	$0,817k_{TY} I_d + 0,472k_{T\Delta} I_d$

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5
Максимальна зворотна напруга на діоді $U_{звм}$	$2,09U_d$	$2,09U_d$	$1,045U_d$	$0,522U_d$
Кількість пульсацій випрямленої напруги на періоді t	3	6	6	12
Коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги $k_{пу} = U_{звм}/U_d$	0,25	0,057	0,057	0,014
Типова потужність трансформатора S_T/P_d ($P_d = I_d U_d$)	1,35	1,26	1,045	1,028

Найпростішою схемою трифазних випрямлячів є *схема випрямлення з нульовим виводом* (рисунок 1.1) [1]. Вона містить трифазний трансформатор TV , вторинні обмотки якого з'єднані за схемою «зірка», комутатор з трьох діодів $VD1$, $VD2$, $VD3$, катоди яких з'єднані в точці d , а аноди з'єднані з відповідними виводами a , b , c різних фаз вторинної обмотки трансформатора. Навантаження ввімкнене між точкою d і нульовим виводом n вторинної обмотки трансформатора.

Як видно з рисунка 1.1, якість випрямленої напруги досить низька, бо кількість пульсацій випрямленої напруги u_d , показаної жирною лінією на діаграмі фазних напруг, на періоді складає три ($m = 3$), а коефіцієнт пульсацій напруги $k_{пу}$, за таблицею 1.1, складає 0,25.

Протікання безперервного струму у навантаженні, який може бути визначений як $i_d = u_d/R_H$, забезпечується почерговим підключенням навантаження до різних фаз вихідної обмотки трансформатора та відповідно почерговим протіканням струму i_1 , i_2 та i_3 . Таким чином середній струм I_{VDcp} , що протікає через кожен із діодів, дорівнює $1/3$ середнього значення випрямленого струму $I_{cp} = I_d$, як наведено в табл. 1.

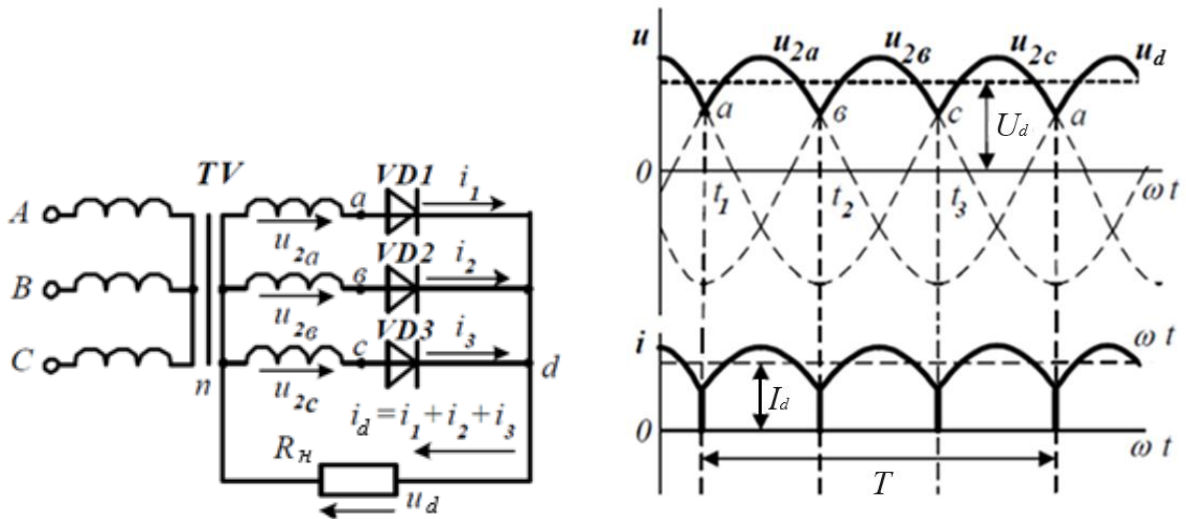
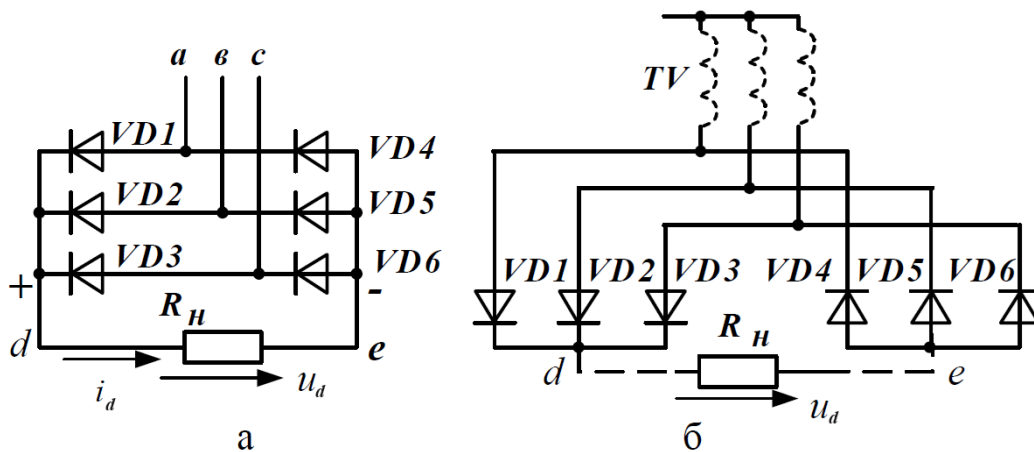


Рисунок 1.1 – Схема трифазного випрямляча з нульовим виводом і діаграми випрямленої напруги і струму за активного навантаження

Трифазна мостова схема випрямлення (рис. 1.2) [1] містить дві узгоджено послідовно з'єднані з боку постійного струму діодні групи: катодну $VD1, VD2, VD3$ та анодну $VD4, VD5, VD6$. З боку змінного струму ці групи діодів з'єднані паралельно і живляться від різних фаз трифазного струму.



а) схема принципова; б) еквівалентна схема

Рисунок 1.2 – Трифазний мостовий випрямляч

Кожна група повторює роботу трифазної схеми з нульовим виводом (рисунок 1.1), навантаження при цьому ввімкнене між точками d та e . Середнє значення випрямленої напруги для катодної і анодної груп визначають як і в нульовій схемі випрямлення, тому за їхнім послідовним узгодженим з'єднанням з боку постійного струму отримуємо вихідну напругу $U_{cp} = U_d$ (рисунок 1.3) у два рази більшу, ніж її значення для нульової схеми випрямлення (таблиця 1.1). Кількість пульсацій випрямленої напруги u_d на періоді зроста порівняно з попередньою схемою вдвічі ($m = 6$), а коефіцієнт пульсацій напруги $k_{пу}$ знизився більш ніж у чотири рази від 0,25 до 0,057 (таблиця 1.1), тобто якість випрямленої напруги підвищилася.

