

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**МЕХАНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до контрольної роботи з дисципліни  
«ТЯГОВІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»**

**Частина 1  
МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

**Харків – 2021**

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу 11 травня 2021 р., протокол № 19.

Описано порядок та методику розрахунку передачі потужності тепловозів та дизель-поїздів з електричною передачею та тяговими двигунами постійного струму. Викладено основні положення з розрахунку тягових електричних двигунів та побудови характеристик передачі потужності.

Методичні вказівки призначено для здобувачів вищої освіти заочної форми навчання першого (бакалаврського) рівня спеціальності 273 «Залізничний транспорт» освітньої програми «Локомотиви та локомотивне господарство», що вивчають курс «Тягові електричні машини».

Укладачі:

старш. викл. В. В. Рогаль,  
доц. А. Л. Сумцов,  
асист. Ю. В. Жовтий

Рецензент

доц. Д. Л. Сушко

## ЗМІСТ

Загальні вказівки.....	4
1 Зміст контрольної роботи.....	4
2 Визначення основних параметрів передачі.....	6
3 Зовнішня вольт-амперна характеристика тягового генератора.....	8
4 Електричні параметри тягового двигуна.....	12
5 Визначення передаточного числа тягового редуктора.....	13
6 Розрахунок приведенного об'єму тягового електродвигуна.	18
7 Розрахунок обмотки якоря і розмірів паза.....	19
8 Вибір кількості і розмірів щіток та визначення робочої довжини колектора.....	25
9 Розрахунок магнітного кола двигуна.....	27
10 Визначення коефіцієнта корисної дії (ККД) тягового двигуна.....	35
11 Розрахунок та побудова характеристик тягового двигуна..	37
12 Гальмівні характеристики електричної передачі потужності тепловоза.....	42
Список літератури.....	45
Додаток А Довідкові дані електрообладнання локомотивів..	46
Додаток Б Таблиці намагнічування.....	51

## ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

Мета виконання контрольної роботи полягає в тому, щоб допомогти здобувачу вищої освіти у вивченні, закріпленні навчального матеріалу та засвоєнні методів виконання розрахунків передачі потужності тепловоза чи дизель-поїзда за вихідними даними. Варіанти завдання обираються індивідуально для кожного студента із таблиць 1.1 та 1.2 за навчальним шифром.

Оформлення контрольної роботи має відповідати вимогам [1]. При виконанні необхідно застосовувати стандартні умовні позначення електричних кіл згідно з ЄСКД. Характеристики та векторні діаграми виконуються на міліметровому папері з використанням стандартних масштабів: 1, 2, (4), 5, 10, 20, (40), 50 та ін. При цьому по осі абсцис на графіках відкладається тільки одна будь-яка величина (наприклад  $P_2$ ,  $M_2$  або  $I_2$ ), а по осі ординат можна відкладати кілька величин. Усі вертикальні шкали мають бути розмічені рівномірно по всій висоті і починатись з нуля. Вісь абсцис також треба розмітити рівномірно, починаючи з нуля.

Сторінки контрольної роботи мають бути пронумеровані і мати поля. Креслення та рисунки також слід пронумерувати наскрізною нумерацією або в межах задач, у цьому разі номер складається з номера задачі і порядкового номера рисунка чи креслення, відокремлених крапкою. Результати розрахунків округляються до трьох цифр.

Контрольна робота обов'язково підписується студентом.

## 1 ЗМІСТ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Виконання контрольної роботи доцільно розділити на три блоки.

Перший блок передбачає виконання загальних розрахунків передачі потужності тепловоза або дизель-поїзда (з першого по четвертий розділи) та підсумовується виконанням графічної частини із спрощеною принциповою електричною схемою силових електричних кіл живлення тягових електродвигунів від тягового генератора, а також кіл збудження тягового генератора (четвертий розділ).

Другий блок об'єднує розрахунок параметрів тягового електричного двигуна (з п'ятого по восьмий розділи).

Третій блок передбачає розрахунок і побудову характеристик тягового двигуна та передачі потужності в тяговому і гальмівному режимах (розділи з дев'ятого по дванадцятий).

Вихідні дані для виконання роботи обираються з таблиці 1.1 за навчальним шифром та додатка А.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані

Тип тепло-воза	Номер варіанта (остання цифра шифру)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
	Ван-тажний	Ван-тажний	Паса-жир-ський	Манев-ровий	Ванта-жно-паса-жир-ський	Манев-ровий	Ван-тажний	Ван-тажний	Паса-жир-ський	Дизель-поїзд
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Осьова формула	3 <sub>0</sub> -3 <sub>0</sub>	3 <sub>0</sub> -3 <sub>0</sub>	2х (3 <sub>0</sub> -3 <sub>0</sub> )	3 <sub>0</sub> -3 <sub>0</sub>	2х (3 <sub>0</sub> -3 <sub>0</sub> )	3 <sub>0</sub> -3 <sub>0</sub>	3 <sub>0</sub> -3 <sub>0</sub>	2х (3 <sub>0</sub> -3 <sub>0</sub> )	3 <sub>0</sub> -3 <sub>0</sub>	Два моторних вагони з двома рушійними осями кожний
Ефективна потужність дизелів, $N_e$ , к. с.	4000	3000	2х2000	1000	2х2500	1200	3500	2х2000	4000	2х600
Зчїпна маса, $P_{зч}$ , т	134	130	2х100	120	2х114	122	132	2х126	130	2х44
Кількість тягових електродвигунів, $C$	6	6	2х6	6	2х6	6	6	2х6	6	2х2

### Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Діаметр рушій- них коліс <i>Дк, мм</i>	1220	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050
Макси- мальна швид- кість тепло- воза	Обирається за таблицею 1.2									

Таблиця 1.2 – Максимальна (конструкційна) швидкість тепловоза, км/год

Остання цифра шифру	Передостання цифра шифру									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	120	115	100	105	110	120	125	110	90	95
2	105	110	110	115	100	95	105	100	90	95
3	150	155	170	140	145	160	165	170	160	150
4	85	70	90	95	80	75	90	80	80	85
5	130	120	120	125	120	125	125	120	130	125
6	90	95	75	80	85	80	90	70	85	70
7	120	110	105	110	115	105	100	120	95	100
8	120	105	105	110	115	110	100	115	120	100
9	160	165	140	150	155	170	160	150	150	145
0	150	155	135	140	145	160	165	170	125	130

## 2 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕДАЧІ

### Електрична потужність тягового генератора (ТГ)

Електрична потужність ТГ дорівнює величині ефективної потужності дизеля за виключенням потужності на привід допоміжних агрегатів локомотива з урахуванням коефіцієнта корисної дії (ККД) ТГ [3, 4].

$$P_e = (N_e - \Delta N_{\text{да}}) \cdot \eta_e, \quad (2.1)$$

де  $\Delta N_{\partial a}$  – витрати потужності на привід допоміжних агрегатів тепловоза;

$\eta_z$  – ККД тягового генератора.

Зазвичай

$$\Delta N_{\partial a} = (0,1 \div 0,12) \cdot N_e. \quad (2.2)$$

### **Електрична потужність тягових двигунів**

Електрична потужність ТГ рівномірно розподіляється між тяговими електродвигунами, тобто

$$P_{\partial} = \frac{P_z}{c}, \quad (2.3)$$

де  $c$  – кількість тягових двигунів на тепловозі. Як правило, всі колісні пари локомотива обмоторені. Тому їх кількість визначається за колісною формулою локомотива (таблиця 1.1).

**Дотична потужність тепловоза, кВт, визначається з виразу**

$$N_k = c \cdot P_{\partial} \cdot \eta_{\partial} \cdot \eta_{zn}, \quad (2.4)$$

де  $\eta_{\partial}$  – ККД тягового двигуна. Звичайно ККД тягових двигунів постійного струму складає  $0,91 \div 0,92$ ;

$\eta_{zn}$  – ККД зубчатої передачі,  $\eta_{zn}=0,97 \div 0,98$ .

**Тривала розрахункова сила тяги тепловоза, кН, (сила тяги на розрахунковому підйомі) визначається з умови реалізації коефіцієнта тяги на розрахунковому підйомі.**

$$F_{kr} = P_{zc} \cdot \psi_{kr} \cdot 9,8, \quad (2.5)$$

де  $P_{zc}$  – зчїпна маса локомотива, т;

$\psi_{kr}$  – коефіцієнт тяги:

$\psi_{kr}=0,19 \div 0,24$  – для вантажних локомотивів;

$\psi_{kr}=0,14 \div 0,16$  – для маневрових локомотивів;

$\psi_{kr}=0,14 \div 0,15$  – для пасажирських локомотивів.

**Швидкість на розрахунковому підйомі, м/с,**

$$V_p = \frac{N_{кр}}{F_{кр}}. \quad (2.6)$$

Для тепловозів різного виду служби значення швидкості на розрахунковому підйомі перебувають приблизно в приведених межах:

- маневрові тепловози –  $v_p=10 \div 12$  км/год;
- вантажні тепловози –  $v_p=25 \div 32$  км/год;
- пасажирські тепловози –  $v_p=50 \div 60$  км/год.

Більш високі значення швидкостей встановлюють для локомотивів більшої потужності.

### **3 ЗОВНІШНЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЯГОВОГО ГЕНЕРАТОРА**

Залежність між напругою і струмом генератора визначає вольт-амперна характеристика [3, 5]. Оскільки потужність дизеля на певній позиції контролера машиніста незмінна, то в першому наближенні можна прийняти потужність генератора за постійну:

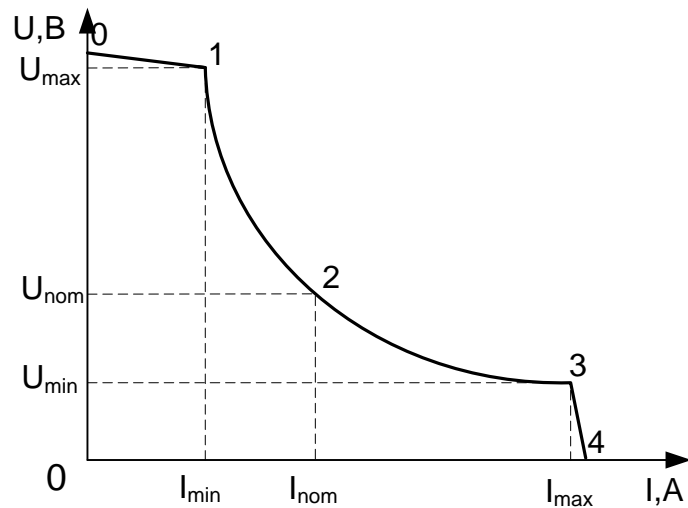
$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = const. \quad (3.1)$$

Звідси вольт-амперна характеристика генератора повинна мати гіперболічний вигляд, її також називають автоматичною (рисунок 3.1).

