

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

В. С. Блінцов, Д. О. Жук, О. К. Жук

**РОЗРАХУНОК ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА
ДЛЯ УПРАВЛІННЯ СУДНОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

*Рекомендовано Методичною радою НУК
як навчальний посібник*

Миколаїв 2005

УДК 621.314: 629.503-83
ББК 31.291(075.8)
Б-68

*Рекомендовано Методичною радою НУК
як навчальний посібник*

Рецензент докт. техн. наук, професор Г.В. Павлов

Блінцов В.С., Жук Д.О., Жук О.К.

Б-68 Розрахунок тиристорного перетворювача для управління судновим електроприводом постійного струму: Навчальний посібник. – Миколаїв: НУК, 2005. – 32 с.

Подано методику розрахунку тиристорних перетворювачів, наведено порядок вибору необхідної схеми перетворювача, розрахунку її параметрів та характеристик. Стисло розглянуто функціонування систем з тиристорними перетворювачами, схеми для управління судновим електроприводом постійного струму, режими їх роботи та особливості використання.

Посібник призначений для студентів спеціальності "Електронні системи" при вивченні дисципліни "Енергетична електроніка", а також рекомендується для використання студентами інших спеціальностей ІАЕ.

УДК 621.314: 629.503–83
ББК 31.291(075.8)

© Блінцов В.С., Жук Д.О., Жук О.К., 2005
© Видавництво НУК, 2005

I. РОЗРАХУНОК ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Мета розрахунку перетворювача – визначення параметрів його елементів: трансформатора, тиристорів, згладжуючого дроселя, вузлів системи управління, а також визначення зовнішніх характеристик перетворювача та швидкісних і механічних характеристик електродвигуна. Для суднових умов важливі розрахунки гармонік споживаного струму, визначення ступеню викривлення синусоїдальності напруги мережі під впливом напівпровідникових перетворювачів. Результати розрахунку становлять основу для розробки конструкції перетворювального агрегату.

У завданні до розрахунку наводяться наступні вихідні дані: номінальна напруга $U_{1л}$ та частота мережі f , номінальні значення потужності $P_{дном}$, напруги $U_{дном}$, частоти обертання електродвигуна $n_{ном}$, діапазон регулювання частоти обертання, співвідношення потужностей електроприводу та суднової електростанції.

Розрахунок перетворювача доцільно виконувати у наведеній послідовності.

1.1. Вибір схеми перетворювача

Найважливішими показниками, які визначають доцільність використання тієї чи іншої схеми, є середнє значення випрямленої напруги, типова потужність трансформатора, ступінь використання венти́лів за струмом та напругою, значення пульсацій випрямленої напруги та гармонік споживаного струму.

Середнє значення випрямленої напруги при холостому некеро́ваному режимі визначається співвідношеннями:

у схемах з нульовим виводом

$$U_{d0} = \sqrt{2} \frac{m}{\pi} E_{2\phi} \sin \frac{\pi}{m};$$

у мостових схемах

$$U_{d0} = \sqrt{2} \frac{m}{\pi} E_{2\pi} \sin \frac{\pi}{m},$$

де $E_{2\phi}$ та $E_{2\pi}$ – діючі значення вторинної фазної та лінійної ЕРС трансформатора відповідно; m – фазність схеми випрямлення.

Схеми, які працюють у шестифазному режимі, вже мають достатню ефективність, отже, подальше підвищення фазності з метою підвищення середнього значення випрямленої напруги недоцільне.

Трансформатори для перетворювальних агрегатів вибирають більшої потужності, ніж трансформатори, які працюють на лінійне навантаження. Дане завищення потужності обумовлюється тим, що струм в обмотках трансформаторів перетворювачів має несинусоїдальну форму, а також присутністю постійного чи змінного підмагнічування його магнітопроводу в трифазних схемах з нульовим виводом. Завищена потужність трансформатора перетворювача, визначена з урахуванням вказаних особливостей, має назву типової (або розрахункової). Ступінь завищення потужності характеризується коефіцієнтом використання трансформатора, в ідеалізованому режимі

$$k_{в.т} = \frac{P_d}{S_T},$$

де S_T – типова потужність трансформатора; $P_d = U_d I_d$ – потужність, що віддається перетворювачем до навантаження; U_d , I_d – середні значення випрямленої напруги та струму.

Вентилі в схемі випрямлення проводять струм протягом півперіоду або частини півперіоду, внаслідок чого амплітуда струму вентиля може суттєво перевищувати середнє значення, за яким звичайно вибираються вентиля. При ідеально згладженому випрямленому струмі амплітуда струму вентиля дорівнює його середньому значенню.

Таким чином, ступінь використання вентилів по струму можливо характеризувати співвідношенням

$$k_{I.B} = \frac{I_B}{I_d}$$

де I_B – середнє значення струму вентиля.

Максимальнє значення зворотної напруги на венти́лі зумовлює потрібний клас вентиля. Параметром, що характеризує використання венти́лів за напругою, є відношення максимального значення зворотної напруги до номінального значення випрямленої напруги:

$$k_{U0} = \frac{U_{зв.маx}}{U_{dном}}$$

Суттєвою перевагою схеми є мале значення даного параметру.

Крім постійної складової, випрямлена напруга має змінну складову, порядок гармонік випрямленої напруги

$$v = km,$$

де $k = 1; 2; 3; \dots$

Перетворювачі споживають несинусоїдальний струм, що має особливе значення для суднових умов, оскільки потужність перетворювальних пристроїв часто сумірна з потужністю електростанції. Порядок гармонік у споживаному перетворювачем струмі

$$v = km \pm 1. \quad (1)$$

Для суднових електроприводів доцільний вибір трифазної мостової схеми ($m = 6$), яка має такі якісні показники: високе середнє значення випрямленої напруги ($U_{d0} = \frac{3}{\pi} E_{2л max}$, де $E_{2л max}$ – амплітуда вторинної лінійної ЕРС трансформаторів), високий ступінь використання трансформатора та венти́лів ($k_{B.T} = 0,95$; $k_{I.B} = 0,33$; $k_{U0} = 1,05$), відносно мала пульсація випрямленої напруги ($v = 6; 12; 18; \dots$). Схему перетворювача наведено на рис. 1.

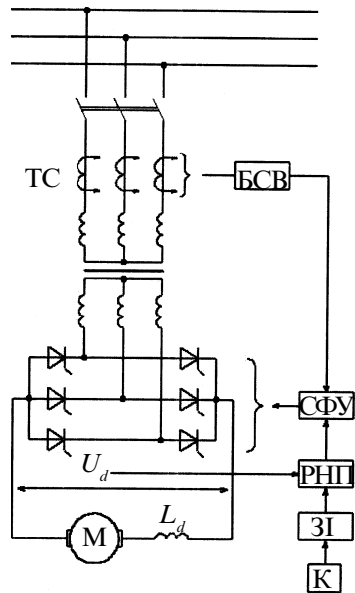


Рис. 1

Головний вузол системи управління – система фазового управління тиристорами СФУ. Напруга управління надходить на СФУ з регулятора напруги перетворювача РНП, задавальна напруга подається на вхід РНП від датчика інтенсивності ЗІ відповідно до положення командоапарата К. Для забезпечення необхідної жорсткості механічних характеристик двигуна на вхід РНП подається сигнал зворотного зв'язку за напругою перетворювача. Блок струмової відсічки БСВ служить для обмеження випрямленого струму при пусках та гальмуваннях двигуна. Він спрацьовує відповідно до значення сигналу з трансформатора струму ТС. Перетворювач може працювати як в режимі випрямляча (підймання вантажу), так і в режимі інвертора (опускання вантажу).