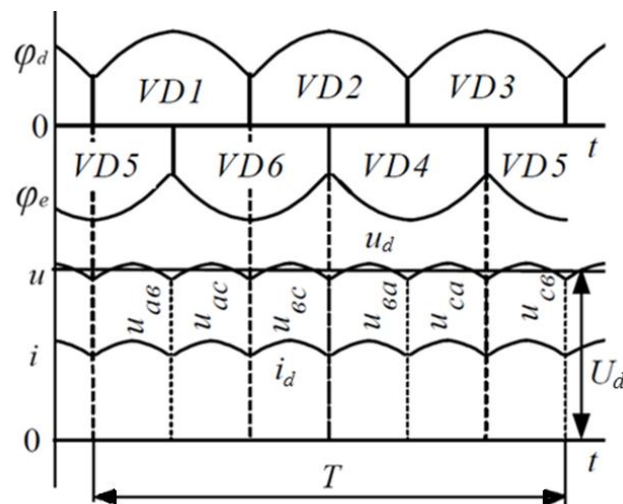


Рисунок 1.3 – Діаграми випрямленої напруги і струму трифазного мостового випрямляча за активного навантаження

Випрямлений струм i_d за активного навантаження за формою повторює криву вихідної напруги u_d (рисунок 1.3) і в кожному мить часу протікає крізь пару діодів (один із катодної, другий з анодної групи). При цьому кожен із діодів проводить струм лише третину періоду, тобто середній струм діода I_{VDcp} дорівнює $I_d/3$ (таблиця 1.1). У трифазних схемах

випрямлення струм навантаження безперервний і сформований почерговим підключенням до різних фаз трифазної мережі змінного струму, а комутація зведена до перемикання струму з одної гілки кола на іншу.

У реальній схемі випрямляча з урахуванням індуктивності кола змінного струму процес комутації займає певний час і суттєво впливає на форму випрямленої напруги. При цьому наявність індуктивності у вихідному колі, а це індуктивність вихідного фільтра та тягової мережі, забезпечує згладжування пульсацій випрямленого струму.

Дванадцятипульсна схема випрямлення (рисунок 1.4) [1] використовується для покращення якості енергії постійного струму та поліпшення сумісності з мережею живлення. Цього можна досягти використанням двох мостових схем, що збільшує кількість пульсацій випрямленої напруги на періоді.

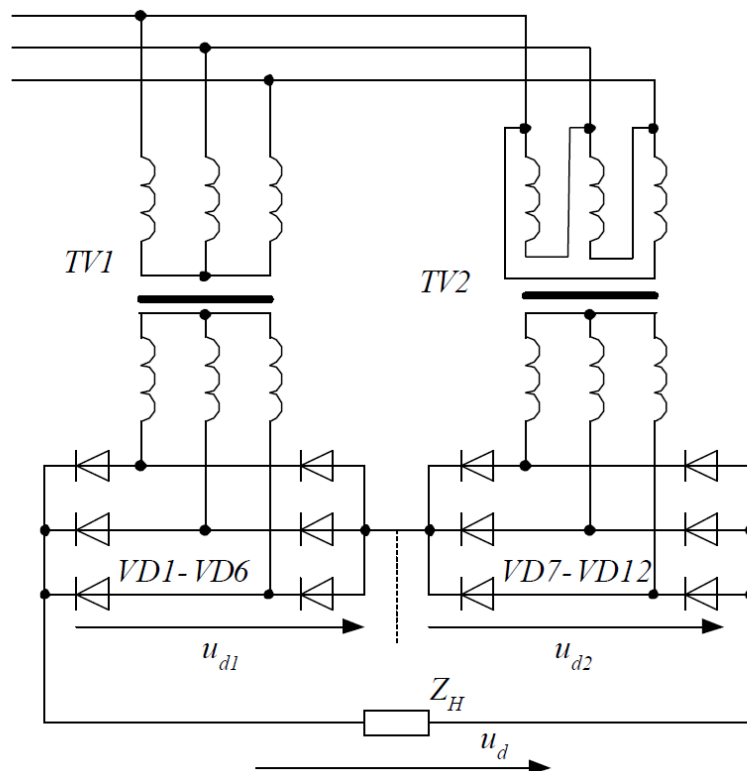
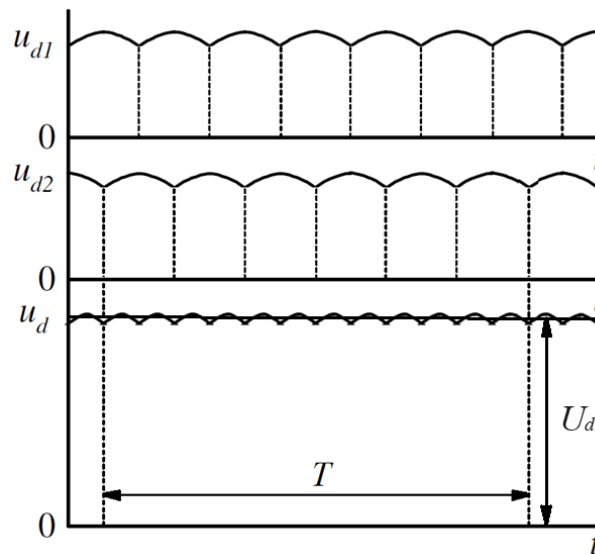


Рисунок 1.4 – Дванадцятипульсна схема випрямляча з послідовним з'єднанням мостів

Для забезпечення дванадцяти пульсацій на періоді потрібно, щоб зсув напруги живлення двох трифазних мостових випрямлячів за фазою складав $2\pi/12$ або 30° . Такий зсув напруги реалізують використанням різних схем з'єднань обмоток трансформаторів, наприклад за схемою «зірка» і «трикутник», як показано на рисунку 1.4. Діаграми вихідної напруги обох випрямлячів u_{d1} і u_{d2} та сумарна напруга u_d подані на рисунку 1.5.



Рисунк 1.5 – Діаграми вихідної напруги дванадцятипульсного випрямляча з послідовним з'єднанням мостів

Оскільки миттєві значення напруги u_{d1} і u_{d2} за основною гармонікою зсунуті на кут 30° , то кількість пульсацій навантаженні u_d подвоюється і складає за період $m = 12$. Завдяки додаванню напруг u_{d1} і u_{d2} відбувається збільшення вдвічі сумарної вихідної напруги U_d і зменшення амплітуди пульсацій $U_{змт}$, а коефіцієнт пульсацій напруги знижується до 0,014, як наведено в таблиці 1.1.

Кожен із діодів дванадцятипульсного випрямляча з послідовним з'єднанням мостів проводить струм третину періоду, тобто середній струм діода I_{VDcp} дорівнює $I_d / 3$. Для рівномірного завантаження обладнання та

мінімізації амплітуди пульсацій потрібно, щоб середні значення напруги на виході випрямлячів були однаковими $U_{d1} = U_{d2}$. Для цього коефіцієнт трансформації $TV2$ має бути в $\sqrt{3}$ рази більший, ніж у $TV1$.