Максимальна напруга тягових генераторів перебуває в інтервалі 550÷800 В, з формули (3.1) випливає, що мінімальне значення струму відповідає максимальній напрузі і дорівнюватиме

$$I_{2min} = \frac{P_2}{U_{2max}}. \quad (3.2)$$





0-1 – обмеження максимальної напруги;  
 1-2-3 – робоча частина характеристики;  
 3-4 – обмеження максимального струму

Рисунок 3.1 – Зовнішня вольт-амперна характеристика генератора

Номінальна напруга генератора має зв'язок з максимальним коефіцієнтом регулювання генератора за напругою

$$k_2 = \frac{U_{2max}}{U_{2nom}} . \quad (3.3)$$

Коефіцієнт  $k_2$  перебуває в межах  $1,4 \div 1,6$ , тоді

$$U_{2nom} = \frac{U_{2max}}{k_2} , \quad (3.4)$$

а струм генератора

$$I_{2nom} = \frac{P_2}{U_{2nom}} . \quad (3.5)$$

Максимальний струм генератора з номінальним зв'язаним коефіцієнтом регулювання генератора за струмом

$$c_2 = \frac{I_{2\max}}{I_{2\min}}, \quad (3.6)$$

який перебуває в межах  $1,8 \div 2,2$ , тоді

$$I_{2\max} = c_2 \cdot I_{2\min}, \quad (3.7)$$

$$U_{2\min} = \frac{P_2}{I_{2\max}}. \quad (3.8)$$

Знайшовши координати цих трьох характерних точок (мінімального, номінального та максимального струму), будується вольт-амперна характеристика генератора.

Ступінь регулювання електропередачі за швидкістю тепловоза характеризується коефіцієнтом регулювання, який є відношенням максимальної швидкості до швидкості тепловоза тривалого режиму (розрахункової), тобто

$$C_v = \frac{v_{\max}}{v_p}. \quad (3.9)$$

Для реалізації коефіцієнта регулювання передачі за швидкістю  $C_v > 2,1$  регулювання тягового генератора за напругою в діапазоні, що визначається коефіцієнтом регулювання  $k_2 \leq 1,6$ , недостатньо. Для забезпечення роботи електропередачі при постійній потужності в необхідному діапазоні швидкості руху тепловоза при збереженні діапазону регулювання ТГ за напругою застосовують два методи: ослаблення збудження тягових електродвигунів, а саме ослаблення поля та перемикання у схемі під'єднання тягових електродвигунів до ТГ.

При виконанні контрольної роботи слід застосовувати перший спосіб (ослаблення збудження), який є найбільш поширеним і простим методом для розширення діапазону регулювання електропередачі за швидкістю тепловоза.

З урахуванням частки діапазону швидкості тепловоза, в якому має реалізовуватись повна потужність дизеля, для маневрових тепловозів допускається визначати розрахунковий

коефіцієнт регулювання електропередачі за швидкістю за формулою

$$C_v = \frac{0,7 \cdot v_{\max}}{v_p}, \quad (3.10)$$

а для вантажних

$$C_v = \frac{0,9 \cdot v_{\max}}{v_p}. \quad (3.11)$$

Пасажирські тепловози мають реалізовувати повну потужність у всьому діапазоні швидкостей руху – від розрахункової до конструкційної (максимальної).

Для перевірки можливості збереження діапазону регулювання електропередачі за швидкістю шляхом ослаблення збудження тягових електродвигунів визначають мінімальне значення коефіцієнта ослаблення збудження тягових електродвигунів  $\alpha_{\min}$ , що є відношенням струму збудження (струму головних полюсів) до струму якоря. Величина цього коефіцієнта визначається за формулою

$$\alpha_{\min} = 1,44 \cdot \frac{\kappa_2^3}{C_v^2} \quad (3.12)$$

і не має бути меншою за 0,25 за умовою забезпечення доброї комутації тягових електродвигунів при високих швидкостях руху.

Якщо  $\alpha_{\min} < 0,5$ , то застосовують два ступені ослаблення збудження, тобто вводять проміжний ступінь ослаблення збудження, коефіцієнт якого визначають за формулою

$$\alpha_1 = \sqrt{\alpha_2}. \quad (3.13)$$

У кінцевому результаті слід прийняти варіант, в якому забезпечується  $\alpha_{\min} = 0,25 \div 0,40$  при мінімальному коефіцієнті регулювання ТГ за напругою в діапазоні  $\kappa_2 = 1,4 \div 1,6$ . Зменшення діапазону регулювання ТГ за напругою дає змогу зменшити габарити та масу генератора.

## 4 ЕЛЕКТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ТЯГОВОГО ДВИГУНА

Електричні параметри тягового електродвигуна залежать від схеми їх під'єднання. Для тепловозів з малою потужністю (менше 1000 кВт) використовується послідовно-паралельна схема під'єднання. Для шестивісних тепловозів – це послідовне під'єднання трьох двигунів у дві паралельні гілки (рисунок 4.1).

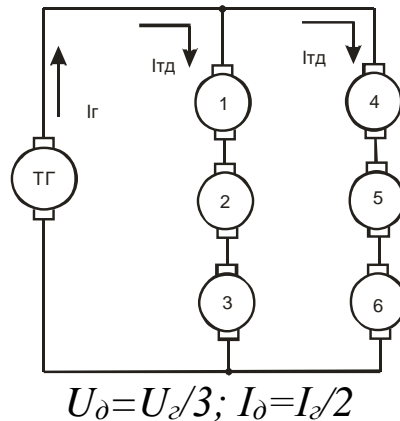


Рисунок 4.1 – Послідовно-паралельна схема під'єднання тягових двигунів

Для тепловозів потужністю більше 1000 кВт, але менше 2000 кВт, використовується послідовно-паралельна схема (рисунок 4.2) – три паралельні гілки по два послідовно підключені двигуни в кожній.

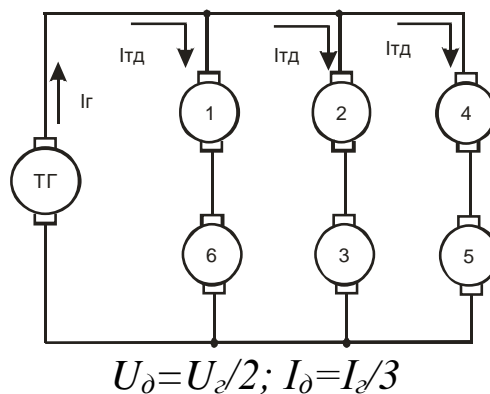


Рисунок 4.2 – Послідовно-паралельна схема під'єднання тягових двигунів

Для тепловозів потужністю більше 2000 кВт використовується паралельна схема під'єднання (рисунок 4.3) – всі двигуни підключені на напругу генератора.

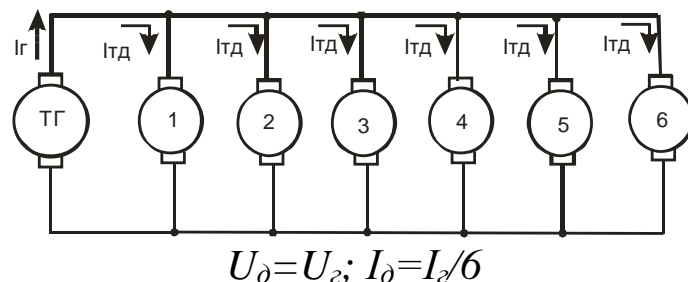


Рисунок 4.3 – Паралельна схема під'єднання тягових двигунів

Далі, після обрання схеми під'єднання тягових двигунів з тяговим генератором, необхідно зробити вкладку принципової силової схеми тепловоза. На схемі мають бути показані якорі тягових електричних машин, обмотки збудження, силові контакти поїзних контакторів, силові контакти реверсора, силові контакти контакторів та резистори ослаблення збудження тягових електродвигунів, а також слід показати основні агрегати, апарати та елементи системи регулювання потужності [3].

На силовій схемі і схемі збудження тягового генератора треба показати системи протибуксувального захисту, захисту від важких наслідків пробоя ізоляції в силовому колі і захисту від надмірних перевантажень тягових електричних машин.

При виконанні рекомендується взяти за основу електричну схему одного з тепловозів з електричною передачею.

## 5 ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕДАТОЧНОГО ЧИСЛА ТЯГОВОГО РЕДУКТОРА

У контрольній роботі слід прийняти опорно-осьове підвішування тягових електродвигунів. Навіть при однаковій потужності двигуна можна отримати на його валу різні значення обертального моменту: це залежить від обраної частоти обертання якоря. Проте при надмірному збільшенні обертального моменту двигун буде тихохідний, внаслідок чого його габарити зростають [2, 3].

Розміри обмежуються при опорно-осьовому підвішуванні двигуна відстанню між внутрішніми гранями бандажів коліс колісних пар, а також найменшою допустимою відстанню від корпусу двигуна до головки рейки,  $a$  (рисунок 5.1). Для можливості збільшення цієї відстані, а також збільшення можливих габаритів двигуна, вісь двигуна розміщують вище осі колісної пари. Для тепловозних двигунів розмір  $x$  (рисунок 5.1) обирають у межах  $20 \div 40$  мм.

Частота обертання тягового електродвигуна в тривалому режимі роботи  $n_H$ , об/хв, і відповідна розрахункова швидкість тепловоза  $v_p$  виражені у співвідношенні

$$n_H = 5,3 \cdot 10^3 \frac{i \cdot v_p}{D_K}, \quad (5.1)$$

де  $i$  – передаточне число тягового редуктора;

$D_K$  – діаметр коліс колісної пари по колу кочення, мм.