1.2. Розрахунок трансформатора

Порядок розрахунку перетворювального трансформатора принципово не відрізняється від розрахунку силових трансформаторів загального призначення. Крім того, більшість головних вимог до перетворювальних трансформаторів практично співпадають з вимогами до силових трансформаторів загального призначення. Однак відмінності у процесах, які характеризуються насамперед тим, що в обмотках перетворювального трансформатора протікають несинусоїдальні струми, зумовлюють ряд особливостей розрахунку.

При розрахунку перетворювального трансформатора, як і силового трансформатора загального призначення, спочатку визначають його потужність, напруги та струми обмоток. Через те, що номінальна потужність навантаження $P_{dном}$ (потужність двигуна) задається, розрахункову потужність трансформатора визначають із співвідношення

$$S_T = \frac{k_3 P_{dном}}{\eta k_{в,т} \chi} \quad (2)$$

де η – коефіцієнт корисної дії (ККД), $\eta = 80...90\%$; k_3 – коефіцієнт запасу, що враховує можливість роботи електропривода з перевантаженнями (1,0...1,3).

При розрахунку трансформатора необхідно враховувати, що у номінальному режимі тиристорні перетворювачі в електропри-

воді працюють при куті управління $\alpha_{\text{НОМ}} = 30...40^\circ$. Наявність кутів α приводить до споживання реактивної потужності та відповідного завищення розрахункової потужності трансформатора. Цей фактор враховує коефіцієнт потужності χ , який для трифазної мостової схеми може бути визначений як

$$\chi \approx \cos\left(\alpha_{\text{НОМ}} + \frac{\gamma_{\text{НОМ}}}{2}\right), \quad (3)$$

де $\gamma_{\text{НОМ}}$ – кут комутації в номінальному режимі.

У тиристорних перетворювачів суднових електроприводів при $\alpha = 30...40^\circ$ кут γ дорівнює $3...10^\circ$, отже, $\chi \approx 0,75...0,85$.

Для тиристорних перетворювачів суднових електроприводів характерне співвідношення $S_T = (1,4...1,8)P_{\text{ОНОМ}}$.

Визначення напруг вторинних обмоток трансформатора можливо виконати на базі рівняння для зовнішньої характеристики перетворювача. Для трансформаторів потужністю $S_T \leq 30$ кВА

$$E_{2\phi} = \frac{\pi U_{d\text{НОМ}} + 3(x_a + \sqrt{2}z_a \cos \alpha_{\text{НОМ}})I_{d\text{НОМ}} + 2\pi \Delta U_B}{3\sqrt{6} \cos \alpha_{\text{НОМ}}},$$

де x_a – анодний індуктивний опір (індуктивний опір розсіяння фази трансформатора, приведений до вторинної обмотки); z_a – опір трансформатора та системи живлення, приведений до вторинної обмотки; ΔU_B – спад напруги на вентилях.

Для трансформаторів потужністю $S_T \geq 30$ кВА нехтують активним опором обмоток трансформатора, і тоді зовнішня характеристика перетворювача, виконаного за трифазною мостовою схемою,

$$U_d = \frac{3}{\pi} (\sqrt{6} E_{2\phi} \cos \alpha - x_a I_d). \quad (4)$$

Отже,

$$E_{2\phi} = \frac{\pi U_{d\text{НОМ}} + 3x_a I_{d\text{НОМ}}}{3\sqrt{6} \cos \alpha_{\text{НОМ}}}. \quad (5)$$

Опір

$$x_a = \frac{u_{\text{к.з}}^*}{100} \frac{E_{2\phi}}{I_{T2}}, \quad (6)$$

де $u_{к.3}^*$ – напруга короткого замкнення, виміряна на вторинному боці (3...7 %); $I_{т2}$ – діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора,

$$I_{т2} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{dНОМ}. \quad (7)$$

За допомогою співвідношень (6), (7) з (5) отримуємо

$$E_{2ф} = \frac{\pi U_{dНОМ}}{3\sqrt{3}(\sqrt{2} - \sqrt{3}u_{к.3}^* \cdot 10^{-2}) \cos \alpha_{НОМ}}. \quad (8)$$

Має сенс виконати перевірку правильності розрахунку напруги $E_{2ф}$ виходячи з того, що середнє значення випрямленої напруги при холостому некерованому режимі $U_{d0} \approx 1,1 U_{dНОМ}$; отже,

$$E_{2ф} \geq \frac{1,1\pi U_{dНОМ}}{3\sqrt{6}}. \quad (9)$$

Діюче значення струму первинної обмотки трансформатора

$$I_{т1} = \frac{1}{k_T} \sqrt{\frac{2}{3}} I_{dНОМ}, \quad (10)$$

де $k_T = \frac{E_{1л}}{U_{2л}}$ – коефіцієнт трансформації трансформатора; $U_{2л}$ – лінійна напруга в мережі.

Розрахувавши значення S_T , $E_{2ф}$, $I_{т1}$, $I_{т2}$, з каталогу вибирають трансформатор. Якщо в каталозі трансформатор з належними параметрами відсутній, необхідно виконати його подальший конструкторський розрахунок.

1.3. Вибір тиристорів

Тиристори вибираються згідно з двома основними параметрами – номінальним (прямим) струмом та номінальною (зворотною) напругою.

Номінальний струм тиристора

$$I_B = \frac{I_{dНОМ}}{3}.$$

Враховуючи коефіцієнт запасу за струмом $k_{I_3} = 1,3 \dots 1,5$, отримаємо

$$I_B = \frac{k_{I_3} I_{d\text{ном}}}{3} \quad (11)$$

Для вибору тиристорів за напругою необхідно визначити максимальне значення зворотної напруги на ньому. У трифазній мостовій схемі $U_{зв\text{ max}} = \sqrt{6} E_{2\phi}$. Клас тиристора визначається відношенням $\frac{U_{зв\text{ max}}}{100}$. Дані параметри наводяться у маркуванні тиристорів, наприклад: ТЛ-100-6 (тиристор лавинний шостого класу, $I_B = 100 \text{ A}$).

Найважливішими паспортними параметрами тиристорів є також час увімкнення та вимкнення, припустимі швидкості зростання анодного струму та прямої напруги.

1.4. Розрахунок зовнішніх характеристик перетворювача

Зовнішні характеристики перетворювача в електроприводі мають дві області: безперервного та переривчастого струмів (рис. 2).

У режимі безперервного струму характеристики лінійні (область 2), вони можуть бути розраховані за формулою (4). В області переривчастого струму (область 1) характеристики нелінійні, робота привода в цій області не допускається, характеристики, як правило, не розраховуються, визначається тільки межа між областями переривчастого та безперервного струмів, коли випрямлений струм наприкінці періоду повторення знижується до нуля, але інтервали нульового струму відсутні. Значення напруги та струму в даному режимі визначаються співвідношеннями

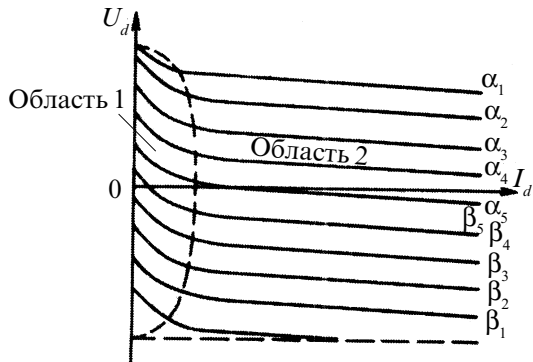


Рис. 2

Значення напруги та струму в даному режимі визначаються співвідношеннями

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha; \quad (12)$$

$$I_d = \frac{U_{d0} \sin \alpha}{\omega_0 (L_a + L_d)} \left(1 - \frac{\pi}{m} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m} \right), \quad (13)$$

де $L_a = x_a / \omega_0$ – анодна індуктивність, приведена до вторинної обмотки трансформатора; L_d – індуктивність кола випрямленого струму, що складається з індуктивності якірної обмотки двигуна $L_{я}$ та індуктивності згладжуючого дроселя $L_{др}$; $L_d = L_{я} + L_{др}$, $\omega_0 = 2\pi f$ – кутова частота мережі.