У перетворювальних агрегатах тягових підстанцій із дванадцяти-пульсними випрямлячами замість двох, як на рисунку 1.4, застосовують один трансформатор із двома вторинними обмотками, що мають схеми з'єднання «зірка» і «трикутник», і кількістю витків, які забезпечують зазначене співвідношення між коефіцієнтами трансформації.

1.2 Приклад розрахунку трифазного багатопульсного випрямляча

Розрахувати шестипульсний випрямляч зі зрівнювальним реактором (рисунок 1.6). Вихідні дані [2]: номінальна активна вихідна потужність – 600 кВт; номінальна середня випрямлена (вихідна) напруга – 600 В; номінальна напруга живлення (лінійна) – 6 кВ; частота мережі – 50 Гц.

Розрахунок згідно з методикою [2] розпочинають із визначення номінального значення середнього випрямленого струму за рівнянням

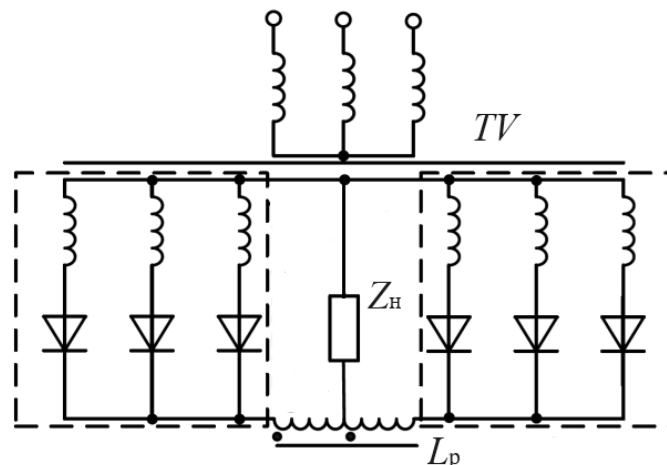


Рисунок 1.6 – Схема шестипульсного випрямляча зі зрівнювальним реактором

$$I_{dH} = \frac{P_{dH}}{U_{dH}}, \quad (1.1)$$

де P_{dH} – номінальна активна вихідна потужність перетворювача;

U_{dH} – номінальна вихідна напруга.

$$I_{dH} = \frac{600 \cdot 10^3}{600} = 1000 \text{ А.}$$

Номінальний середній струм діода визначають за відповідним співвідношенням із таблиці 1.1:

$$I_{VDcp} = \frac{I_{dH}}{6}; \quad (1.2)$$

$$I_{VDcp} = \frac{1000}{6} = 167 \text{ А.}$$

Максимальну зворотну напругу на діоді також визначають за співвідношенням із таблиці 1.1:

$$U_{звм} = 2,09U_d; \quad (1.3)$$

$$U_{звм} = 2,09 \cdot 600 = 1254 \text{ В.}$$

З урахуванням можливих імпульсних перенапруг усередині випрямляча та в мережі живлення вибираємо діод із коефіцієнтом запасу за напругою $k_3 = 2$ ($1254 \cdot 2 = 2508 \text{ В}$) [2]. За довідником вибираємо діод типу Д133-500-28, у якого допустима зворотна напруга $U_{звм} = 2800 \text{ В}$ (28 клас); максимально допустимий струм $I_{VDm} = 180 \text{ А}$ з охолоджувачем типу О143-150 і природним охолодженням; пряма напруга $U_{пр} = 1,7 \text{ В}$. Для більш потужних випрямлячів слід застосовувати діоди таблеткової конструкції,

наприклад, типу Д153-2000-32, які мають середній прямий струм $I_{VD} = 2000$ А; пряму напругу $U_{пр} = 1,8$ В; допустима зворотна напруга $U_{звт} = 3200$ В (32 клас).

Номінальне діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора визначають за співвідношенням із таблиці 1.1:

$$I_{2н} = 0,289 I_{дн}; \quad (1.4)$$

$$I_{2н} = 0,289 \cdot 1000 = 289 \text{ А.}$$

Номінальна фазна напруга первинної обмотки трансформатора з урахуванням номінальної лінійної напруги живлення 6 кВ

$$U_{1ф} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3468 \text{ В.}$$

Напругу за критичного струму навантаження (напруга умовного холостого ходу) U'_{d0} [2] визначають з урахуванням спаду напруги на індуктивності розсіювання трансформатора ΔU_{ϕ} , спаду напруги на діодах випрямляча $U_{пр}$ і спаду напруги на активних опорах обмоток трансформатора і зрівнювального реактора ΔU_R :

$$U'_{d0} = U_d + \Delta U_{\phi} + U_{пр} + \Delta U_R. \quad (1.5)$$

Спад напруги на індуктивності розсіювання

$$\Delta U_{\phi} = 0,5 \frac{U_{к\%}}{100\%} U'_{d0} \approx 0,5 \frac{U_{к\%}}{100\%} U_d. \quad (1.6)$$

За даними довідника, трансформатор, що живить випрямляч, виконаний за схемою зі зрівнювальним реактором на типову потужність близько 1000 кВА, має напругу короткого замикання $U_k = 8 \%$, отже,

$$\Delta U_\phi = 0,5 \cdot \frac{8}{100} \cdot 600 = 24 \text{ В.}$$

Втрати потужності в міді, які характеризують активний опір обмоток трансформатора, складають $\Delta P_{RM} = 1 \%$; втрати в обмотках зрівнювального реактора оцінюють приблизно, беручи їх рівними $\Delta P_{Rp} = 0,33 \%$ [2], отже,

$$\Delta U_R = \frac{\Delta U_{RM} + \Delta U_{Rp}}{100\%} U_d. \quad (1.7)$$

$$\Delta U_R = \frac{1,33}{100} \cdot 600 = 8 \text{ В.}$$

За рівнянням (1.5), $U'_{d0} = 600 + 24 + 1,7 + 8 = 634 \text{ В.}$

Діюче значення ЕРС вторинної обмотки трансформатора визначають зі співвідношення

$$E_2 = \frac{U'_{d0}}{1,17}; \quad (1.8)$$

$$E_2 = \frac{634}{1,17} = 542 \text{ В.}$$

Коефіцієнт трансформації трансформатора

$$k_T = \frac{E_2}{U_{1\phi}}; \quad (1.9)$$

$$k_T = \frac{542}{3468} = 0,156.$$

Номинальне діюче значення струму первинної обмотки трансформатора визначають за співвідношенням із таблиці 1.1:

$$I_{1H} = 0,408k_T I_{dH}; \quad (1.10)$$
$$I_{1H} = 0,408 \cdot 0,156 \cdot 1000 = 63,7 \text{ А.}$$

Типову потужність трансформатора визначають за рівнянням [2]

$$S_T = \frac{1,26 \cdot P_{dH}}{\eta_{TB}}, \quad (1.11)$$

де $\eta_{TB} = 0,98$ – коефіцієнт, що враховує активні втрати потужності в трансформаторі та діодах випрямляча.