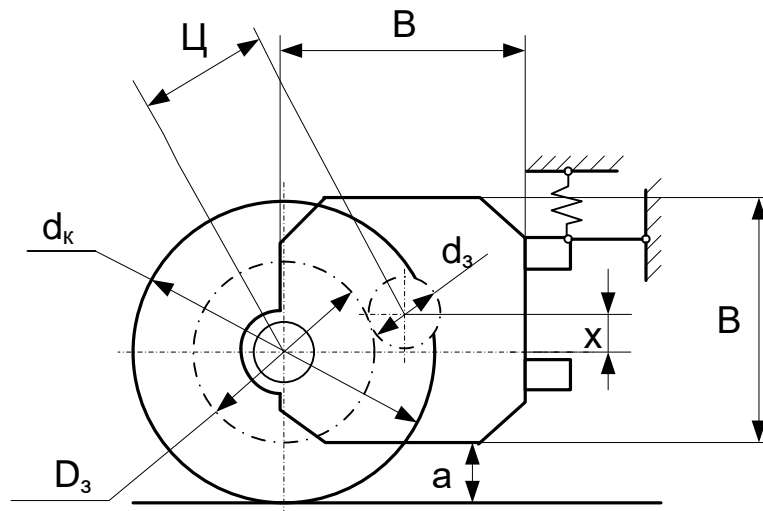


Рисунок 5.1 – Схема опорно-осьового підвішування тягових електродвигунів

Передаточне число тягового редуктора

$$i = \frac{D_3}{d_3} = \frac{Z_3}{z_3}, \quad (5.2)$$

де  $D_3, d_3$  – відповідно діаметри ділільних кіл зубчатого колеса та шестірні;

$Z_3, z_3$  – відповідно їх числа зубців.

Багато вибирати передаточне число якомога більшим, оскільки при цьому буде найбільша частота обертання  $n_n$  і при заданій потужності двигуна  $P_\delta$  найменший момент  $M_n$ , а відповідно, найменші розміри і маса двигуна.

Відповідно до позначень (рисунок 5.2)

$$D_3 = D_k - 2(h' + h''). \quad (5.3)$$

Необхідно, щоб  $h' \geq 120 \text{ мм}$ . Величина  $h'' = 20 - 25 \text{ мм}$ .

Величину  $d_3$  можна отримати, оцінивши попередньо передаточне число тягового редуктора:

$i = 4,2 \div 4,9$  для вантажних тепловозів при  $D_k = 1050 \text{ мм}$ ;

$i = 4,7 \div 5,3$  для вантажних тепловозів при  $D_k = 1250 \text{ мм}$ ;

$i = 2,3 \div 3,5$  для пасажирських тепловозів;

$i = 4,5 \div 4,9$  для маневрових тепловозів.

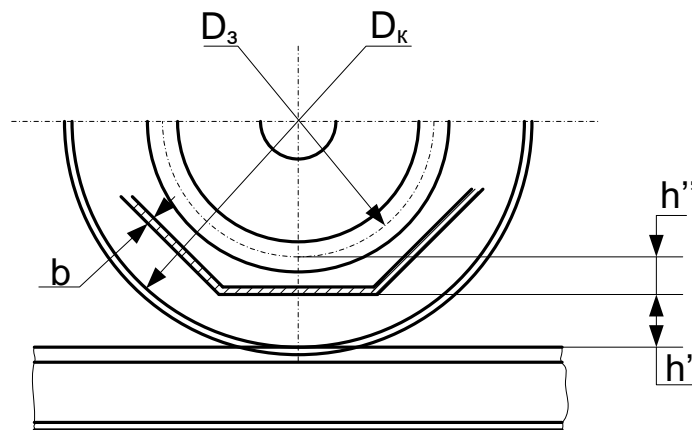


Рисунок 5.2 – Ескіз до визначення розмірів зубчатої передачі

Обравши передаточне число тягового редуктора  $i$  залежно від типу тепловоза та діаметра коліс, знаходимо:

$$d_3 = \frac{D_3}{i}. \quad (5.4)$$

Далі потрібно обирати модуль зачеплення  $m$  зубчатих коліс тягового редуктора залежно від моменту на валу тягового двигуна в тривалому режимі (при номінальному моменті) за таких вихідних:

$M_n, \text{Н м}$	1000	2000	4000 і більше
$m, \text{мм}$	8-10	9-11	10-12

Визначаємо номінальний момент за розрахунковим значенням сили тяги і попередньо знайденим передаточним числом тягового редуктора:

$$M_n = \frac{F_p \cdot D_k \cdot 10^{-3}}{2 \cdot i \cdot \eta_{zn} \cdot c}, \quad (5.5)$$

де  $c$  – кількість тягових електродвигунів.

Числа зубців  $Z_3 = \frac{D_3}{m}$  і  $z_3 = \frac{d_3}{m}$  мають бути по можливості взаємно простими та цілими. Далі уточнюють величину передаточного числа  $i = \frac{Z_3}{z_3}$ . Слід прийняти до уваги, що число зубців шестірні має бути не меншим 17.

Централь, мм, що при звичайно застосовуваній корекції зубців (для колеса  $\varepsilon_k=0$ , а для шестірні  $\varepsilon_k=+0,5$ ) визначається з виразу

$$Ц = \frac{m}{2} (Z_3 + z_3) + 0,5. \quad (5.6)$$

Централь за умови опорно-осьового підвішування повинна мати прив'язку до діаметра якоря двигуна, мм, який попередньо визначимо за формулою

$$D_{я} = \kappa_{я} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_d}{n_n}}, \quad (5.7)$$

де  $\kappa_{я}=650 \div 750$  для двигунів з ізоляцією класу нагрівостійкості В;  
 $\kappa_{я}=600 \div 675$  для двигунів з ізоляцією класу нагрівостійкості F.



У зазначеному вище діапазоні можливих значень діаметрів якоря двигуна необхідно обрати нормалізовану величину, що забезпечує штампування листів заліза якоря з мінімальними відходами, а також вписування двигуна у визначені габарити. Діаметри якорів за нормалізованим рядом: 245, 280, 327, 368, 423, 493, 560, 660, 740, 850, 990 мм.

Перевірка умови вписування тягового двигуна у визначені для нього габарити під тепловозом

$$D_{я} \leq 1,15 Ц. \quad (5.8)$$

Правильність прийнятого значення  $D_{я}$  перевіряють за допустимим максимальним значенням колової швидкості якоря  $v_{яmax}$ , м/с, що досягається при максимальній (конструкційній) швидкості руху локомотива,

$$v_{яmax} = \frac{\pi \cdot D_{я} \cdot n_{max}}{60} \leq 65 \div 70, \quad (5.9)$$

$$\text{де } n_{max} = n_n \cdot \frac{v_{max}}{v_p}.$$

Далі визначають висоту (ширину) корпусу двигуна, мм,

$$B = \frac{D_{я}}{0,58 \div 0,64}, \quad (5.10)$$

Відстань від головки рейки до корпусу двигуна (рисунок 5.1)

$$a = \left( \frac{D_k}{2} + x - \frac{B}{2} \right). \quad (5.11)$$

де  $x$  – різниця по висоті осі колісної пари і ТЕД,  $x=20 \div 40$  мм.

Ця відстань має бути не меншою за 120 мм.

Отже, визначають частоту обертання якоря в тривалому режимі, об/хв, за формулою (5.1)

$$n_n = 5,3 \cdot 10^3 \cdot \frac{i}{D_k} \cdot v_p.$$

## 6 РОЗРАХУНОК ПРИВЕДЕНОГО ОБ'ЄМУ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Приведений об'єм якоря,  $см^3$ ,

$$V_{я} = D_{я}^2 \cdot L_{я} = \frac{6 \cdot P_{\delta} \cdot 10^7}{\alpha \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot n_n}, \quad (6.1)$$

де  $L_{я}$  – осьова довжина осердя якоря,  $см$ ;

$P_{\delta}$  – потужність тягового електродвигуна,  $кВт$ ;

$n_n$  – номінальна частота обертання якоря тягового двигуна,  $хв^{-1}$ ;

$\alpha$  – коефіцієнт полюсного перекриття;

$A$  – лінійне навантаження якоря струмом  $А/см$ ;

$B_{\delta}$  – розрахункова магнітна індукція в повітряному зазорі,  $Тл$ .

Для тепловозних тягових електродвигунів  $\alpha=0,67 \div 0,72$ ;  
 $A=450 \div 550 А/см$ ;  $B_{\delta}=0,95 \div 1,05 Тл$ .

Довжина осердя якоря,  $см$ ,

$$L_{я} = \frac{V_{я}}{D_{я}^2}. \quad (6.2)$$

Для тепловозних двигунів  $L_{я} \leq 45,0 \div 48,0 см$ .

Полюсний поділ якоря,  $см$ ,

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{я}}{2p}. \quad (6.3)$$

Зазор під центром полюса,  $мм$ ,

$$\delta \geq (0,01 \div 0,015) D_{я}. \quad (6.4)$$

Зазор під краєм полюса  $\delta_k = 2\delta$ .

## 7 РОЗРАХУНОК ОБМОТКИ ЯКОРЯ І РОЗМІРІВ ПАЗА

В усіх варіантах роботи слід застосовувати просту петльову двошарову обмотку якоря і число головних полюсів  $2p=4$  [2, 4]. В цьому випадку число паралельних гілок обмотки якоря  $2a$  дорівнює числу головних полюсів  $2p$ , тобто  $2a=4$ , а струм паралельної гілки визначається за формулою

$$i_{\text{я}} = \frac{I_{\text{дн}}}{2a} \leq 250A. \quad (7.1)$$

Число провідників обмотки якоря (попередньо)

$$N = \frac{A \cdot \pi \cdot D_{\text{я}}}{i_{\text{я}}}. \quad (7.2)$$

Оскільки при двошаровій обмотці з кожною колекторною пластиною зв'язані два провідники обмотки якоря, то число колекторних пластин

$$k = \frac{N}{2}. \quad (7.3)$$

Знайдене число колекторних пластин перевіряється за допустимою середньою напругою між ними при максимальному значенні напруги на затискачах електродвигуна

$$U_{\text{кр}} = \frac{2 \cdot p \cdot U_{\text{дmax}}}{k} \leq 16B, \quad (7.4)$$

де  $U_{\text{дmax}}$  – максимальне значення напруги двигуна, В.

Далі попередньо оцінюють діаметр колектора  $D_{\text{кол}}$ , мм,

$$D_{\text{кол}} = (0,8 \div 0,81) \cdot D_{\text{я}} \quad (7.5)$$

і визначають колекторний поділ  $t_k$ , мм, який має бути не меншим за 4 мм:

$$t_k = \frac{\pi \cdot D_{кол}}{k}. \quad (7.6)$$

Число пазів якоря  $Z$  вибирають за кривою (рисунок 7.1). З умови симетрії, відношення  $Z/p$  має бути числом цілим, а для зменшення амплітуди пульсацій магнітного потоку в повітряному зазорі електродвигуна – непарним.

Число колекторних пластин на паз  $n_k = \frac{k}{Z}$  має бути цілим (для тепловозних двигунів  $n_k = 3 \div 4$ ).