Таким чином, межові точки зовнішніх характеристик перетворювача знаходяться на дузі еліпса (пунктирна крива на рис. 2).

На практиці роботу перетворювача в зоні переривчастих струмів виключають увімкненням згладжуючого дроселя $L_{др}$. При розрахунку зовнішніх характеристик спочатку треба визначити межовий режим щодо випадку, коли згладжуючий дросель відсутній і зона переривчастого струму обмежується тільки індуктивністю обмотки якоря двигуна

$$L_{я} = \frac{k_d U_{ном}}{p_{п} \omega_{ном} I_{дном}}, \quad (14)$$

де $p_{п}$ – кількість пар полюсів; $U_{ном}$, $I_{дном}$, $\omega_{ном}$ – номінальні значення напруги, струму та частоти обертання двигуна; k_d – коефіцієнт, рівний 0,6 для некомпенсованих і 0,25 для компенсованих машин.

Далі слід визначити ширину зони переривчастого струму, в якій робота електропривода має бути виключена, розрахувати значення індуктивності L_d та побудувати еліпс з урахуванням цієї індуктивності. Якщо припустити, що найменше допустиме значення випрямленого струму на межовій кривій при $\alpha = 90^\circ$ становить $I_{d\min} = 0,1 I_{дном}$, то, з (21),

$$L_d \geq \frac{U_{d0} \left(1 - \frac{\pi}{m} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m} \right)}{0,1 I_{дном} \omega} - L_a. \quad (15)$$

У деяких випадках обмеження зони переривчастих струмів досягається індуктивністю $L_{я}$.

1.5. Розрахунок швидкісних та механічних характеристик електродвигуна

Швидкісні характеристики двигуна розраховуються за формулою

$$\omega = \frac{U_d - R_{\text{я}} I_{d_{\text{НОМ}}}}{c\Phi}, \quad (16)$$

де ω – кутова частота обертання двигуна; Φ – магнітний потік полюсів; $R_{\text{я}}$ – опір обмотки якоря (наводиться у каталогах); c – конструктивний коефіцієнт.

Величина $c\Phi$ визначається з номінального режиму:

$$c\Phi = \frac{U_{\text{НОМ}} - R_{\text{я}} I_{d_{\text{НОМ}}}}{\omega_{\text{НОМ}}}.$$

Номінальне значення напруги $U_{\text{НОМ}}$, струму $I_{\text{я.НОМ}}$, частоти обертання двигуна $\omega_{\text{НОМ}}$ наведені у завданні.

Механічні характеристики двигуна розраховуються за формулою

$$\omega = \frac{U_d}{c\Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{(c\Phi)^2} M, \quad (17)$$

де $M = c\Phi I_{\text{я}}$ – електромагнітний момент двигуна.

Характеристики у першому квадранті відповідають руховому режиму (перетворювач у режимі випрямлення), у четвертому – генераторному гальмуванню (перетворювач у режимі інвертування).

1.6. Розрахунок випрямленої напруги та струму

Гармоніки випрямленої напруги визначаємо за формулою

$$U_v = \frac{2U_{d0}}{v^2 - 1} \sqrt{\cos^2 \alpha + v^2 \sin^2 \alpha}, \quad (18)$$

гармоніки випрямленого струму

$$I_v = \frac{U_v}{\left(1 - \frac{E_{\text{я}}}{U_{d0}}\right) \sqrt{R_{\text{я}}^2 + (v\omega_0(L_{\text{я}} + L_d))^2}}, \quad (19)$$

де $E_{\text{я}}$ – ЕРС якоря двигуна; $v = km$ – порядок гармонік.

Зазвичай при розрахунку згладжуючого дроселя L_d беруть до уваги головну гармоніку струму ($v = 6$), деколи – перші дві-три ($v = 6; 12; 18$).

При розрахунку згладжуючого дроселя виходять з того, що пульсація випрямленого струму має бути знижена до рівня, коли умови роботи двигуна та комутації наближаються до умов роботи його від генератора постійного струму. Ці умови виконуються, якщо найбільша (шоста) гармоніка випрямленого струму I_6 у номінальному режимі буде знижена до допустимого значення $I_{\text{бдоп}} = 0,05 \cdot I_{\text{я.ном}}$. Виходячи з цього необхідна індуктивність дроселя

$$L_d \geq \sqrt{\left(\frac{U_{6\text{max}}}{0,05 \cdot I_{\text{дном}}} \right)^2 - R_{\text{я}}^2 - L_{\text{я}}}, \quad (20)$$

де $U_{6\text{max}}$ – максимальне значення амплітуди шостої гармоніки випрямленої напруги, яке визначається з (19) при $\alpha = 90^\circ$.

Таким чином, в електроприводі постійного струму згладжуючий дросель виконує дві функції: обмеження зони переривчастого струму та придушення пульсацій випрямленої напруги. Цей фактор, як правило, має важливе значення, та якщо виконано зазначену умову з придушення пульсацій, то одночасно досягається й необхідне обмеження зони переривчастого струму.

1.7. Розрахунок гармонік споживаного струму

Струм, споживаний трифазним мостовим перетворювачем містить вищі гармоніки порядків $v = 6k \pm 1$. Амплітуда v -ї гармоніки струму

$$I_v = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{E_{2\phi}}{v\pi x_a} \sqrt{\left(\frac{\sin \frac{v-1}{2} \gamma}{v-1} \right)^2 + \left(\frac{\sin \frac{v+1}{2} \gamma}{v+1} \right)^2 - \frac{2}{v^2-1} \sin \frac{v-1}{2} \gamma \sin \frac{v+1}{2} \gamma \cos(2\alpha + \gamma)} \quad (21)$$

В першу чергу необхідно розрахувати гармоніки в номінальному режимі (порядків $v = 5 \dots 25$), попередньо визначивши кут комутації $\gamma_{\text{ном}}$:

$$\gamma_{\text{НОМ}} = \arccos \left(\cos \alpha - \frac{\sqrt{2} x_d I_{\text{дНОМ}}}{E_{2\text{Л}}} \right) - \alpha,$$

де $E_{2\text{Л}}$ – діюче значення лінійної ЕРС вторинних обмоток трансформатора.

Треба пам'ятати, що для перетворювачів середньої та великої потужностей, як правило, $\gamma_{\text{НОМ}} \leq 10^\circ$.