$$S_T = \frac{1,26 \cdot 600}{0,98} = 771 \text{ кВА.}$$

Типова потужність зрівнювального реактора [2]

$$S_{TЗР} = 0,07P_d; \quad (1.12)$$
$$S_{TЗР} = 0,07 \cdot 600 = 42 \text{ кВА.}$$

Зрівнювальний реактор розрахований на таку індуктивність, щоб критичний струм навантаження, за якого схема переходить від шестипульсного режиму роботи до подвійного трипульсного, не перевищував 1 % I_{dH} . У цьому випадку значення критичного струму

$$I_{dкр} = \beta I_{dH}; \quad (1.13)$$
$$I_{dкр} = 0,01 \cdot 1000 = 10 \text{ А,}$$

а індуктивність зрівнювального реактора має бути

$$L_{зр} = \frac{0,5\sqrt{2}E_2}{6\pi f_m I_{дкр}}. \quad (1.14)$$

$$L_{зр} = \frac{0,5\sqrt{2} \cdot 542}{6 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10} = 0,04 \text{ Гн} = 40 \text{ мГн}.$$

За наведеним прикладом здобувачі повинні виконати розрахунок трифазного багатопульсного випрямляча з вихідними даними, взятими за індивідуальним варіантом завдання (таблиця А.1).

1.3 Розрахунок широтно-імпульсного перетворювача пункту підвищення напруги тягової мережі постійного струму

Значний якісний стрибок у галузі потужних перетворювачів відбувся в 90-х роках ХХ сторіччя на етапі широкого впровадження двоопераційних силових тиристорів, які скорочено англійською позначають *GTO* (тиристор, вимкнений за електродом керування) і *GCT* (тиристор, комутований за затвором – більш швидкодіючий варіант) [3-5]. На початку ХХІ сторіччя більш швидкодіючим біполярним транзисторам з ізольованим затвором (*IGBT*) вдалося помітно послабити позиції *GTO* та *GCT* і зайняти місце в сучасних системах живлення, у тому числі тягового ЕРС залізниць. Завдяки цьому підвищилася частота перемикань силових напівпровідникових ключів, у результаті перетворювачі стали легшими та компактнішими, зменшилися втрати потужності в них.

Для підвищення якості електричної енергії в тяговій мережі постійного струму для швидкісного руху в ряді наукових робіт запропоновано застосовувати розподілену систему електропостачання, у якій, крім тягових підстанцій, додатково використовують пункти підвищення

напруги (ППН) [6]. Їх розташовують у середній частині міжпідстанційних зон і для зниження втрат енергії з передаванням до них живлять підвищеною напругою 10 кВ змінного або 9 кВ постійного струму. Для живлення ППН напругою 10 кВ потрібна потужна трифазна мережа змінного струму. Якщо ж ППН отримує живлення від сусідніх тягових підстанцій по лінії постійного струму, то її проводи підвішують із польового боку на опорах контактної мережі, а провідником зворотного струму є рейкова мережа.

Як перетворювач ППН для активного підсилення тягової мережі постійного струму може бути застосований широтно-імпульсний перетворювач (ШПІ) знижувального типу (рисунок 1.7) [6]. Його робота полягає в тому, що він знижує напругу 9 кВ, подану на вхід ППН по лінії постійного струму, до необхідного рівня напруги живлення тягової мережі (за варіантом завдання).

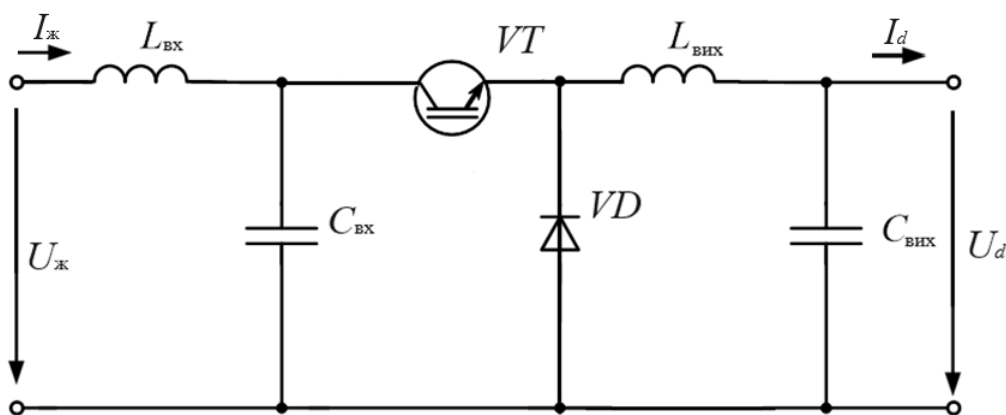


Рисунок 1.7 – Схема широтно-імпульсного перетворювача пункту підвищення напруги

Безпосередньо розрахунок ШПІ розпочинають із визначення номінального вихідного струму перетворювача $I_{dн}$ у режимі живлення тягової мережі за рівнянням (1.1). Мінімально необхідні параметри силових напівпровідникових приладів основного комутатора (окремих

IGBT і діодів) або силових модулів визначають за струмом $I_{dн}$ і максимальною напругою живлення ППН $U_{жmax}$. Вона визначується за варіантом заданої напруги живлення з урахуванням 10 % максимального допустимого відхилення.

Відомо, що частота широтно-імпульсної модуляції (частота перемикачів силових ключів перетворювача) для ШПП [3]

$$f_{п} = \frac{U_{жmax}(1-\tau)\tau}{2Lk_{пi}I_{dн}}, \quad (1.15)$$

де L – індуктивність дроселя (реактора) вихідного фільтра ШПП;

$k_{пi} = 0,02 \div 0,03$ – допустимий коефіцієнт пульсацій струму;

τ – коефіцієнт заповнення, який у цьому випадку слід прийняти максимальним,

$$\tau_{max} = \frac{U_{dн}}{U_{жmin}}. \quad (1.16)$$

З урахуванням рекомендованої частоти перемикачів ключів на базі високовольтних *IGBT* (1000÷1500 Гц) визначають індуктивність дроселя фільтра за рівнянням (1.15). Ємність вихідного *LC* фільтра визначають за наведеною нижче (п. 1.5) методикою розрахунку фільтрів.

Розрахункові середні значення струмів транзисторів і діодів силових ключів оборотного ШПП відповідно

$$I_V = \tau I_{dн}; \quad (1.17)$$

$$I_D = (1-\tau)I_{dн}. \quad (1.18)$$

Необхідно визначити, що є для цього силового приладу найскладнішим. Для силових приладів ключа слід прийняти такі значення

коефіцієнта заповнення: для транзистора – максимальне τ_{max} , а діода – мінімальне

$$\tau_{min} = \frac{U_{dн}}{U_{жmax}}. \quad (1.19)$$

Середнє значення струму транзистора I_V є також середнім значенням струму живлення ШПІ $I_{ж}$. Якщо не застосовані пристрої комутаційного захисту, то керовані ключі на *IGBT* у ШПІ працюють із примусовою комутацією як при ввімкненні, так і вимиканні. У такому випадку слід прийняти значення комутованої напруги і струму $U_k=U_{жmax}$ і $I_k=I_{дн}$.