Число пазів уточнюється перевіркою об'єму струму в пазах,  $A/см$ ,

$$A = \frac{i_y \cdot N}{\pi \cdot D_y}. \quad (7.7)$$

Для визначення перерізу провідника обмотки якоря слід задатися величиною фактора нагріву, який є добутком лінійного навантаження на густину струму в провіднику  $A \Delta_y$ .

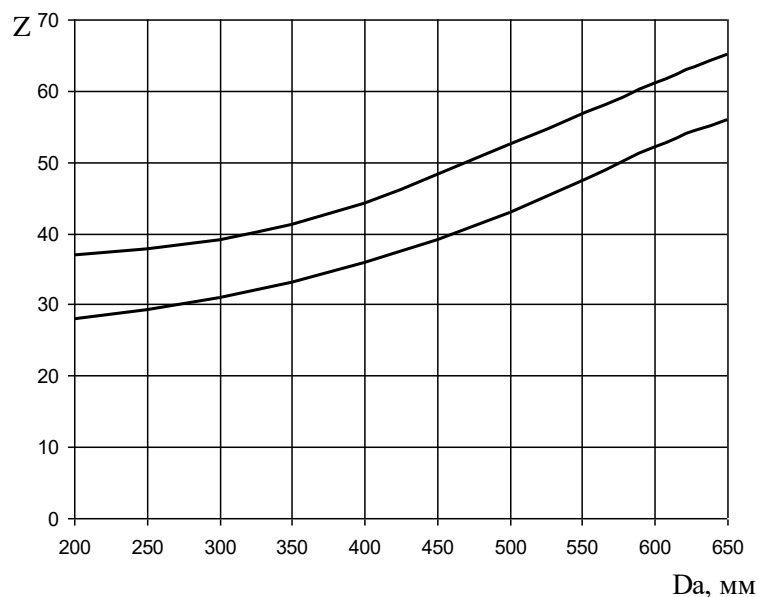


Рисунок 7.1 – Залежність числа пазів якоря від його діаметра

Для тепловозних тягових машин

$$(A \cdot \Delta_{я}) = (2500 \div 4000) \frac{A^2}{\text{см} \cdot \text{мм}^2}. \quad (7.8)$$

Звідки

$$\Delta_{я} = \frac{(A \cdot \Delta_{я})}{A}. \quad (7.9)$$

Для тягових двигунів тепловозів  $\Delta_{я} = (5 \div 7) \text{ А/мм}^2$ .

Задаючись значенням  $\Delta_{я}$ , визначається площа перерізу провідника обмотки якоря,  $\text{мм}^2$ ,

$$g_{я} = \frac{i_{я}}{\Delta_{я}}. \quad (7.10)$$

Визначений переріз округлюється до найближчого значення (за стандартом).

Практично площа перерізу провідника може бути отримана комбінацією двох розмірів: висоти  $h_m$  і ширини  $b_m$  обмоткової прямокутної міді, мм, відповідно до приведенного ряду лінійних розмірів провідників:

0,9	1,6	2,6	4,4	6,9	10,8	16,0
1,0	1,7	2,8	4,7	7,0	11,0	16,8
1,1	1,8	3,1	5,1	7,4	11,6	18,0
1,2	2,0	3,3	5,5	8,0	12,5	19,5
1,3	2,1	3,5	5,9	8,6	13,5	22,0
1,4	2,3	3,8	6,4	9,3	14,5	25,0
1,5	2,4	4,1	6,5	10,0	15,6	28,0

Розміщення провідників у пазу якоря та ізоляція їх виконується, як показано на рисунку 7.2. Розміри міді провідників мають бути підібрані таким чином, щоб відношення висоти паза до ширини ( $h_n/b_n$ ) було в межах  $4 \div 5$ . Якщо висота провідника виходить більшою за  $10 \div 12$  мм, то для зменшення додаткових витрат приймаються два провідники, що вкладаються

по висоті один над одним і з'єднуються з однією колекторною пластиною.

В усіх варіантах роботи слід використовувати поширену в сучасних двигунах ізоляцію класу нагрівостійкості F, яка допускає максимальне перевищення температури обмотки якоря над температурою охолоджувального повітря  $140^{\circ}\text{C}$ . У цьому випадку обмотка якоря виконується з проводу 1 (рисунок 7.2) марки ПЕТВСД з емалеволокнистою витковою ізоляцією 2 двосторонньої товщини  $0,37 \div 0,50$  мм.

Корпусна ізоляція 3 (рисунок 7.2) є основною, і товщина її залежить від напруги по відношенню до корпусу машини, тобто від максимальної напруги тягового генератора. Ця ізоляція виготовляється склослюдянитовою стрічкою ЛСФЧ товщиною  $0,07 \div 0,10$  мм. При напрузі відносно корпусу до  $750$  В намотується три шари ізоляції в напівперекриття і в цьому випадку повна двостороння товщина корпусної ізоляції буде

$$0,1 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 2 = 1,2 \text{ мм.}$$

Покривна ізоляція 4 (рисунок 7.2) служить для захисту основної корпусної ізоляції від механічних пошкоджень. Незалежно від значення напруги її виконують із склострічки товщиною  $0,10$  мм одним шаром у напівперекриття або товщиною  $0,15$  мм встик.

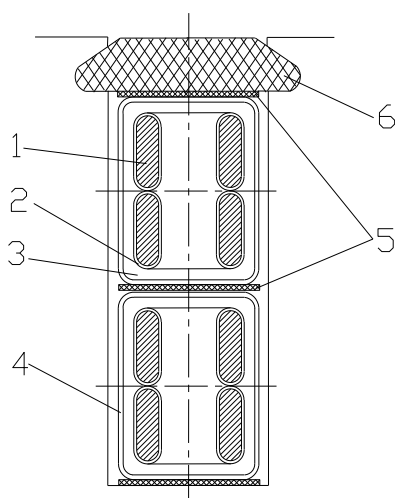


Рисунок 7.2 – Розташування провідників та ізоляція їх у пазу якоря

При визначенні місця, яке займається ізоляцією по висоті паза, враховується ще прокладка 5 із міканіту товщиною 0,5 мм, що вкладається на дно паза, між верхньою та нижньою котушками, а також між верхньою котушкою та клином 6. Крім того, передбачається місце для встановлення клина 6 по висоті  $6 \div 8$  мм, але не менше 5 мм. Зазор на укладку по висоті паза приймається рівним  $0,15 \div 0,20$  мм, по ширині дорівнює  $0,20 \div 0,30$  мм.

Таким чином, знаючи розміри провідників якірної обмотки та їх кількість, з урахуванням електричної ізоляції одиниць від одного та від осердя якоря, визначається висота  $h_n$  та ширина  $b_n$  паза.

Висота зубця приймається рівною висоті паза, тобто  $h_z = h_n$ .

Ширина зубця якірного осердя в основі, мм,

$$b_{z_2} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{я}} - 2h_z)}{Z} - b_n. \quad (7.11)$$

Ширина зубця на висоті  $1/3 h_z$  від його основи, мм,

$$b_{z_{1/3}} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{я}} - 1,33h_z)}{Z} - b_n. \quad (7.12)$$

Отримані розміри вказуються на ескізі, що подається в роботі. Приклад показано на рисунку 7.3.

Зубцеві кроки, мм:

а) по зовнішньому діаметру якоря

$$t_{z_1} = \frac{\pi \cdot D_{\text{я}}}{Z}; \quad (7.13)$$

б) по дну паза

$$t_{z_2} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{я}} - 2h_z)}{Z}; \quad (7.14)$$

в) на  $1/3$  висоти паза від основи

$$t_{z1/3} = \frac{\pi \cdot (D_{я} - 1,33h_z)}{Z}. \quad (7.15)$$

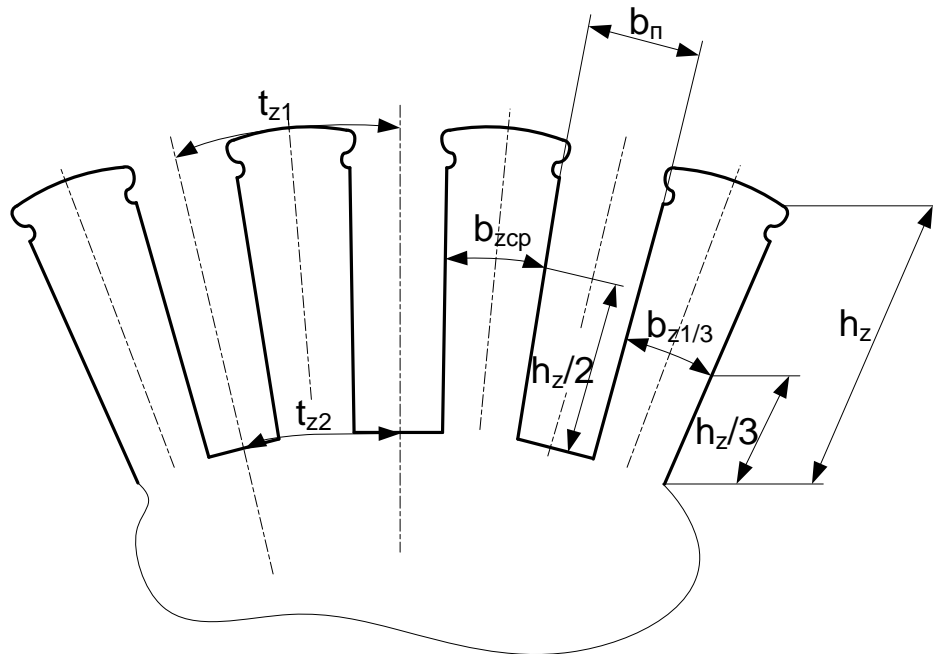


Рисунок 7.3 – Зубцевий шар якоря та його розміри

Для остаточного висновку про правильність обраних розмірів провідника і паза якоря слід визначити магнітну індукцію в перетині зубця, взятому на  $1/3$  висоти зубця, відраховуючи від основи. Розрахунковий переріз зубців для проходження магнітного потоку,  $m^2$ ,

$$Q_{z1/3} = \alpha \cdot \frac{Z}{2p} \cdot b_{z1/3} \cdot L_{я} \cdot \kappa_c, \quad (7.16)$$

де  $\kappa_c=0,97$  – коефіцієнт, що враховує ізоляцію листів пакета заліза якоря з електротехнічних сталей марок Э11, Э12, Э1300, Э1300А;  $\alpha$  – коефіцієнт полюсного перекриття (див. формулу (7.1)).