1.8. Розрахунок коефіцієнта несинусоїдальності напруги суднової мережі

Даний розрахунок виконується на базі схеми заміщення суднової електроенергетичної системи (СЕЕС) для вищих гармонік. Для складання схеми заміщення необхідна наявність принципової електричної схеми СЕЕС та параметрів її елементів. Однак наближену оцінку коефіцієнта несинусоїдальності напруги

$$k_{\text{НС}} = \frac{\sqrt{\sum_{v=5}^{25} U_v^2}}{U_{\text{дНОМ}}} 100 \% \quad (22)$$

можливо надати виходячи зі співвідношення потужностей перетворювального навантаження та суднової електростанції $k_p = P_{\text{ТП}}/P_{\text{Г}}$ (у наведеній формулі U_v – діюче значення v -ї гармоніки напруги, $U_{\text{НОМ}}$ – номінальна фазна напруга мережі).

Амплітуда v -ї гармоніки напруги у суднової мережі

$$U_v = x_{\text{Гve}} \frac{I_v}{k_{\text{Т}}},$$

де $x_{\text{Гve}}$ – еквівалентний індуктивний опір v -ї гармоніки струму синхронних генераторів.

Індуктивний опір n -ї гармоніки струму синхронного генератора

$$x_{\text{Гv}} = 0,9 v x_{\text{II}} = 0,9 \sqrt{x_d'' x_q''},$$

де $x_{\text{II}}, x_d'', x_q''$ – реактивний опір зворотної послідовності та надпе-

рехідні індуктивні опори за поздовжньою та поперечною осями (каталожні дані).

Таким чином, при n увімкнених синхронних генераторах

$$x_{Г\vee} = \frac{x_{Г\vee}}{n}.$$

Еквівалентний індуктивний опір v -ї гармоніки струму асинхронних двигунів

$$x_{дв\vee} = (0,2 \dots 0,25) \frac{3v U_{\text{лном}}^2 \cos \varphi}{P_{\text{п}}},$$

де $P_{\text{Г}}$ – потужність генератрив; $P_{\text{т.п}}$ – потужність тиристорних перетворювань; $P_{\text{п}} = P_{\text{Г}} - P_{\text{тп}} = \frac{1 - k_{\text{п}}}{k_{\text{п}}} P_{\text{тп}}$ – сумарна потужність асинхронних двигунів; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності асинхронного навантаження (приймаємо $\cos \varphi = 0,8$).

Наприкінці визначаємо коефіцієнт $k_{\text{нс}}$ за умови, що враховуються гармоніки напруги порядків $v = 5; 7; 11; 13; 17; 19; 23; 25$. Припустимо значення коефіцієнта несинусоїдальності у судових мережах $k_{\text{нс}} = 10 \%$.

1.9. Визначення коефіцієнта потужності тиристорного перетворювача

Коефіцієнт потужності при синусоїдальній напрузі мережі

$$\chi = k_I \cos \varphi_1, \quad (23)$$

де $k_I = \frac{I_1}{I} = I_1 / \sqrt{\sum_{v=1}^{25} I_v^2}$ – коефіцієнт спотворення кривої струму;

φ_1 – кут зрушення між головною гармонікою фазного струму та напругою.

У трифазній мостовій схемі коефіцієнт k_I мало відрізняється від одиниці: зі зміною кута $\gamma = 0 \dots 30^\circ$ він змінюється у вузькому діапазоні від 0,955 до 0,984, тому коефіцієнт потужності практично визначається тільки значенням $\cos \varphi_1 = \cos \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \approx \cos \alpha$.

2. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ СУДНОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Тиристорний привод постійного струму використовують, поперше, для заміни системи генератор – двигун (Г–Д), що дозволяє поліпшити ряд показників: масу, габарити, діапазон регулювання, швидкодію, ККД. Тиристорний привод у порівнянні з системою Г–Д визначається конструктивною простотою, безшумністю, миттєвою готовністю до роботи, більш високою надійністю, дозволяє зменшити використану корисну площину.

2.1. Зустрічно-паралельна та перехресна схеми реверсивних тиристорних перетворювачів

Тиристорні перетворювачі використовують для живлення силових кіл двигунів та обмоток збудження. Найбільш поширені реверсивні тиристорні системи з двогруповим перетворювачем у колі якоря, що забезпечує максимальну швидкодію. Існують різноманітні схеми увімкнення вентильних груп, але їх можливо звести до двох: зустрічно-паралельні схеми із живленням груп ТМ1 та ТМ2 від загальної вторинної обмотки силового трансформатора (рис. 3) та перехресні схеми з живленням кожної з груп ТМ1 та ТМ2 від окремої вторинної обмотки трансформатора (рис. 4).

Доки один із мостів працює у режимі випрямлення, забезпечу-

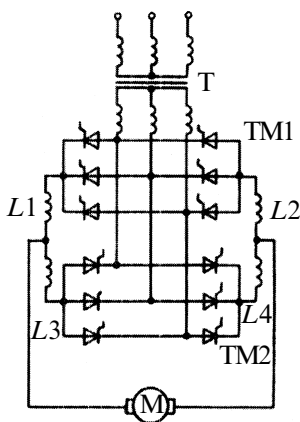


Рис. 3

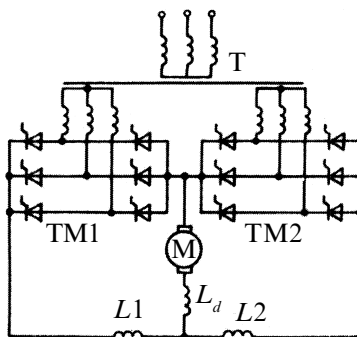


Рис. 4

ючи обертання двигуна в потрібному напрямку, інший міст знаходиться в готовності до режиму інвертування. Цим забезпечується можливість генераторного гальмування. Зі зміною напрямку обертання при реактивному статичному моменті кожний міст переходить у протилежний режим роботи; при активному – міст, який працював у режимі випрямлення, переходить до роботи у режимі інвертування.

2.2. Зовнішні характеристики реверсивних перетворювачів

На рис. 5 наведені зовнішні характеристики перетворювача, складеного з двох вентильних груп.

Роботі першої групи відповідають характеристики I та IV квадрантів, другої – II та III. При одному напрямку обертання двигуна перетворювач працює у I та II, при другому – у III та IV квадрантах. Розгін двигуна у прямому напрямку починається в точці 1 при деякому початковому куті увімкнення α та відбувається за характеристиками режиму випрямлення (I квадрант). У процесі пуску поступово зменшується кут увімкнення, при цьому швидкість його зміни така, що струм зберігає заздалегідь задане незмінне значення I_d . Такий режим досягається за допомогою уведеного в систему управління перетворювачем блоку струмової від-

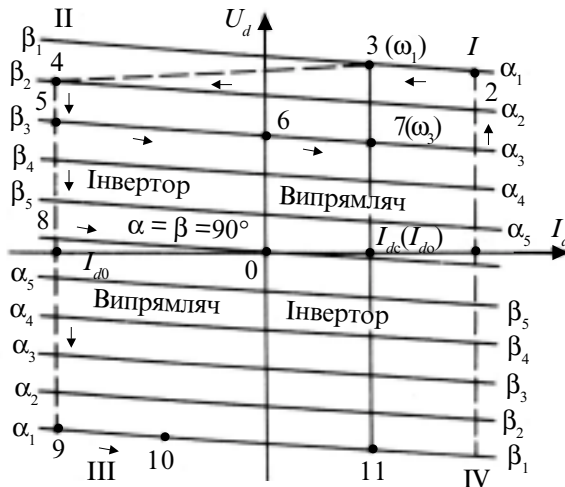


Рис. 5

січки. У точці 2 кут увімкнення α_1 знижується до необхідного значення, у точці 3 процес розгону двигуна закінчується та настає встановлений режим. Частота обертання двигуна регулюється зміною кута увімкнення. При збільшенні кута увімкнення, наприклад, від α_1 до α_3 система переходить з точки 3 (I квадрант) у точку 4 (II квадрант), а потім обернено у I квадрант (точка 7). За таких умов частота обертання двигуна знижується від ω_1 до ω_3 .