Після розрахунку всіх основних параметрів силових ключів вибираємо для їхньої реалізації силові напівпровідникові прилади за каталогами підприємств-виробників, наприклад каталогами фірм *EUPEC*, *Mitsubishi*, *Siemens*, *Semikron* та ін. За потреби застосовують послідовне або паралельне з'єднання декількох напівпровідникових приладів, про що слід зазначити в контрольній роботі.

Наприклад, вибираємо *IGBT* фірми *Mitsubishi CM600HG130H*, розраховані на номінальний струм 600 А і максимальну напругу 6500 В [7]. За номінального струму падіння напруги у провідному стані на *IGBT* складає 4 В (на внутрішньому зворотному діоді – 2 В), а час комутації – 3 мкс. Отже, якщо, наприклад, максимальна напруга живлення складає 9,9 кВ, то з урахуванням двократного коефіцієнта запасу за напругою ($k_{zu} = 2$) необхідно застосувати три послідовно ввімкнених транзистори ($m = 3$). Якщо ж при цьому номінальний струм навантаження, наприклад, складає 1500 А, то з урахуванням коефіцієнта запасу за струмом ($k_{zi} = 1,3 \div 1,5$) необхідно застосувати чотири паралельних гілки ($n = 4$), у кожній із яких буде по три послідовно ввімкнених транзистори.

Діюче значення струму гармоніки з частотою ШІМ, визначене для розрахунку вхідного фільтра, для такого варіанта застосування ШІП перетворювача пункту підвищення напруги дорівнює

$$I_{\text{гш}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_{\text{дн}} \cdot \sin(\pi\tau_{\text{max}}). \quad (1.20)$$

1.4 Тепловий розрахунок ключів перетворювача

Теплові втрати потужності в напівпровідникових приладах силових ключів складаються із втрат у провідному стані, непровідному стані та комутаційних втрат. Втрати в непровідному стані зазвичай не враховують, бо вони відносно інших незначні.

Втрати потужності в провідному стані (статичні втрати) кожного *IGBT* або діода [3, 5]

$$P_{\text{on}} = I'_V \cdot \Delta U_V, \quad (1.21)$$

де I'_V – середнє значення струму одного *IGBT* або діода силових ключів перетворювача;

ΔU_V – спад напруги на приладі у провідному стані.

З паралельним увімкненням n *IGBT* або діодів силових ключів перетворювача з урахуванням рівномірного розподілення струму спрощено для розрахунку: за рівнянням (1.21) визначають середнє значення струму одного напівпровідникового приладу $I'_V = I_V / n$.

Комутаційні (динамічні) втрати в керованому напівпровідниковому приладі ключа кожного перетворювача визначаємо у два етапи. Спочатку

розраховують енергію комутації, яка виділяється у вигляді тепла в напівпровідниковому приладі за один період перемикачів [3, 5]:

$$E_k = \frac{1}{2} U'_k \cdot I'_k \cdot t_k, \quad (1.22)$$

де U'_k, I'_k – комутувана напруга і струм одного *IGBT* ($U'_k = U_k/m; I'_k = I_k/n$);

t_k – час комутації, який визначають як суму часу ввімкнення і вимикання напівпровідникового приладу.

Після цього знаходять потужність комутаційних втрат:

$$P_k = E_k \cdot f_{\Pi}. \quad (1.23)$$

Комутаційні втрати в напівпровідниковому приладі ключа вважають припустимими, якщо вони перевищують статичні не більш ніж удвічі. У протилежному випадку необхідно застосувати пристрої комутаційного захисту, які дають змогу знизити динамічні втрати на порядок.

Внутрішній перепад температури в силовому приладі

$$\Delta\tau = R_{\text{тв}} (P_{\text{он}} + P_k), \quad (1.24)$$

де $R_{\text{тв}}$ – внутрішній тепловий опір приладу. Наприклад, для *IGBT CM600HG130H* $R_{\text{тв}} = 0,014 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Допустимий перегрів поверхні радіатора-охолоджувача

$$\tau_{\Pi} = T_{j_{\text{max}}} - T_0 - \Delta\tau, \quad (1.25)$$

де $T_{j_{\text{max}}} = 150^\circ\text{C}$ – максимально допустима температура кристала для кремнієвих транзисторів, якими є *IGBT*;

T_0 – максимальна температура навколишнього середовища.

Тепловий опір радіатора-охолоджувача не має перевищувати значення [3, 5]

$$R_t = \frac{\tau_{\Pi}}{P_{on} + P_k}. \quad (1.26)$$

Вибираємо охолоджувач, вказуючи тип і його параметри. Якщо не вдається підібрати радіатор-охолоджувач за тепловим опором із уніфікованого ряду, то застосовують спеціально розроблений. Він повинен мати поверхню охолодження Π , яку визначають із залежності

$$R_t = \frac{1}{\alpha \Pi}, \quad (1.27)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, що залежить від охолоджувального агента і швидкості його руху, наприклад, для природного повітряного охолодження $\alpha = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$. Зі швидкістю охолоджувального повітря 6 м/с величина коефіцієнта тепловіддачі збільшується втричі.

1.5 Розрахунок фільтрів перетворювача

Якщо перетворювач є для фільтра джерелом струму гармонік пульсацій $I_{\text{гш}}$ (діюче значення, визначене раніше), то фільтр відносно перетворювача має починатися з паралельної ємності, як це показано на рисунку 1.8 [3, 5].

Ємність фільтра C розраховують за допустимою напругою гармоніки $U_{\text{гш}}$ із частотою ШІМ на навантаженні. Вважаючи, що весь струм $I_{\text{гш}}$ йде в конденсатор, отримаємо рівняння

$$\omega C = \frac{I_{\text{гш}}}{U_{\text{гш}}}, \quad (1.28)$$

де ω – частота фільтрованої гармоніки.

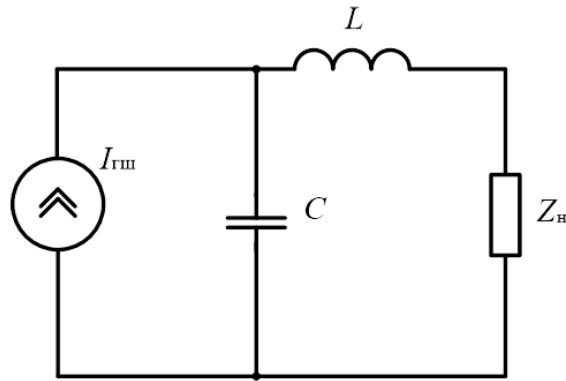


Рисунок 1.8 – Еквівалентна схема вхідного фільтра

Допустиму напругу гармоніки $U_{гш}$ на навантаженні визначають через заданий коефіцієнт пульсацій напруги $k_{пу}$ як

$$U_{гш} = k_{пу} U_{ж}. \quad (1.29)$$

Оскільки опір навантаження фільтра малий, то його часто підвищують уведенням у схему фільтра послідовного дроселя L . Вважаючи, що вся напруга $U_{гш}$ прикладена до дроселя, отримуємо необхідну індуктивність фільтра:

$$\omega L = \frac{U_{гш}}{I_{нг}}, \quad (1.30)$$

де $I_{нг}$ – допустимий вміст фільтрованої гармоніки в струмі навантаження.