Основний магнітний потік машини,  $Вб$ ,

$$\Phi_o = \frac{0,96U_{дн} \cdot 60a}{N \cdot p \cdot n_H}, \quad (7.17)$$



де  $U_{\partial n}$  – напруга тягового двигуна в тривалому режимі (визначається відповідно до схеми з'єднання двигунів з тяговим генератором),  $B$ ;

$0,96 U_{\partial n} = E$  – електрорушійна сила (ЕРС) машини в тривалому режимі,  $B$ ;

$n_n$  – частота обертання якоря в тривалому режимі,  $об/хв$ .

Магнітна індукція в перерізі зубця на  $1/3$  висоти паза,  $Tл$ ,

$$B_{z_{1/3}} = \frac{\Phi_0}{Q_{z_{1/3}}}. \quad (7.18)$$

Вона не має перевищувати  $2,3 Tл$ .

Розрахунок опору обмотки якоря при  $20^\circ C$ ,  $Ом$ , виконується за формулою

$$r_{я20} = \frac{l \cdot N}{57 g_{я} \cdot (2a)^2}, \quad (7.19)$$

де  $1/57$  – питомий опір обмоткової міді при  $+20^\circ C$ ,  $Ом \text{ мм}^2/м$ ;

$l$  – довжина провідника,  $м$ ,  $l = L_{я} + 1/3\tau$ ;

$g_{я}$  – площа перерізу провідника обмотки,  $мм^2$ .

Опір обмотки якоря при  $+100^\circ C$

$$r_{я100} = 1,34 r_{я20}. \quad (7.20)$$

## **8 ВИБІР КІЛЬКОСТІ І РОЗМІРІВ ЩІТОК ТА ВИЗНАЧЕННЯ РОБОЧОЇ ДОВЖИНИ КОЛЕКТОРА**

Число щіткотримачів приймається рівним числу головних полюсів ( $2p_{щ} = 2p$ ) [3, 4].

Густина струму під щіткою у сучасних тепловозних двигунах вибирається в межах  $\Delta_{щ} = 11 \div 15 A/cm^2$ .

Площа торкання щітки одного щіткотримача до колектора,  $см^2$ ,

$$Q_{щ} = \frac{I_{дн}}{\Delta_{щ} \cdot p_{щ}}. \quad (8.1)$$

Задаючись величиною щіткового перекриття  $\gamma = \frac{b_{щ}}{t_{к}} = 2 \div 5$ ,  
визначаємо ширину щітки  $b_{щ} = \gamma t_{к}$ .  
Довжина щітки, см,

$$l_{щ} = \frac{Q_{щ}}{n_{щ} \cdot b_{щ}}, \quad (8.2)$$

де  $n_{щ}$  – кількість щіток в одному щіткотримачі.

Звичайно щітки тягових електродвигунів мають ширину 10; 12,5; 16; 20; 25 мм і довжину 32; 40 і 50 мм. Кількість щіток в одному щіткотримачі вибирають в межах  $n_{щ} = 2 \div 4$ .

Повна довжина колектора, см,

$$L_{к} = n_{щ} \cdot l_{щ} + 1,5. \quad (8.3)$$

Остаточо

$$Q_{щ} = n_{щ} \cdot b_{щ} \cdot l_{щ}, \text{ см}^2; \quad (8.4)$$

$$\Delta_{щ} = \frac{I_{дн}}{Q_{щ} \cdot p_{щ}}, \text{ А/см}^2. \quad (8.5)$$

За вимогами міцності колектор перевіряється на максимальну колову швидкість

$$v_{к \text{ max}} = \frac{\pi \cdot D_{к} \cdot n_{\text{max}}}{60} \leq 55 \text{ м/с}, \quad (8.6)$$

де  $n_{\text{max}}$  – частота обертання якоря двигуна при максимальній (конструкційній) швидкості тепловоза, об/хв.

## 9 РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО КОЛА ДВИГУНА

Спочатку слід розробити ескіз магнітного кола тягового двигуна. Магнітне коло складається з п'яти ділянок, з'єднаних послідовно: осердя (ярма) якоря, зубцевого шару якоря, повітряних зазорів, осердя головних полюсів і ярма (спинки) остова. На рисунку 9.1 подано ескіз магнітного кола чотириполюсного двигуна з восьмигранним остовом. Оскільки осьовими лініями головних і додаткових полюсів поперечний переріз машини розбивається на абсолютно однакові сектори, ескіз наводять лише для одного сектора. Побудова ескіза повинна виконуватися в масштабі для можливості визначення значень довжин певних ділянок магнітного кола двигуна [3, 4].

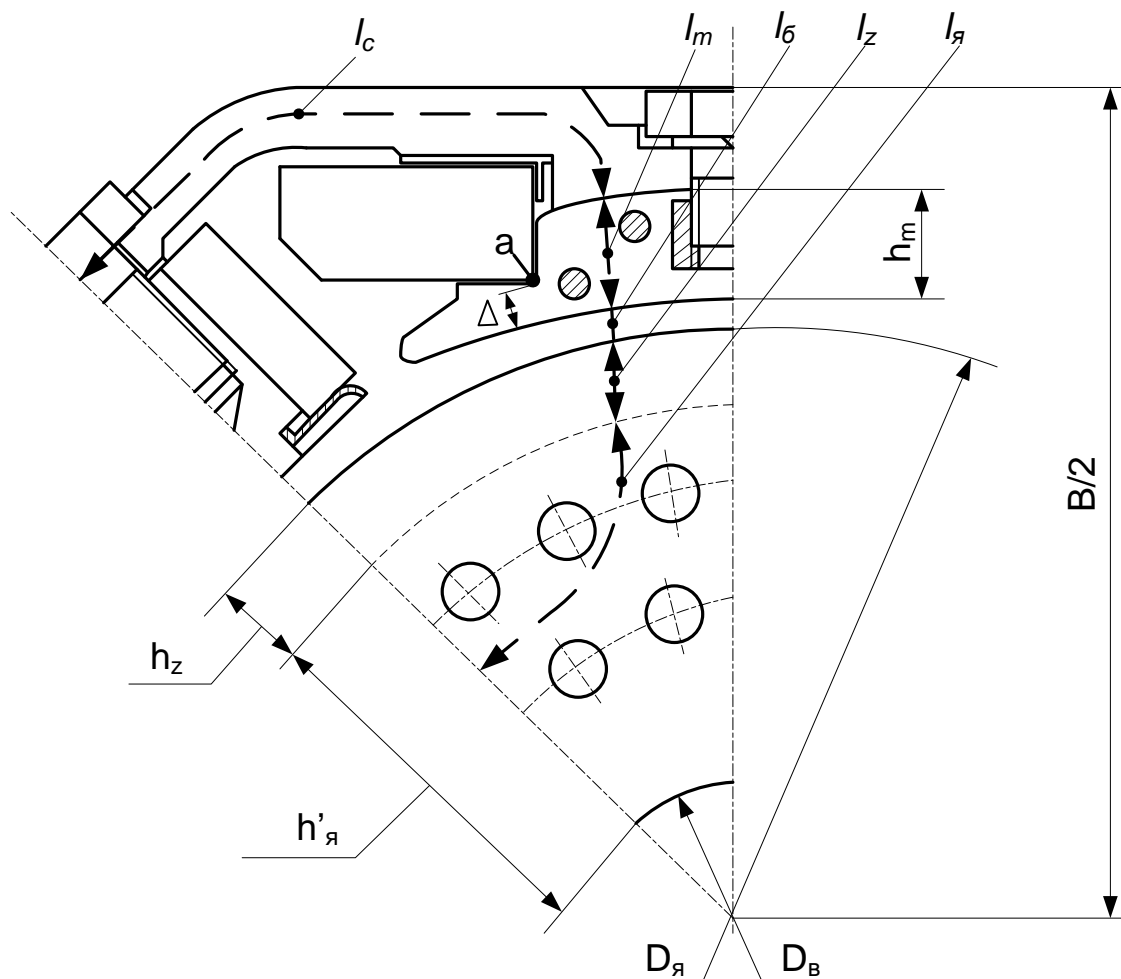


Рисунок 9.1 – Ескіз магнітного кола тягового електродвигуна

При виконанні ескіза магнітного кола машини спочатку проводять зовнішнє коло якоря певного діаметра  $D_{я}$  і за визначеними параметрами  $n_z$  і  $b_n$  і числом пазів  $Z$  визначають висоту зубцевого шару машини  $h_z$ .

Далі визначають активну висоту перерізу осердя (ярма) якоря,  $m$ ,

$$h_{я} = \frac{\Phi_o}{2B_{я} \cdot L_{я} \cdot \kappa_c}, \quad (9.1)$$

де  $B_{я}$  – магнітна індукція в осерді якоря, яка може бути прийнята рівною  $1,4 \div 1,6$  Тл;

$\kappa_c$  – коефіцієнт заповнення осердя сталлю,  $\kappa_c=0,97$ .

Величина  $h_{я}$ , встановлена за формулою (9.1), визначає переріз осердя,  $m^2$ ,

$$S_{я} = h_{я} \cdot L_{я} \cdot \kappa_c, \quad (9.2)$$

по якому замикається потік  $\Phi/2$ . Переріз  $S_{я}$  завантажений половинним значенням потоку полюса  $\Phi_o$  тому, що останній в осерді якоря роздвоюється, замикаючись на сусідні полюси протилежної полярності.

В осерді якоря, як правило, виконують аксіальні вентиляційні канали діаметром  $d_k$ , розташовуючи їх у  $n_k$  рядів, що потребує зазначеного місця в радіальному напрямку. Оцінюють цей розмір виразом  $1/2 d_k n_k$ .

Діаметр каналів  $d_k=20 \div 30$  мм= $0,02 \div 0,03$  м.

Кількість рядів каналів  $n_k=2 \div 3$ , при чому канали розташовують у шаховому порядку так, щоб відстань між їх центрами становила  $(2,5 \div 3,0) d_k$ .

При вказаному розташуванні вентиляційних каналів зв'язок між конструктивною  $h'_{я}$  і активною  $h_{я}$  висотами осердя якоря визначається формулою

$$h'_{я} = h_{я} + \frac{1}{2} d_k \cdot n_k. \quad (9.3)$$

Внутрішній діаметр осердя якоря,  $m$ ,

$$D_{\delta} = D_{\text{я}} - 2(h_z + h'_{\text{я}}) \quad (9.4)$$

водночас є зовнішнім діаметром вала якоря, на який насаджують шихтоване тіло осердя.