Під час роботи перетворювача у II квадранті (дільниця 5–6) відбувається рекуперативне гальмування двигуна. Якщо необхідне гальмування двигуна до повної зупинки, кут інвертування (випередження) ТМ2, зв'язаний з кутом увімкнення співвідношенням $\beta = 180^\circ - \alpha$, збільшують до значення $\beta = \alpha = 90^\circ$, тоді група запирається. Процес гальмування відповідає ділянці 4–8 (II квадрант) та протікає також при незмінному струмі, що забезпечується блоком струмової відсічки. Швидкість зміни кута β (швидкість гальмування) визначається заданим значенням струму гальмування, а також знаком та значенням моменту опору M_c . Зупиняється двигун у точці 0.

При реверсі електродвигуна кут увімкнення тиристорів другої групи зменшується до деякого значення $\alpha < 90^\circ$, ця група переходить у режим випрямлення, а двигун починає розганятися у зворотному напрямку. Новий встановлений режим настає в залежності від характеру моменту M_c у III квадранті (наприклад, точка 10) чи у IV квадранті (наприклад, точка 11).

Спільне управління вентиляними групами характеризується тим, що управляючі імпульси надходять на обидві групи. Причому для одержання на двигуні напруги певного значення та полярності відповідна група вентилів переводиться в режим випрямлення, а друга – в режим інвертування. Процеси у перетворювачі суттєво залежать від засобу узгодження регулювальних характеристик $U_d = f(\alpha)$ груп вентилів. Найбільш прийнятним є таке лінійне узгодження, коли сума кутів увімкнення обох груп вентилів складає $\alpha_I + \alpha_{II} = 180^\circ$, тобто $\alpha = \beta$. У цьому випадку при перемиканні напруга інверторної групи виявляється рівною напрузі другої групи, тому відсутній стрибок напруги перетворювача. Таке управління має назву узгодженого.

При лінійному узгодженому управлінні зі зміною управляючого сигналу фаза імпульсів, що надходять на одну групу, змен-

шується, а на другу – збільшується таким чином, що постійно виконується співвідношення $\alpha_I + \alpha_{II} = 180^\circ$. Хоч при такому управлінні середні значення напруг обох вентиляльних груп дорівнюють одна одній та протилежні за знаком при будь-яких кутах регулювання, миттєві значення виявляються різними. Як наслідок, по замкнутому контуру, утвореному вентилями обох груп та обмотками трансформатора, під дією різниці миттєвих значень напруг, минаючи кола навантаження, протікає вирівнювальний струм. У перехідних режимах виникає непогодження напруг випрямляча та інвертора, в результаті чого на деякий час з'являється динамічна складова вирівнювального струму.

Вирівнювальний струм зумовлює додаткові втрати в обмотках трансформатора, вентилях та інших елементах схеми. Для обмеження цього струму використовують вирівнювальні дроселі ($L1-L4$ на рис. 3, $L1$ та $L2$ на рис. 4), що є недоліком таких схем. Однак наявність вирівнювального струму при будь-яких режимах виключає зону переривчастих струмів; зовнішні характеристики набувають лінійного характеру (див. рис. 5), у той час як при неузгодженому управлінні вони мають злом при переході з режиму випрямлення в інверторний.

При нелінійному узгодженому управлінні $\alpha_I + \alpha_{II} > 180^\circ$ завдяки тому, що середнє значення напруги інверторної групи перевищує середнє значення напруги групи випрямляча, у реверсивному контурі виникає постійна складова напруги, яка й запирає вентилялі. Дана складова суттєво знижує статичний вирівнювальний струм, що дозволяє зменшити масу та габарити вирівнювальних дроселів. Однак динамічний вирівнювальний струм при такому узгодженні зменшується несуттєво. Цей спосіб поступається способу лінійного узгодженого управління за динамічними показниками внаслідок порушення лінійності зовнішньої та регулювальної характеристик.

При роздільному управлінні імпульси надходять тільки на ту групу вентилів, яка в даний час повинна працювати. На вентилялі іншої групи імпульси не надходять, і вона має бути у вимкненому стані. Система управління такого типу має логічний перемикаючий пристрій, який знімає (блокує) керуючі імпульси групи, що не працює.

При роздільному управлінні виключається протікання вирів-

нювальних струмів між вентиляними групами, що дозволяє уникнути використання вирівнювальних дроселів. Це призводить до зниження маси, габаритів, вартості, а також до підвищення ККД установки. Крім того, зменшується вірогідність перекидання інвертора, а саме – аварійного переходу його у режим випрямлення, внаслідок меншого часу роботи вентиляної групи у режимі інвертора в порівнянні з узгодженим управлінням.

Недолік роздільного управління – затримка при перемиканні груп – знижує динамічні якості перетворювача, а також ускладнює систему управління через необхідність використання логічного перемикаючого пристрою та датчика стану тиристорів (датчика нульового струму).

Зовнішні характеристики, наведені на рис. 5, ідеалізовані. Їх лінійний характер зберігається тільки у реверсивних перетворювачах з лінійним узгодженим управлінням. В інших випадках як в режимі випрямлення, так і в режимі інвертування зовнішні характеристики мають дві області: область безперервного та переривчастого струмів (див. рис. 2).

Для одержання потрібних статичних та динамічних характеристик у схему тиристорного електропривода включають зворотні зв'язки: за швидкістю при високих вимогах до жорсткості механічних характеристик та за напругою у системах, в яких немає високих вимог до діапазону та точності регулювання. Для обмеження струму якоря у перехідних режимах та при перевантаженнях включають зворотний зв'язок за струмом якоря з відсічкою.

У потужних електроприводах шпилів та якірних лебідок потужністю 95...190 кВт, призначених для підймання якоря з великої глибини, вантажопідйомних механізмів потужністю вище 50 кВт, буксирних лебідок потужністю до 100 кВт, тралових лебідок потужністю до 300 кВт використовують тиристорні перетворювачі типа АТРК.

2.3. Схема електропривода з тиристорним перетворювачем серії АТРК

На рис. 6 наведено схему електропривода з перетворювачем серії АТРК.

Перетворювачі цієї серії виготовляють на випрямлену напругу 230 та 460 В та струми 100, 160, 250, 500 та 1000 А. У агрега-

тах АТРК з $U_{дном} = 230$ В використовуюють силові трансформатори з $U_{дном} = 460$ В – анодні дроселі.