Гармоніку в струмі навантаження $I_{нг}$ визначають за допустимим коефіцієнтом пульсації струму $k_{пі}$ як

$$\sqrt{2} I_{нг} = k_{пі} I_{н}, \quad (1.31)$$

де $I_{н}$ – постійна складова струму навантаження.

Якщо перетворювач є для фільтра джерелом напруги гармонік пульсацій $U_{гш}$, то фільтр відносно перетворювача має починатися з послідовної індуктивності (рисунк1.9) [3, 5].

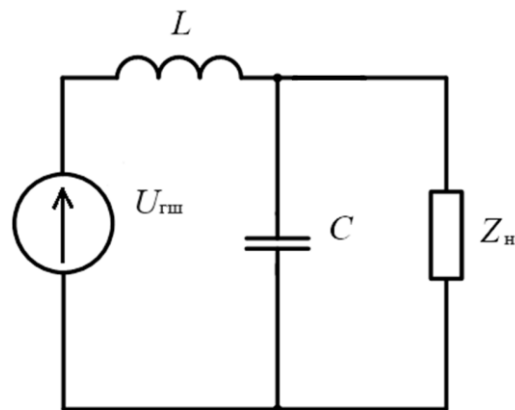


Рисунок 1.9 – Еквівалентна схема вихідного фільтра

Індуктивність фільтра L визначають за допустимим коефіцієнтом пульсацій вихідного струму $k_{шi}$ з частотою ШІМ, що вже було виконано з розрахунком ШІП. Ємність вихідного фільтра визначають за рівняннями (1.28) і (1.29), а струм гармоніки $I_{гш}$ попередньо необхідно визначити за рівнянням (1.31). Коефіцієнт пульсацій вихідної напруги $k_{шu}$ слід прийняти за завданням.

2 Розрахунок тягового перетворювального блока електрорухомого складу змінного струму

Досвід інших країн і вітчизняні розробки вже призвели до виникнення електричного та автономного рухомого складу залізниць і метрополітенів з асинхронним приводом, проте існують ще деякі проблеми із використанням асинхронних двигунів, зокрема сумісність роботи тягових асинхронних двигунів із напівпровідниковими перетворювачами, негативний вплив імпульсних перетворювачів на мережу живлення та ін. Проте позитивний досвід експлуатації вітчизняних дизель-поїздів ДЕЛ2 та електровозів змінного струму ДС3 з асинхронним електроприводом попри всі недоліки вказує на перспективність цього напрямку розробок [3, 5].

2.1 Вибір силової схеми тягового перетворювача електрорухомого складу змінного струму

На ЕРС змінного струму з асинхронними тяговими двигунами з короткозамкненим ротором для керування буде використаний напівпровідниковий інвертор, виконаний на *IGBT*. При цьому передбачене підключення перетворювача до контактної мережі змінного струму напругою 25 кВ через вхідний перетворювач. Як такий перетворювач може бути застосований трансформатор і випрямляч струму з ШІМ (чотириквadrантний перетворювач). Змінна напруга контактної мережі знижується до необхідного рівня вхідним перетворювачем і випрямляється для живлення інвертора напруги. Далі напруга постійного струму перетворюється в змінну трифазну, регульовану за амплітудою та частотою, що потрібно для плавного регулювання сили тяги (гальмування) асинхронних двигунів. Напрямок руху ЕРС змінюють за рахунок зміни порядку чергування фаз на виході трифазного інвертора без перемикань

контакторів у силовій схемі. Перехід у режим електричного гальмування також відбувається без перемикачів у силовій схемі переведенням інвертора напруги в режим випрямляча.

Найпоширеніша схема трифазного мостового інвертора напруги утворюється простим об'єднанням за загальним джерелом напруги живлення трьох напівмостових однофазних інверторів. Спрощена схема його наведена у складі силовій схемі перетворювального блока (рисунок 2.1). Силовий перетворювальний блок призначений для використання на ЕРС змінного струму і містить [3, 5] випрямляч струму (В) із ШІМ, регулятор гальмового реостата (РГ) і трифазний інвертор напруги (ТІН). Трансформатор *TV* не входить до складу перетворювального блока, він може бути використаний для одного або декількох блоків однієї секції електровоза або моторного вагона електропоїзда змінного струму.

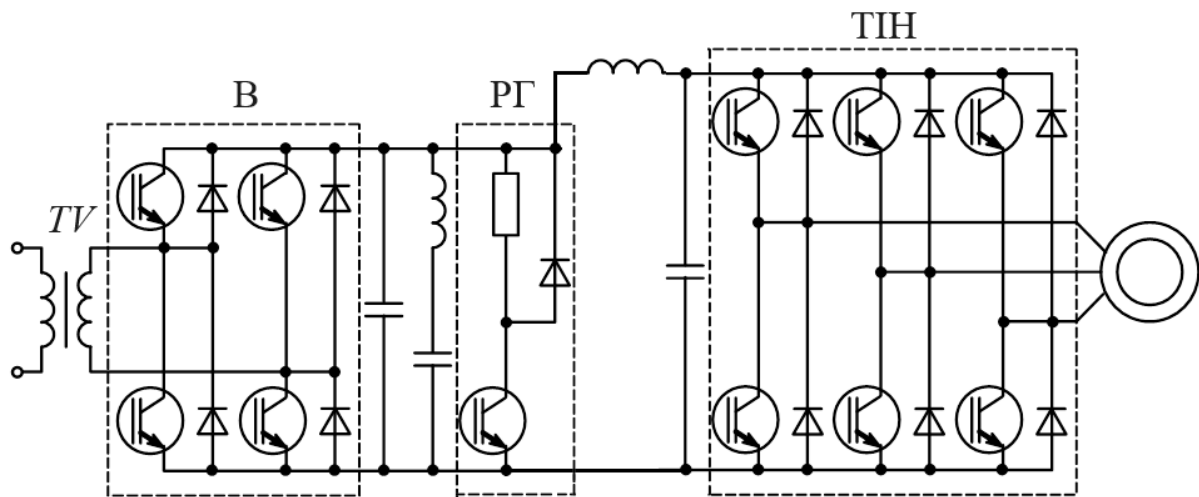


Рисунок 2.1 – Схема перетворювального блока ЕРС змінного струму

2.2 Розрахунок основних параметрів трифазного мостового інвертора напруги

Проектуючи складені перетворювачі, отримані шляхом поєднання декількох простих, розрахунок виконують для кожного з них окремо, починаючи з останнього. Такий порядок розрахунку пов'язаний із тим, що основні дані відомі або задані спочатку лише для навантаження – для асинхронних тягових двигунів. Тому ці дані стають вихідними для розрахунку трифазного мостового інвертора. Отримані результати розрахунку інвертора стають вихідними для наступних розрахунків вхідного перетворювача.