Розміри двох ділянок магнітного кола – повітряного зазору і зубцевого шару – були встановлені раніше.

Осьову довжину осердя полюса слід вибрати рівною активній довжині якоря ( $L_m = L_{\text{я}}$ ).

Ширина полюсного осердя  $b_m$  вибирається за допустимою в полюсі індукцією, яку слід вибрати в межах  $B_m = 1,4 \div 1,7 \text{ Тл}$ ,

$$b_m = \frac{\sigma \cdot \Phi_o}{L_m \cdot B_m \cdot \kappa_c}, \quad (9.5)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт розсіювання магнітного потоку головних полюсів,  $\sigma = 1,1$ ;

$\kappa_c$  – коефіцієнт заповнення осердя полюса сталлю,  $\kappa_c = 0,97$ .

Перехід осердя полюса в полюсний наконечник, що утворює заплічники, на які опирається котушка (точка  $a$  на рисунку 9.1), намічають у такому місці, щоб відстань  $\Delta = 4 \div 6 \text{ мм}$ .

Розрахункова полюсна дуга  $b_{\delta}$  визначається за полюсним перекриттям  $\alpha_{\delta}$  і полюсним поділом якоря  $\tau$ :

$$b_{\delta} = \alpha_{\delta} \tau. \quad (9.6)$$

Висоту осердя полюса (розмір по осьовій його лінії від повітряного зазору до внутрішньої поверхні остова) оцінюють попередньо  $h_m = (0,2 \div 0,25)\tau$ .

Остаточний розмір  $h_m$  визначається після розміщення на осерді котушки головного полюса, коли будуть встановлені її розміри.

Довжину станини (корпусу) двигуна попередньо визначають із співвідношення

$$L_c = L_{\text{я}} + 0,4D_{\text{я}}. \quad (9.7)$$

Переріз ярма остова  $Q_c$  визначають, виходячи із вибраного значення індукції  $B_c < 1,4 \text{ Тл, м}^2$ ,

$$Q_c = 0,5 \frac{\sigma \cdot \Phi_o}{B_c}. \quad (9.8)$$

Розрахункова товщина стінки, м,

$$h_c = \frac{Q_c}{L_c}. \quad (9.9)$$

За магнітним потоком  $\Phi_o$  і перетино окремих ділянок  $Q_i$  знаходять індукцію  $B_i$ . Далі, за відповідними кривими і таблицями намагнічування (див. додаток Б), знаходять напруженості магнітного поля  $H_i$ , множачи їх на довжини окремих ділянок магнітного кола  $l_i$ , визначають магніторушійні сили (МРС)  $F_i = H_i l_i$ . Для розрахунків рекомендується скласти таблицю за формою таблиці 9.1, у відповідні графи якої після формул слід вписати отримані за ними числові значення.

Для визначення МРС повітряного зазору необхідно визначити коефіцієнт повітряного зазору  $\kappa_\delta$ , який враховує збільшення шляху магнітного потоку внаслідок зубчастої будови осердя якоря:

$$\kappa_\delta = \frac{t_z + 10\delta}{(t_z - b_n) + 10\delta}. \quad (9.10)$$

Просумувавши намагнічувальні сили всіх ділянок магнітного кола, знаходять сумарну намагнічувальну силу, необхідну для проведення магнітного потоку при роботі машини без навантаження.

Обмотка головних полюсів двигуна служить для створення намагнічувальної сили (НС) полюсів, необхідної для проведення магнітного потоку по магнітному колу. Ця НС,  $A$ , має дорівнювати сумі магнітних напруг на ділянках магнітного кола і розмагнічувальної сили реакції якоря, тобто

$$\sum F = \sum_{i=1}^5 H_i l_i + F_{\text{ря}}'. \quad (9.11)$$

Повна НС,  $A$ , якоря визначається за формулою

$$F_{\text{ря}} = \frac{A \cdot \tau}{2}, \quad (9.12)$$

а розмагнічувальна сила враховується коефіцієнтом  $\kappa_p$ , який у тривалому режимі приймається рівним  $\kappa_p = 0,125$ . Тоді повна НС,  $A$ , обмотки збудження головних полюсів дорівнюватиме

$$\sum F = \sum_{i=1}^5 H_i l_i + 0,125 \frac{A \cdot \tau}{2}. \quad (9.13)$$

Струм, що протікає по котушці головного полюса,  $A$ ,

$$i_{\epsilon} = \frac{I_{\text{дн}}}{a_m}, \quad (9.14)$$

де  $a_m$  – число паралельних витків обмотки збудження головних полюсів, рекомендується приймати  $a_m = 1$ .

Число витків у котушці

$$w_m = \frac{\sum F}{i_{\epsilon}}. \quad (9.15)$$

Площа перерізу провідника визначається за допустимою густиною струму  $g_{\epsilon} = i_{\epsilon} / \Delta_{\epsilon}$  ( $\Delta_{\epsilon} = 4,0 \div 7,5 \text{ А/мм}^2$ ).

З визначеної площі поперечного перерізу із ряду стандартних розмірів (дивись вище визначення розмірів провідника обмотки якоря) обираються розміри провідника.

Таблиця 9.1 – Визначення магнітних напруг (намагнічувальних сил) ділянок магнітного кола машини

Ділянка магнітного кола	Довжина ділянки $l_i, \text{см}$	Переріз ділянки $Q_i, \text{м}^2$	Магнітна індукція $B_i, \text{Тл}$	Питома НС $H_i, \text{А/см}$	Магнітна напруга (НС) $F_i, \text{А}$
Повітряний зазор	$l_\delta = \delta \kappa_\delta$	$Q_\delta = \alpha \tau L_\delta$	$B_\delta = \Phi_\sigma / Q_\delta$	$H_\delta = 0,8 B_\delta 10^4$	$F_\delta = H_\delta l_\delta$
Зубці якоря	$l_z = h_z = h_n$	$Q_{z1/3} = \alpha \frac{Z}{2p} \times b_{z1/3} L_\delta \kappa_u$	$B_{z1/3} = \Phi_\sigma / Q_{z1/3}$	З таблиць намагнічування (дивись додаток Б)	$F_z = H_z l_z$
Осердя якоря	$l_\delta$ визначається за ескізом	$Q_\delta = 2h_\delta L_\delta \kappa_u$	$B_\delta = \Phi_\sigma / Q_\delta$	Те саме	$F_\delta = H_\delta l_\delta$
Полюс	$l_m = h_m$	$Q_m = b_m L_\delta \kappa_u$	$B_m = \sigma \Phi_\sigma / Q_m$	“	$F_m = H_m l_m$
Станина (корпус)	$l_c$ визначається за ескізом	$Q_c = h_c L_c$	$B_c = \sigma \Phi_\sigma / 2Q_c$	“	$F_c = H_c l_c$

При розрахунку розмірів котушки головного та додаткового полюса приймаються:

- товщина пружинного фланця, що кріпить котушку, в середньому у головних полюсів 3 мм, у додаткових полюсів 2 мм;
- товщина немагнітних прокладок (як правило, латунних) між осердям додаткового полюса і остовом 3 ÷ 4 мм;
- товщина зовнішньої ізоляції котушок 3 мм;
- товщина ізоляції між витками 0,35 мм.

При розрахунку ширини котушки головного полюса враховується розпушення витків, яке досягає 5%. Розміри провідників та їх розміщення підбирається таким чином, щоб відстань між котушками головних і додаткових полюсів було 12 ÷ 15 мм. Потім за результатами компоновки котушки головного полюса уточнюється висота осердя головного полюса  $h_m$ .

Середня довжина витка котушки головного полюса, м,

$$l_s = 2(b_m + L_m) + \pi \cdot b_K, \quad (9.16)$$



де  $b_k$  – ширина котушки,  $b_k \approx 50-70$  мм.

Опір обмотки збудження (головних полюсів) за аналогією з якірною обмоткою (8.19, 8.20), Ом:

а) при  $20^\circ\text{C}$

$$r_{e20} = \frac{2p \cdot w_m \cdot l_g}{57 a_m^2 \cdot g_g}$$

б) при  $100^\circ\text{C}$  (тобто у випадку перевищення температури  $+80^\circ\text{C}$ )

$$r_{e100} = 1,34 r_{e20} \cdot$$

Магнітний потік додаткових полюсів має компенсувати реакцію якоря і відтворювати комутуючий потік для компенсації реактивної ЕРС комутуючих секцій обмотки якоря. Останнє враховується коефіцієнтом, що дорівнює  $1,15$ . У результаті НС, А, додаткових полюсів визначається за формулою

$$F_{\partial n} \approx 1,15 F_{ря}. \quad (9.17)$$

Число витків обмотки додаткових полюсів

$$w_{\partial n} = \frac{F_{\partial n}}{i_{\partial n}}, \quad (9.18)$$

де  $i_{\partial n}$  – струм у котушці головного полюса, А,

$$i_{\partial n} = \frac{I_{\partial n}}{a_{\partial n}}, \quad (9.19)$$

де  $a_{\partial n}$  – число паралельних витків обмотки,  $a_{\partial n} = 1$ .

Площа перерізу провідника котушки додаткового полюса

$$g_{\partial n} = \frac{i_{\partial n}}{\Delta_{\partial n}}, \quad (9.20)$$

де  $\Delta_{\partial n} = 4,0 \div 8,0$  А/мм<sup>2</sup> – густина струму в провіднику котушки.

За площею перерізу із ряду стандартних розмірів вибираються розміри провідника котушки.

Середня довжина витка котушки додаткового полюса

$$l_{\partial n} = 2L_{\partial} + \pi(b_{\kappa \partial n} + b_{\partial n m}), \quad (9.21)$$

де  $b_{\kappa \partial n} \approx 30$  мм – ширина котушки полюса;

$L_{\partial}$  – довжина полюса, яку слід прийняти рівною довжині активної частини якоря,  $L_{\partial} = L_{\text{я}}$ .

Ширина осердя

$$b_{\partial n m} = (1,1 \div 1,5)t_{z1}. \quad (9.22)$$

Повітряний зазор під полюсом  $\delta_{\partial n} = (1,5 \div 2,1)\delta$ .

Опір обмотки за виразами (9.19, 9.20), Ом,

а) при  $20^{\circ}\text{C}$

$$r_{\partial n 20} = \frac{2\rho \cdot w_{\partial n} \cdot l_{\partial n}}{57 a_{\partial n}^2 \cdot g_{\partial n}};$$

б) при  $100^{\circ}\text{C}$  (тобто у випадку перевищення температури  $+80^{\circ}\text{C}$ )

$$r_{\partial n 100} = 1,34 r_{\partial n 20}.$$

На рисунку 9.2 подано ескіз полюсного вікна двигуна.