Управління групами роздільне та виконується системою, головний вузол якої – система фазового управління (СФУ) тиристорами. Сигнали на СФУ надходять з регулятора напруги перетворювача РНП, задавальна напруга U_3 на вхід РНП подається від задавача інтенсивності ЗІ в залежності від положення командоапарата К. Для забезпечення необхідних механічних характеристик

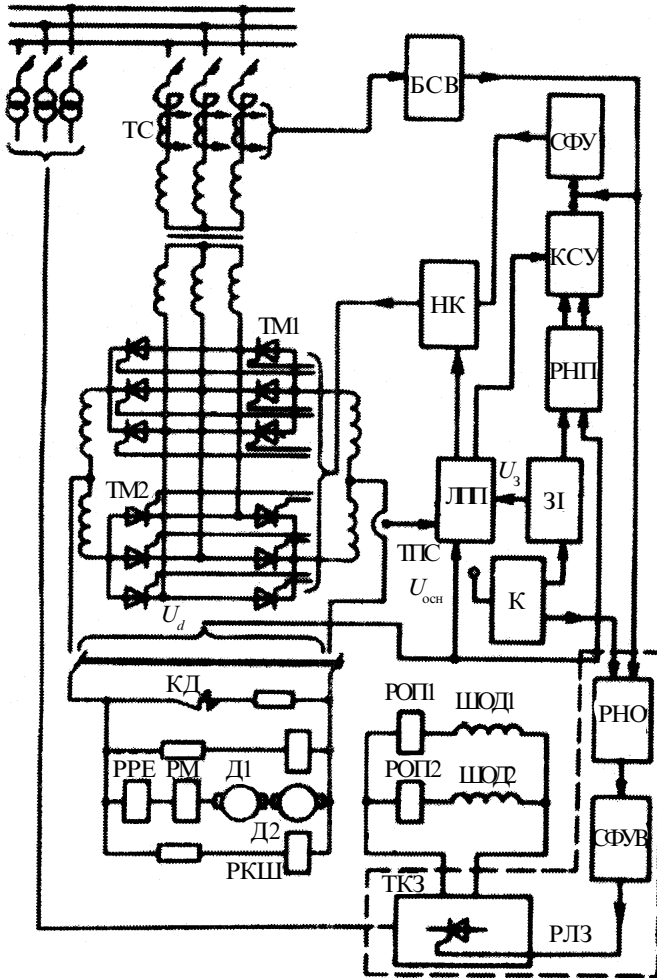


Рис. 6

тик та необхідного характеру перехідних процесів на вхід РНП надходить сигнал зворотного зв'язку по напрузі перетворювача. Блок струмової відсічки БСВ служить для обмеження випрямленого струму при пусках та гальмуваннях двигуна. БСВ спрацьовує в залежності від сигналу, що надходить від трансформатора струму ТС. Регулятор напруги РНП випрацьовує два вихідних сигнали. Вибір того чи іншого сигналу виконується комутатором сигналів управління КСУ за допомогою логічного перемикаючого пристрою ЛПП та залежить від того, яка з груп повинна працювати в даний момент. Для забезпечення вказаних перемикань на вхід ЛПП надходять два сигнали: двополярний сигнал $U_y = U_3 - U_{3.3.H}$ та сигнал зворотного зв'язку за струмом $U_{3.3.C}$. Сигнал зворотного зв'язку за напругою $U_{3.3.H}$ пропорційний випрямленій напрузі. Сигнал $U_{3.3.C}$ знімається з датчика струму, яким служить трансформатор постійного струму ТПС.

В усталеному режимі ЛПП перебуває в одному з двох стійких станів. У першому стійкому стані двигун обертається в прямому напрямку. При зміні напрямку обертання двигуна чи при генераторному гальмуванні полярність сигналу U_y змінюється на протилежну. Однак ця зміна ще не викликає перемикання ЛПП у другий стійкий стан та відповідне перемикання груп перетворювача, тому що датчик нульового струму ДНС надає сигнал заборони на виконання цих операцій. ДНС знімає заборону на перемикання тільки при зниженні струму якоря до нуля. Як тільки заборону на перемикання буде знято, ЛПП перейде в інший стійкий стан та за допомогою напівпровідникового комутатора імпульсів НК групи перетворювача перемкнуться.

Порядок виходу з роботи однієї групи та вступ у роботу іншої можливо відстежити згідно з характеристиками (див. рис. 5) при переході з точки 5 в точку 7.

В точці 3 група ТМ1 (див. рис. 5) працює у режимі випрямлення, група ТМ2 вимкнена. При збільшенні кута управління тиристорами α_1 у ТМ1 ЕРС якоря двигуна перевищить напругу на його виході, внаслідок чого випрямлений струм спаде до нуля. Міст ТМ1 вимикається, а двигун працює на "вибігу" до наступу інверторного режиму. У момент, коли струм досягне нуля, ЛПП заблокує керуючі імпульси, які надходять у ТМ1, та після деякої паузи дозволить надходження імпульсів на тиристори ТМ2. Затримка звичайно не перевищує 5...10 мс. Доки в одній з груп протікає

струм, ЛПП забороняє їх перемикання, навіть коли керуючий сигнал на вході перетворювача змінює свій знак. Після надходження імпульсів у ТМ2 останній починає працювати в інверторному режимі. При зворотному переході перетворювача у режим випрямляча (I квадрант) процеси в ньому протікають аналогічно, але у зворотній послідовності.

Схема за розглянутих вище умов працює при постійному знаку керуючого сигналу, при реверсі знак цього сигналу змінюється.

Перетворювачі серії АТРК всіх виконань (див. рис.6) мають вбудоване регульоване джерело збудження РДЗ. У пристрої збудження РДЗ, який являє собою однофазний випрямний міст, передбачено можливість регулювання струму збудження двигуна в залежності від значення струму в якірному колі у напрямку ослаблення поля. Крім цього, пристрій збудження дозволяє підсилити поле збудження приблизно в 1,5 разу.

У схему тиристорного електропривода також включені реле максимальне РМ, реле рекуперованої енергії РРЕ, реле контролю швидкості РКШ, реле обриву поля РОП1 та РОП2, увімкнені в колі шунтових обмоток збудження двигунів ШОД1 та ШОД2, а також реле напрямку обертання РНО та напівпровідниковий комутатор імпульсів НК.

Система управління перетворювачами в СЕЕС бурового судна аналогічна системі управління перетворювачами привода суднового крану з електроконтролером типу ЕВП та працює за викладеними вище принципами.

Для управління приводами стартерних установок використовують агрегати типу ВАКЭП, виготовлені на базі неререверсивної 6-фазної схеми з нульовим виводом та з'єднанням вторинних обмоток силового трансформатора подвійним зигзагом.

3. ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТИРИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

При проектуванні суднових тиристорних електроприводів необхідно враховувати питання, зумовлені безпосередньо практичним застосуванням їх на судах. Під час роботи потужних тиристорних приводів неминуче викривлення форми напруги суднової мережі, вплив на роботу тиристорних систем певної неконди-

ційності напруги мережі. Необхідно також передбачати можливі порушення режиму роботи тиристорних систем управління. Розглянемо головні з них.

3.1. Викривлення напруги суднової мережі

При роботі потужних тиристорних електроприводів виникає викривлення форми напруги суднової мережі, в напрузі з'являються вищі гармоніки порядків $v = km \pm 1$. При коефіцієнті несинусоїдальності $k_{нс} > 10\%$ виникає необхідність розробки та використання заходів щодо обмеження спотворення форми напруги. У промислових системах електропостачання головним засобом заглушення гармонік є резонансні фільтри, настроєні на мінімізацію окремих гармонік (у більшості порядків $v = 5, 7$). Під час використання тиристорних перетворювачів на судах для заглушення гармонік також встановлюються резонансні фільтри, більш ефективні серед яких – широкосмугові. Найпростішими з них є Г-подібні, що встановлюються між перетворювачем та мережею, отже, кожний перетворювач має бути обладнаний власним фільтром.