Номінальне діюче значення першої гармоніки вихідної напруги фази мостового інвертора напруги [3, 5]

$$U_{\text{в1}} = \frac{U_{d\text{н}}}{2\sqrt{2}} \eta_{\text{ін}} K_{\text{м}}, \quad (2.1)$$

де $U_{d\text{н}}$ – номінальна напруга живлення інвертора;

$\eta_{\text{ін}}$ – номінальний коефіцієнт корисної дії інвертора, приймаємо середнє значення для таких інверторів $\eta_{\text{ін}} = 0,985$;

$K_{\text{м}}$ – коефіцієнт перемодуляції, який дорівнює 1,15, якщо перемодуляцію використовують, і 1, якщо ні.

Користуючись рівнянням (2.1), здобувачі повинні визначити номінальну напругу джерела живлення постійного струму для трифазного інвертора напруги $U_{d\text{ном}}$.

Діюче значення першої гармоніки вихідного струму фази

$$I_{\text{в1}} = \frac{P_{\text{н}}}{3U_{\text{в1}} \cdot \cos\phi_{\text{в1}}}, \quad (2.2)$$

де $\cos\phi_{B1}$ – коефіцієнт потужності навантаження в номінальному режимі;

P_H – номінальна активна потужність навантаження перетворювача.

Оскільки в нашому випадку передбачено один перетворювач для живлення m асинхронних тягових двигунів, то для нього номінальна активна потужність навантаження буде визначена як добуток номінальної потужності двигуна $P_{дн}$ на m .

Номінальний середній вхідний струм перетворювача [3, 5]

$$I_{дн} = \frac{3K_M}{2\sqrt{2}} I_{B1} \cdot \cos\phi_{B1}. \quad (2.3)$$

Номінальний середній струм транзистора і діода двоквadrантних ключів трифазного інвертора напруги

$$I_V = I_D = \frac{I_{B1}}{\sqrt{2}\pi} + \frac{I_{дн}}{6}. \quad (2.4)$$

Амплітудний струм ключа в номінальному режимі

$$I_{Vmax} = I_{Dmax} = \sqrt{2} I_{B1}. \quad (2.5)$$

Амплітуда напруги U_{max} і комутована напруга U_k ключа дорівнює максимальній напрузі живлення інвертора. Середній комутований струм ключа, який діє як з увімкненням, так і вимиканням, визначаємо за рівнянням

$$I_k = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_{B1}. \quad (2.6)$$

Для визначення частоти ШІМ трифазного інвертора напруги потрібно спочатку розрахувати відносне значення гармоніки вихідної напруги з частотною ШІМ [3, 5]:

$$U_{\text{вн}}^* = \frac{\sqrt{2}S_{\text{ш}}}{K_{\text{м}}}, \quad (2.7)$$

де $S_{\text{ш}}$ – гармоніка з частотою ШІМ в комутаційній функції, яка для трифазного мостового інвертора дорівнює 0,312.

Для якісного формування вихідної напруги потрібна частота ШІМ (частота перемикачів транзисторних ключів) трифазного інвертора напруги не нижче значення, розрахованого за рівнянням [3, 5]

$$f_{\text{п}} = \frac{U_{\text{вн}}^* f_0}{x^* I_{\text{вн}}^*}, \quad (2.8)$$

де x^* – відносне значення індуктивного опору розсіювання асинхронного тягового двигуна (0,2÷0,3);

$I_{\text{вн}}^*$ – відносне значення гармоніки вихідного струму з частотою ШІМ, допустиме значення якої складає 0,07÷0,15;

f_0 – номінальна частота першої гармоніки вихідної напруги інвертора.

Вибираємо типи напівпровідникових приладів, які слід застосувати в силових ключах трифазного інвертора напруги, і виконуємо їхній тепловий розрахунок. При цьому слід використовувати раніше наведені рекомендації щодо раціонального вибору приладів [7] і можливого паралельного або послідовного їх з'єднання.

Визначаємо змінну (пульсаційну) складову вхідного струму інвертора з частотою ШІМ:

$$I_{dш} = S_{ш} \frac{I_{dн}}{\cos\phi_{в1}}. \quad (2.9)$$

Значення струму $I_{dш}$ використовують для розрахунку вхідного фільтра інвертора.

2.3 Розрахунок чотириквADRантного перетворювача

Як вхідний перетворювач ЕРС змінного струму використовують випрямляч струму з ШІМ. Необхідно спочатку розглянути і описати роботу вхідного перетворювача та особливості його застосування в складі перетворювального блока ЕРС.

Розглянемо методику розрахунку випрямляча струму з ШІМ, що має ще назву чотириквADRантний перетворювач, схему якого показано в складі конструктивного блока ЕРС змінного струму (рисунок 1.1). Він працює як випрямляч у режимі тяги або як інвертор для рекуперативного гальмування ЕРС. Крім основних функцій, чотириквADRантний перетворювач покращує форму вхідного струму, наближаючи її до синусоїдальної, і ліквідує зсув між вхідними струмом і напругою. У такий спосіб підвищується коефіцієнт потужності енергії, що споживає силова схема, або повертається до тягової мережі змінного струму. Для виконання сучасних норм МЕК коефіцієнт потужності вхідного перетворювача λ має досягати рівня не нижче 0,98.

Визначаємо діюче значення першої гармоніки вхідної напруги, яка має бути подана із вторинної обмотки тягового трансформатора, щоб забезпечити необхідне значення напруги в проміжній ланці постійного струму:

$$U_{вх1} = \frac{C_p}{\sqrt{2}\eta_{п}} U_{dн}, \quad (2.10)$$

де C_p – глибина регулювання;

η_{Π} – коефіцієнт корисної дії чотириквADRантного перетворювача, приймаємо $\eta_{\Pi} = 0,99$.

За рівнянням (2.10) розраховуємо максимальне значення першої гармоніки, яке визначають за максимальної глибини регулювання $C_{pm} = 0,9$ і максимального значення напруги живлення.

Постійна складова номінального вихідного струму

$$I_{dH} = \frac{P_{dH}}{U_{dH}}, \quad (2.11)$$

де P_{dH} – номінальна активна вихідна потужність вхідного перетворювача, яка співпадає з активною потужністю навантаження з урахуванням втрат у вихідному перетворювачі – трифазному інверторі напруги,

$$P_{dH} = \frac{P_H}{\eta_{iH}}. \quad (2.12)$$

Найбільше значення першої гармоніки вхідного струму

$$I_{вх1} = \frac{P_{dH}}{U_{вх1}} k_u, \quad (2.13)$$

де коефіцієнт

$$k_u = \frac{U_{кмmax}}{U_{кмmin}}, \quad (2.14)$$

де $U_{кмmax}$ і $U_{кмmin}$ - найбільше і найменше значення напруги контактної мережі.