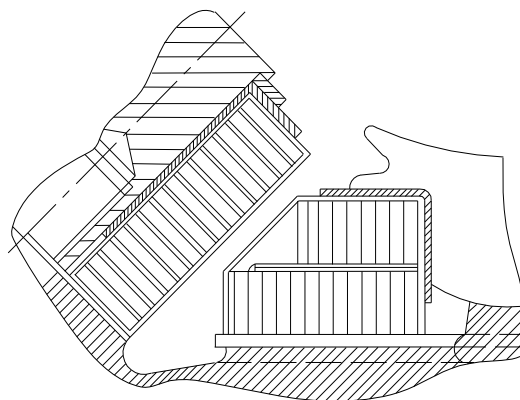


Рисунок 9.2 – Ескіз полюсного вікна тягового електродвигуна

## 10 ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ (ККД) ТЯГОВОГО ДВИГУНА

ККД електродвигуна [4]

$$\eta_{\partial} = 1 - \frac{\sum \Delta P}{U_{\partial n} \cdot I_{\partial n}}, \quad (10.1)$$

де  $\sum \Delta P$  – сума втрат електродвигуна, *Вт*,

$$\sum \Delta P = \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{пер}} + \Delta P_{\text{ст.}} + \Delta P_{\text{доод}} + \Delta P_{\text{мех.}}, \quad (10.2)$$

де  $\Delta P_{\text{м}}$  – електричні втрати в міді, *Вт*;

$\Delta P_{\text{пер}}$  – втрати в перехідному контакті між щітками і колектором, *Вт*;

$\Delta P_{\text{ст.}}$  – втрати в сталі, *Вт*;

$\Delta P_{\text{доод}}$  – додаткові втрати, *Вт*;

$\Delta P_{\text{мех}}$  – механічні втрати, *Вт*.

**Електричні втрати (втрати в міді), *Вт*,**

$$\Delta P_{\text{м}} = I_{\partial n}^2 \cdot (r_{\text{я}} + r_{\text{в}} + r_{\partial n}). \quad (10.3)$$

**Перехідні втрати в контакті між щітками і колектором**

$$\Delta P_{\text{пер}} = \Delta U_{\text{щ}} I_{\partial n}, \quad (10.4)$$

де  $\Delta U_{\text{щ}} = 2 \div 3$  В – падіння напруги між щітками різних полярностей.

**Втрати в сталі, *Вт***

$$\Delta P_{\text{ст.}} = 3(\Delta P_{\text{я}} G_{\text{я}} + \Delta P_{\text{z}} G_{\text{z}}), \quad (10.5)$$

де  $\Delta P_{\text{я}}$  і  $\Delta P_{\text{z}}$  – відповідно постійні втрати в сталі осердя та зубців якоря, *Вт/кг*, що визначаються за формулами:

$$\Delta P_{я} = \left[ 4,4 \frac{f}{100} + 5,6 \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right] \cdot B_{я}^2; \quad (10.6)$$

$$\Delta P_{z} = \left[ 4,4 \frac{f}{100} + 5,6 \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right] \cdot B_{z}^2; \quad (10.7)$$

$G_{я}$  і  $G_{z}$  – маси відповідно осердя і зубців якоря, кг;

$$G_{я} = \frac{\pi \cdot (D_{я} - 2h_z)^2 - D_{в}^2 - m_{к} \cdot d_{к}^2}{4} \cdot L_{я} \cdot \kappa_{и} \cdot 7,8 \cdot 10^{-3}, \quad (10.8)$$

$$G_{z} = Z \cdot h_z \cdot b_{zcp} \cdot L_{я} \cdot \kappa_{и} \cdot 7,8 \cdot 10^{-3}, \quad (10.9)$$

де  $m_{к}$  – число вентиляційних каналів в осерді якоря.

Частота перемагнічування залежить від частоти обертання якоря та кількості полюсів, Гц,

$$f = pn/60 \quad (10.10)$$

**Додаткові втрати  $\Delta P_{\text{дод}}$ , Вт,** визначаються в частках втрат у сталі залежно від струму двигуна:

$I_{\text{д}}/I_{\text{дн}}:$	0,2	0,6	0,8	1,0	1,3	1,6	2,0
$\Delta P_{\text{дод}}/\Delta P_{\text{ст}}:$	0,22	0,23	0,26	0,30	0,38	0,48	0,65

**Механічні втрати, Вт,**

$$\Delta P_{\text{мех.}} = \Delta P_{\text{триц}} + \Delta P_{\text{підш}}; \quad (10.11)$$

а) втрати від тертя щіток по колектору, Вт,

$$\Delta P_{\text{триц}} = 0,92 P_{\text{щ}} Q_{\text{щ}} v_{к}, \quad (10.12)$$

де  $v_{к}$  – колова швидкість на колекторі, м/с;

б) втрати на тертя в підшипниках, Вт,

$$\Delta P_{\text{підш}} = 0,002 U_{\text{д}} I_{\text{д}}. \quad (10.13)$$

Підведена до двигуна потужність,  $Вт$ ,

$$P_{nd} = U_{дн} I_{дн}. \quad (10.14)$$

Потужність на валу двигуна,  $Вт$ ,

$$P_{\partial} = P_{nd} - \Sigma \Delta P. \quad (10.15)$$

## 11 РОЗРАХУНОК ТА ПОБУДОВА ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОГО ДВИГУНА

### 11.1 Магнітна характеристика (характеристика холостого ходу)

Результати розрахунків магнітної характеристики зводяться в таблицю 11.1. При розрахунку приймається, що магнітний потік  $\Phi_0$  визначено для тривалого режиму роботи машини. Тому для позначення величин магнітних потоків на часткових режимах вводиться позначення  $\Phi_{оч}$  у частках від основного потоку тривалого режиму [4, 5]. За даними таблиці 11.1 для кожного значення потоку і намагнічувальних сил головних полюсів будується магнітна характеристика (характеристика холостого ходу)  $\Phi_{оч} = f(i_{зб})$  (рисунок 11.1).

Таблиця 11.1 – Розрахунок магнітної характеристики тягового двигуна

Ділянка	$Q, м^2$	$l, м$	$\Phi_{1оч}=0,5\Phi_0$			$\Phi_{2оч}=0,75\Phi_0$			$\Phi_{3оч}=1,0\Phi_0$			$\Phi_{4оч}=1,15\Phi_0$			$\Phi_{5оч}=1,25\Phi_0$		
			$B_i$	$H_i$	$F_i$	$B_i$	$H_i$	$F_i$	$B_i$	$H_i$	$F_i$	$B_i$	$H_i$	$F_i$	$B_i$	$H_i$	$F_i$
Зубці																	
Якір																	
Повітряний проміжок																	
Полюс																	
Станина																	
Сумарна намагнічувальна сила $F_0 = \sum_1^5 F_i$																	
$i_e = \frac{F_0}{w_e}$																	

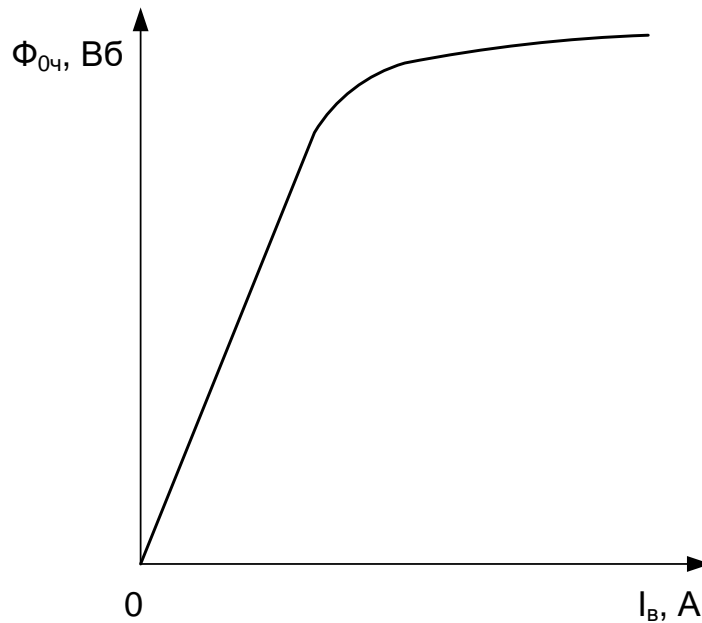


Рисунок 11.1 – Магнітна характеристика

### 11.2 Характеристика ККД тягового електродвигуна на ободі коліс

$$\eta_{\text{обкн}} = \eta_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{зн}} \quad (11.1)$$

### 11.3 Побудова регулювальних характеристик передачі потужності

Регулювальні характеристики передачі потужності показують зміну значення струму і напруги тягового генератора від швидкості локомотива.

Результати розрахунків зводяться в таблицю 11.2.

Таблиця 11.2 – Результати розрахунків регулювальних характеристик

	$I_z, A$	$U_z, B$	$I_{mд}, A$	$U_{mд}, B$	ПП ( $\alpha=1$ )						
					$I_b, A$	$\Phi, Bб$	$I_{mд}R_{я}, B$	$n_{mд}, об/хв$	$v, км/год$	$M, Нм$	$F_k, кН$
1											
2											
3											
4											
5											

Продовження таблиці 11.2

	ОП1						ОП2					
	$I_{\infty},$ $A$	$\Phi,$ $B\bar{b}$	$n_{m\partial},$ $об/хв$	$v,$ $км/год$	$M,$ $НМ$	$F_{\kappa},$ $кН$	$I_{\infty},$ $A$	$\Phi,$ $B\bar{b}$	$n_{m\partial},$ $об/хв$	$v,$ $км/год$	$M,$ $НМ$	$F_{\kappa},$ $кН$
1												
2												
3												
4												
5												

**Примітка.** Рядок 1 таблиці відповідає максимальному струму ТЕД (ТГ) ( $I_{max}$ ), рядок 2 – півсумі максимального і номінального струму ( $(I_{max}+I_{\infty})/2$ ), рядок 3 – номінальному струму ( $I_{\infty}$ ), рядок 4 – півсумі номінального і мінімального струму ( $(I_{\infty}+I_{min})/2$ ), рядок 5 – мінімальному струму ( $I_{min}$ ).

Значення магнітного потоку  $\Phi$  визначаються відповідно до даних таблиці 11.1 і за магнітною характеристикою (рисунок 11.1).