3.2. Вплив несиметрії та модуляції напруги мережі на амплітудно-частотний спектр випрямленої напруги та споживаного струму

Несиметрія та модуляція напруги мережі приводять до збудження неканонічних гармонік як на виході перетворювача порядків $v \neq km$, так і на вході порядків $v \neq km \pm 1$. Неканонічні гармоніки несуттєво впливають на системи електроприводів.

3.3. Високочастотні коливання напруги, які супроводжують комутацію тиристорів

Власні ємності електрообладнання (фаза-фаза, фаза-корпус) спільно з індуктивностями утворюють коливальні контури по всьому об'єму судна. При комутації тиристорів вмикаються одні та вимикаються інші коливальні контури, магнітна енергія, накопичена у власних ємностях та індуктивностях, при цьому перерозподіляється. Даний процес має характер затухаючих коливань, а контури стають генераторами високочастотних коливань. Амплі-

літуда коливань може досягати значень, сумірних з амплітудою напруги мережі. Дані коливання є перешкодою для роботи радіоелектронних засобів, ЕОМ, систем автоматики тощо. Для їх заглушення використовують демпфірувальні пристрої: RC -кола, трифазні діодні мости з RC -навантаженням. Демпфірувальні пристрої вмикають на вході тиристорного мосту, а також безпосередньо до шин головного розподільного щита.

3.4. Обрив кола управління тиристором

При обриві кола управління одного з тиристорів у трифазній мостовій схемі виходять з роботи дві пари тиристорів, середнє значення випрямленої напруги різко знижується, а пульсація випрямленої напруги зростає. У випрямленій напрузі з'являються неканонічні гармоніки ($v = 1; 2; 3; \dots$) суттєвих значень.

4. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

4.1. Вихідні дані до розрахунку

Трифазна мережа напругою $E_{\text{ЛЛ}} = 220 \text{ В}$, частотою $f = 50 \text{ Гц}$, номінальна потужність двигуна $P_{\text{дном}} = 65 \text{ кВт}$, напруга $U_{\text{дном}} = 220 \text{ В}$, частота обертання $n_{\text{ном}} = 1000 \text{ об/хв}$, фазність випрямлення $m = 6$, діапазон регулювання $U_d = 0 \dots U_{\text{дном}}$, припустимий рівень гармонік у напрузі мережі $U_{\text{вном}} \leq 1\%$.

4.2. Вибір схеми перетворювача

Вибираємо трифазну мостову симетричну схему тиристорного перетворювача, яка найчастіше використовується в судових агрегатах.

4.3. Розрахунок трансформатора

4.3.1. Визначення типової та розрахункової потужності трансформатора

Розрахунок виконуємо за формулою (2), для цього знаходимо наступні параметри:

напівпровідникові перетворювачі зазвичай мають високий ККД $\eta = 80...90 \%$, приймаємо $\eta = 0,85$;

коефіцієнт використання трансформатора визначаємо за довідником для трифазної мостової схеми $k_{в.т} = 0,95$;

коефіцієнт потужності знаходимо з урахуванням споживаної реактивної потужності, зумовленої наявністю кутів управління, за формулою (3), з якої $\chi = 0,848$ при $\alpha = 30^\circ$ та $\gamma = 4^\circ$;

коефіцієнт запасу приймаємо $k_3 = 1,1$.

Підставивши дані у формулу (2), маємо $S_T = 104,4$ кВт. Перевіривши отримане значення $S_T/P_{дном} = 1,6$, бачимо, що воно задовольняє співвідношенню $S_T = (1,4...1,8)P_{дном}$.

4.3.2. Визначення вторинної фазної ЕРС

Знаходимо вторинну фазну ЕРС за формулою (8), з якої $E_{2ф} = 116,1$ В. Виконуємо перевірку за формулою (9), з якої $E_{2ф} \approx 103,5$ В. З формули (10) отримуємо діюче значення струму первинної обмотки трансформатора $I_{T1} = 127,3$ А, за допомогою якого знаходимо діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора $I_{T2} = 241,24$ А.

Маючи дані S_T , $E_{2ф}$, I_{T1} , I_{T2} , за довідником вибираємо трансформатор стрижневого типу з концентричними обмотками, розташованими на осерді, магнітопроводом з холоднокатаної електротехнічної сталі товщиною 0,35 мм марки Е-330 або Е-330А. Значення індукції, а також щільність струму в обмотках вибирають за табл.1.

Таблиця 1

Клас стійкості за нагріванням ізоляції	Індукція, Тл	Щільність струму мідного проводу обмоток, А/мм ²			
		мідного проводу		алюмінієвого проводу	
		Зовнішні	Внутрішні	Зовнішні	Внутрішні
В	1,2...1,3	1...2	1,4	0,9...1,2	1
Н	1,3...1,45	1,2...2,5	1,6	1...1,4	1,2
Ф	1,45...1,55	1,4...2,8	1,9	1,2...1,7	1,4

4.3.3. Визначення коефіцієнта трансформації трансформатора

Коефіцієнт трансформації $k_{тр} = E_{ф1}/E_{ф2} = 1,09$.

4.3.4. Розрахунок анодного індуктивного опору

Згідно з формулою (6), де $U_{к.з} = 5 \%$ – напруга короткого за-

микання трансформатора (знаходиться або з паспортних даних трансформатора, або при його розрахунку), анодний індуктивний опір (індуктивний опір розсіяння фази трансформатора, приведенний до вторинної обмотки) $x_a = 0,019 \text{ Ом}$.

4.4. Вибір вентилів

4.4.1. Прямий номінальний струм

Визначаємо середнє значення струму через вентиль за формулою (11), з якої $I_B = 97,5 \text{ А}$.

4.4.2. Максимальна зворотна напруга

Знаходимо максимальну зворотну напругу $U_{зв.мах}$ за умови, що $U_{зв.мах} = \sqrt{6} E_{2\phi} = 231 \text{ В}$. Вибираємо вентиль ТЛ-200-6.

4.4.3. Розрахунок згладжуючого дроселя

Індуктивність кола постійного струму L_d знаходимо з (20) за умови, що допустима амплітуда шостої гармоніки випрямленого струму $I_{6\text{доп}} \leq 0,05 I_{\text{ном}}$. Одержуємо $L_d = 0,004 \text{ Гн}$. Індуктивність обмотки якоря двигуна $L_{я}$ з (14) дорівнює $0,0021 \text{ Гн}$. Індуктивність згладжуючого дроселя $L_{др} = L_d - L_{я} = 0,0019 \text{ Гн}$. За умови обмеження зони переривчастих струмів (15) знаходимо $L_d = 0,043 \text{ Гн}$, а індуктивність дроселя остаточно визначаємо як $L_{др} = L_d - L_{я} = 0,041 \text{ Гн}$.

4.5. Розрахунок зовнішніх характеристик перетворювача

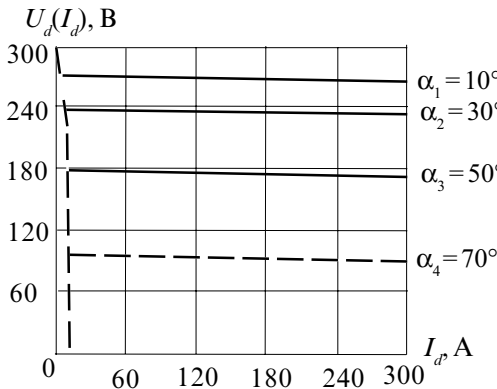


Рис. 7

Зовнішні характеристики перетворювача в області безперервних струмів для кутів $\alpha = 10; 30; 50; 70^\circ$, та дуга межового еліпса розраховані за формулами (4) і (12), (13) та наведені на рис. 7.