Номінальний середній струм транзистора і діода силового ключа чотириквadrантного перетворювача [3, 5]

$$I_V = I_D = \frac{I_{\text{вх1}}}{\sqrt{2\pi}} + \frac{I_{\text{дн}}}{4}. \quad (2.15)$$

Амплітудний струм силового ключа чотириквadrантного перетворювача

$$I_{V\text{max}} = I_{D\text{max}} = \sqrt{2}I_{\text{вх1}}. \quad (2.16)$$

Амплітуда напруги U_{max} і комутована напруга U_k ключа дорівнює максимальній вихідній напрузі U_d . Середній комутований струм ключа, який діє як з увімкненням, так і вимиканням за номінального струму,

$$I_k = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_{\text{дн}}. \quad (2.17)$$

Гармоніка напруги з частотою ШІМ у вхідній напрузі $u_{\text{вх}}$ чотириквadrантного перетворювача

$$U_\Gamma = \sqrt{2}S_{\text{ш}} U_{\text{вх1}}. \quad (2.18)$$

Допустима відносна величина неактивних складових вхідного струму (відносно значення струму гармонік підвищеної частоти)

$$I_\Gamma^* = \sqrt{1 - \lambda^2}, \quad (2.19)$$

де $\lambda = 0,98$ – рекомендоване значення коефіцієнта потужності навантаження мережі живлення змінного струму.

$$I_{\Gamma} = I_{\Gamma}^* \cdot I_{\text{вх1}}. \quad (2.20)$$

Необхідна величина опору вхідного індуктивного фільтра

$$X = 2\pi f_{\Pi} L = \frac{U_{\Gamma}}{I_{\Gamma}}. \quad (2.21)$$

Доцільно використовувати як вхідний фільтр індуктивність розсіювання обмоток тягового трансформатора L_s , бо частота ШІМ (частота перемикачів) досить висока. За такої умови [3, 5]

$$L_s = \frac{U_{\text{вх1}}}{I_{\text{вх1}}} \frac{x_s^*}{2\pi f_M}, \quad (2.22)$$

де f_M – частота напруги мережі живлення (50 Гц);

$x_s^* = 0,1$ – відносний індуктивний опір розсіювання обмоток тягового трансформатора.

Отже, застосувавши рівняння (2.21), визначаємо мінімально необхідну частоту ШІМ:

$$f_{\Pi} = \frac{X}{2\pi L_s}. \quad (2.23)$$

Амплітуда вихідного струму другої гармоніки (гармоніки з подвоєною частотою мережі) дорівнює постійній складовій $I_{d2m} = I_d$.

Задаючись допустимим коефіцієнтом пульсації напруги k_{nu} на конденсаторі C_{dp} в межах $0,2 \div 0,3$, визначаємо величини ємності та індуктивності вихідного резонансного фільтра, який прийнято ще називати режекторним [3, 5]:

$$C_{dp} = \frac{I_{d2m}}{2\pi f_2 k_{nu} U_d}, \quad (2.24)$$

де $f_2 = 100$ Гц – частота другої гармоніки напруги мережі.

$$L_{dp} = \frac{1}{(2\pi f_2)^2 C_{dp}}. \quad (2.25)$$

За розрахованими параметрами чотириквADRантного перетворювача вибираємо силові напівпровідникові прилади, які використовуватимемо в схемі, і виконуємо їхній тепловий розрахунок. При цьому доцільно застосовувати, якщо це можливо, такі самі силові прилади, як і у трифазному інверторі напруги, що сприятиме уніфікації і здешевленню перетворювального обладнання ЕРС.

Список літератури

1 Шавьолкін О. О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: навч. посіб. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. 403 с.

2 Методичні вказівки до проведення практичних занять з дисципліни «Електроніка і мікросхемотехніка» (розділ випрямлячі) / В. І. Сенько, К. К. Победаш, В. А. Святненко та ін. Київ: ФЕА НТУУ «КПІ», 2015. 62 с.

3 Статичні перетворювачі тягового рухомого складу: навч. посіб. / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, О. І. Семененко, М. В. Хворост. Харків: НТУ «ХПІ», 2007. 192 с.

4 Перетворювальна техніка: підручник/ Ю. П. Гончаров, О. В. Будьонний, В. Т. Морозов та ін.; за ред. В. С. Руденка. Харків: Фоліо, 2000. Ч. 2. 360 с.

5 Семененко О. І., Семененко Ю. О. Методичні вказівки до курсової роботи з дисципліни «Тягові статичні перетворювачі» на тему «Модернізація тягового електропривода ЕРС з асинхронними двигунами». Харків: УкрДУЗТ, 2017. 24 с.

6 Семененко О. І., Ісакова Т. В., Аветісов Є. А. Трифазний ШПД для пункту підвищення напруги 10/3,3 кВ. *Зб. наукових праць*. Харків: УкрДАЗТ, 2011. Вип. 126. С. 204-208.

7 Сімметрон Україна. URL: <https://symmetron.ua/mitsubishi-electric>.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Вихідні дані для виконання завдань

Розрахунок трифазного випрямляча										
Остання цифра навчального шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Схема випрямляча	ЗР	М	ДП	М	ЗР	М	ДП	ЗР	М	ДП
Номинальна вихідна потужність, кВт	7000	9200	10000	8500	6300	10500	8000	7400	6800	9000
Передостання цифра навчального шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Лінійна напруга мережі, кВ	6	6	10	10	10	6	10	6	6	10
Номинальна випрямлена напруга, кВ	1,1	1,65	3,3	3,3	1,1	1,65	3,3	1,1	1,65	3,3
Розрахунок широтно-імпульсного перетворювача										
Остання цифра навчального шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальна вихідна потужність, кВт	7500	8000	7400	6800	9000	7000	9200	6000	8500	6300
Передостання цифра навчального шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальна вихідна напруга, кВ	1,65	3,3	1,1	1,65	3,3	1,1	1,65	3,3	1,1	3,3
Коефіцієнт пульсацій вихідної напруги	0,003	0,002	0,004	0,004	0,003	0,004	0,003	0,002	0,004	0,003
Розрахунок тягового перетворювального блока										
Остання цифра навчального шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальна потужність двигуна, кВт	740	220	235	820	650	200	780	540	250	800
Кількість двигунів на один тяговий перетворювач	2	4	4	2	3	4	2	3	4	2
Передостання цифра навчального шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальна фазна напруга двигуна, В	820	820	720	780	840	730	800	765	815	750

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

для виконання практичних завдань із дисципліни

*«ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В СИСТЕМАХ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ»*

Відповідальний за випуск Семененко О. І.

Редактор Ібрагімова Н. В.

Підписано до друку 11.11.2024 р.

Умовн. друк. арк. 2,5. Тираж . Замовлення № .

Видавець та виготовлювач Український державний університет
залізничного транспорту,

61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха,7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.