4.6. Розрахунок швидкісних та механічних характеристик електродвигуна

За наявності у завданні даних двигуна, необхідно розрахувати та побудувати швидкісні та механічні характеристики, використавши формули (16) та (17), за відсутності даних двигуна у завданні треба підібрати його за довідником, а також розрахувати швидкісні та механічні характеристики.

4.7. Розрахунок випрямленої напруги та струму

Амплітуди гармонік випрямленої напруги для номінального режиму визначаємо за формулою (18), попередньо розрахувавши кут $\alpha = 35,9^\circ$ для даного режиму. Маючи дані електродвигуна, визначаємо гармоніки випрямленого струму за формулою (19). Дані розрахунку наведені у табл. 2.

Таблиця 2

v	6	12	18
U_v, B	45,37	21,79	14,42

4.8. Розрахунок гармонік споживаного струму

Порядки та амплітуди вищих гармонік споживаного струму для номінального режиму визначаємо за формулами (1) і (22), попередньо розрахувавши кут $\gamma = 2,56^\circ$. Амплітуда першої гармоніки

$I_1 = 2\sqrt{3}I_{d \text{ ном}}/\pi$. Таблиця 3

Дані розрахунку наведені у табл. 3.

v	1	5	7	11	13
I_v, A	221,7	22,13	15,78	9,98	8,41

4.9. Розрахунок коефіцієнта несинусоїдальності напруги суднової мережі

За наявності даних синхронного генератора за формулою (21) можливо знайти коефіцієнт несинусоїдальності k_n .

4.10. Визначення коефіцієнта потужності тиристорного перетворювача

Коефіцієнт потужності за формулою (23) дорівнює 0,79 при $v = 1; 5; 7; 11; 13; 23; 25$.

ТЕРМІНОЛОГІЧНИЙ СЛОВНИК

Область безперервного (переривчастого) струму	– Область непрерывного (прерывистого) тока
Блок струмової відсічки	– Блок токовой отсечки
Вантажопідйомний механізм	– Грузоподъемный механизм
Вирівнювальний дросель	– Уравнительный дроссель
Вузол	– Узел
Головний розподільний щит	– Главный распределительный щит
Датчик стану тиристорів	– Датчик состояния тиристоров
Динамічна складова	– Динамическая составляющая
Діюче значення струму (напруги)	– Действующее значение тока (напряжения)
Задавач інтенсивності	– Задатчик интенсивности
Зворотна напруга	– Обратное напряжение
Змінна складова	– Переменная составляющая
Зовнішня характеристика	– Внешняя характеристика
Коротке замикання	– Короткое замыкание
Кут комутації	– Угол коммутации
Логічний перемикаючий пристрій	– Логический переключающий элемент
Маркування	– Маркировка
Мережа	– Сеть
Миттєве значення	– Мгновенное значение
Момент опору	– Момент нагрузки
Навантаження	– Нагрузка
Напівпровідниковий перетворювач	– Полупроводниковый преобразователь
Некерований режим	– Неуправляемый режим
Непогодження напруг	– Несогласованность напряжений
Перевантаження	– Перегрузка
Перекидання інвертора	– Перекидывание инвертора
Постійна складова	– Постоянная составляющая
Потужність	– Мощность
Рекуперативне гальмування	– Рекуперативное торможение
Сигнал зворотного зв'язку	– Сигнал обратной связи

Система фазового управління тиристорами	– Система фазового управління тиристорами
Споживаний струм	– Потребляемый ток
Ступінь використання –	– Степень использования
Ступінь спотворення	– Степень искажения
Якісні показники	– Качественные показатели

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Анисимов Я.Ф., Васильев Е.П.* Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок. – Л.: Судостроение, 1990. – 264 с.

2. *Анисимов Я.Ф.* Судовая силовая полупроводниковая техника – Л.: Судостроение, 1979. – 192 с.

3. Електротехніка і мікросхемотехніка: Підручник для студентів вищ. закл. освіти, що навчаються за напрямками "Електромеханіка" та "Електротехніка": У 4 т./ *В.І. Сенько, М.В. Панасенко, Є.В. Сенько* та ін. – К.: ТОВ "Видавництво "Обереги", 2000.

4. *Розанов Ю.К.* Основы силовой электроники. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.

5. Электрические и электронные аппараты: Учебник для вузов / Под ред. *Ю.К. Розанова.* – М.: Инофрмэлектро, 2001. – 420 с.

ЗМІСТ

I. Розрахунок тиристорного перетворювача.....	3
1.1. Вибір схеми перетворювача.....	3
1.2. Розрахунок трансформатора.....	6
1.3. Вибір тиристорів.....	8
1.4. Розрахунок зовнішніх характеристик перетворювача...	9
1.5. Розрахунок швидкісних та механічних характеристик електродвигуна.....	11
1.6. Розрахунок випрямленої напруги та струму.....	11
1.7. Розрахунок гармонік споживаного струму.....	12
1.8. Розрахунок коефіцієнта несинусоїдальності напруги суднової мережі.....	13
1.9. Визначення коефіцієнта потужності тиристорного перетворювача.....	14
2. Перетворювачі для управління судновим електроприводом постійного струму.....	15
2.1. Зустрічно-паралельна та перехресна схеми реверсивних тиристорних перетворювачів.....	15
2.2. Зовнішні характеристики реверсивних перетворювачів.	16
2.3. Схема електропривода з тиристорним перетворювачемсерії АТРК.....	19
3. Особливості використання тиристорних перетворювачів.....	22
3.1. Викривлення напруги суднової мережі.....	23
3.2. Вплив несиметрії та модуляції напруги мережі на амплітудно-частотний спектр випрямленої напруги та споживаного струму.....	23
3.3. Високочастотні коливання напруги, які супроводжують комутацію тиристорів.....	23
3.4. Обрив кола управління тиристором	24
4. Приклад розрахунку тиристорного перетворювача	24
4.1. Вихідні дані до розрахунку.....	24
4.2. Вибір схеми перетворювача.....	24
4.3. Розрахунок трансформатора.....	24
4.4. Вибір вентилів.....	26
4.5. Розрахунок зовнішніх характеристик перетворювача...	26
4.6. Розрахунок швидкісних та механічних характеристик електродвигуна.....	27
4.7. Розрахунок випрямленої напруги та струму.....	27

4.8. Розрахунок гармонік споживаного струму.....	27
4.9. Розрахунок коефіцієнта несинусоїдальності напруги суднової мережі.....	27
4.10. Визначення коефіцієнта потужності тиристорного перетворювача.....	27
Термінологічний словник.....	28
Список рекомендованої літератури.....	29

Навчальне видання

**БЛІНЦОВ Володимир Степанович
ЖУК Дмитро Олександрович
ЖУК Олександр Кирилович**

**РОЗРАХУНОК ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА
ДЛЯ УПРАВЛІННЯ СУДНОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

(українською мовою)

Редактор М.П. Фоміна
Комп'ютерна правка та верстка К.О. Докієнко
Коректор Н.О. Шайкіна

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК
№ 1150 від 12.12.2002 р.

Підписано до друку 00.00.05. Папір офсетний. Формат 60×84/16.
Гарнітура "Таймс". Друк офсетний. Ум. друк. арк. 1,7. Обл.-вид. арк. 1,8.
Тираж 100 прим. Вид. № 18. Зам. № 213. Ціна договірна

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування,
54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5