Частота обертання вала тягового двигуна,  $об/хв$ ,

$$n_{m\partial} = \frac{(U_{m\partial} - I \cdot \sum R_{\gamma})}{c_e \cdot \Phi} \quad (11.2)$$

Швидкість руху, що відповідає частоті обертання  $n$  вала ТЕД,  $км/год$ ,

$$v = 0,188 \cdot D_{\kappa} \cdot \frac{n}{i}, \quad (11.3)$$

Обертальний момент на валу ТЕД визначається за формулою,  $кНм$ ,

$$M = 9,55 \cdot U_{m\partial} \cdot I_{m\partial} \cdot \frac{\eta_{m\partial}}{n_{m\partial}} \cdot 10^{-3}. \quad (11.4)$$

Сила тяги тепловоза,  $кН$ ,

$$F_{\kappa} = 2 \cdot i \cdot \eta_{zn} \cdot \frac{M}{D_{\kappa}}. \quad (11.5)$$

За даними таблиці 11.2 будується регульовальна характеристика (приклад характеристики показано на рисунку 11.2).

За даними таблиці 11.2 необхідно побудувати електромеханічні (рисунок 11.3) та електротягові (рисунок 11.4) характеристики тягового електродвигуна. На основі електротягових характеристик ТЕД, враховуючи, що сила тяги локомотива являє собою сумарну силу тягу ТЕД, а потужність – добуток сили тяги на швидкість,  $кВт$ ,

$$N_k = F_k \cdot v / 3,6, \quad (11.6)$$

будується тягова характеристика ( $F_k = f(v)$ ) і характеристика потужності ( $N_k = f(v)$ ) тепловоза (рисунок 11.5). За формулою (2.5) слід розрахувати значення сили тяги тепловоза, значення  $\psi_k = 0,25 + \frac{8}{100 + 20 \cdot v}$  розрахувати для діапазону швидкості від 0 км/год до 40 км/год через кожні 10 км/год.

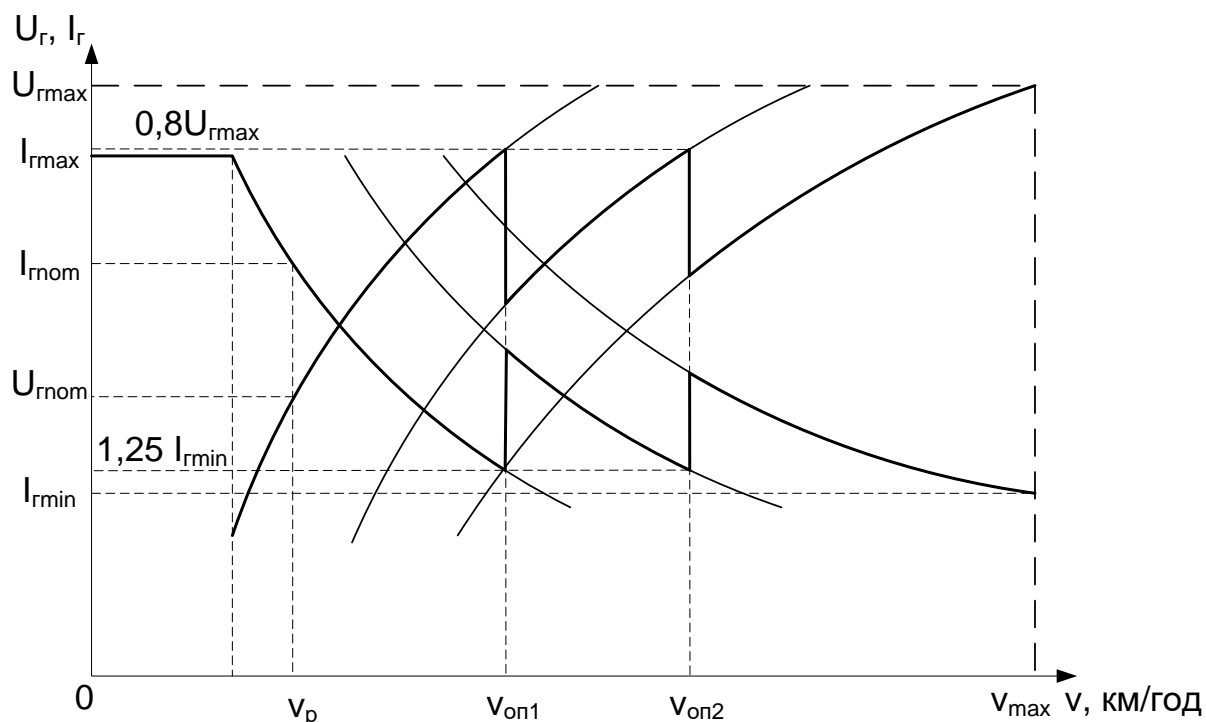


Рисунок 11.2 – Регульовальні характеристики електропередачі



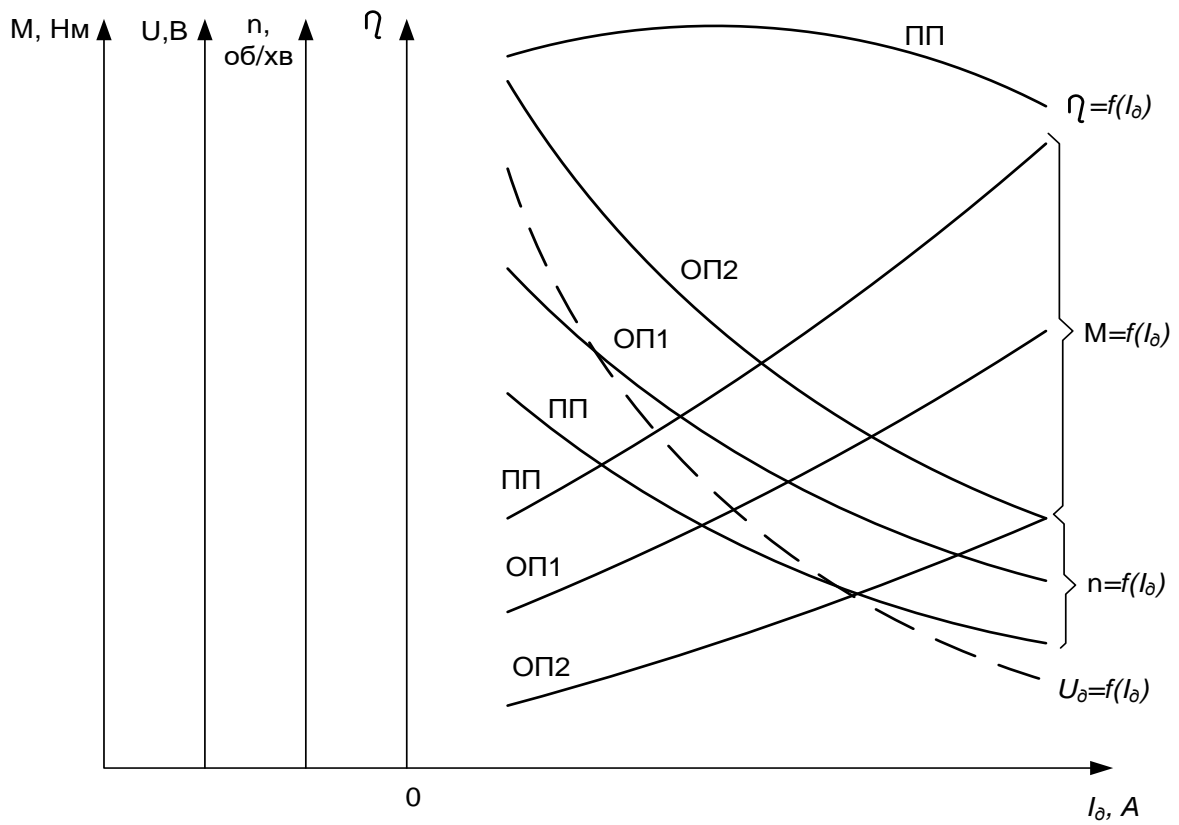


Рисунок 11.3 – Електромеханічні характеристики ТЭД

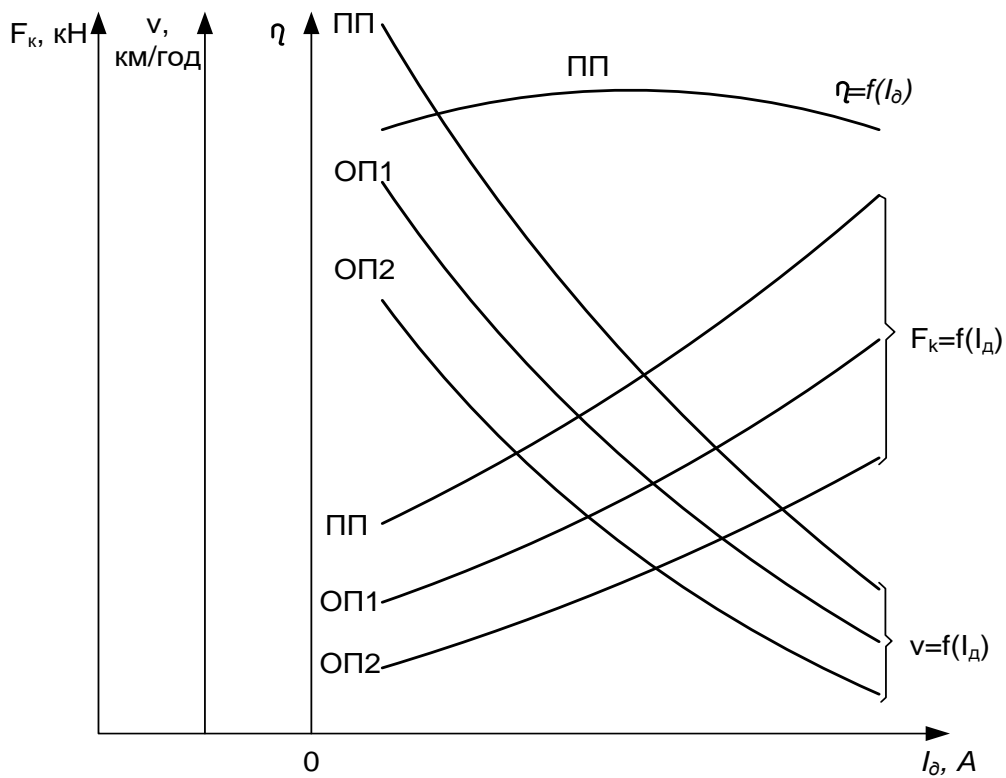


Рисунок 11.4 – Електротягові характеристики ТЭД

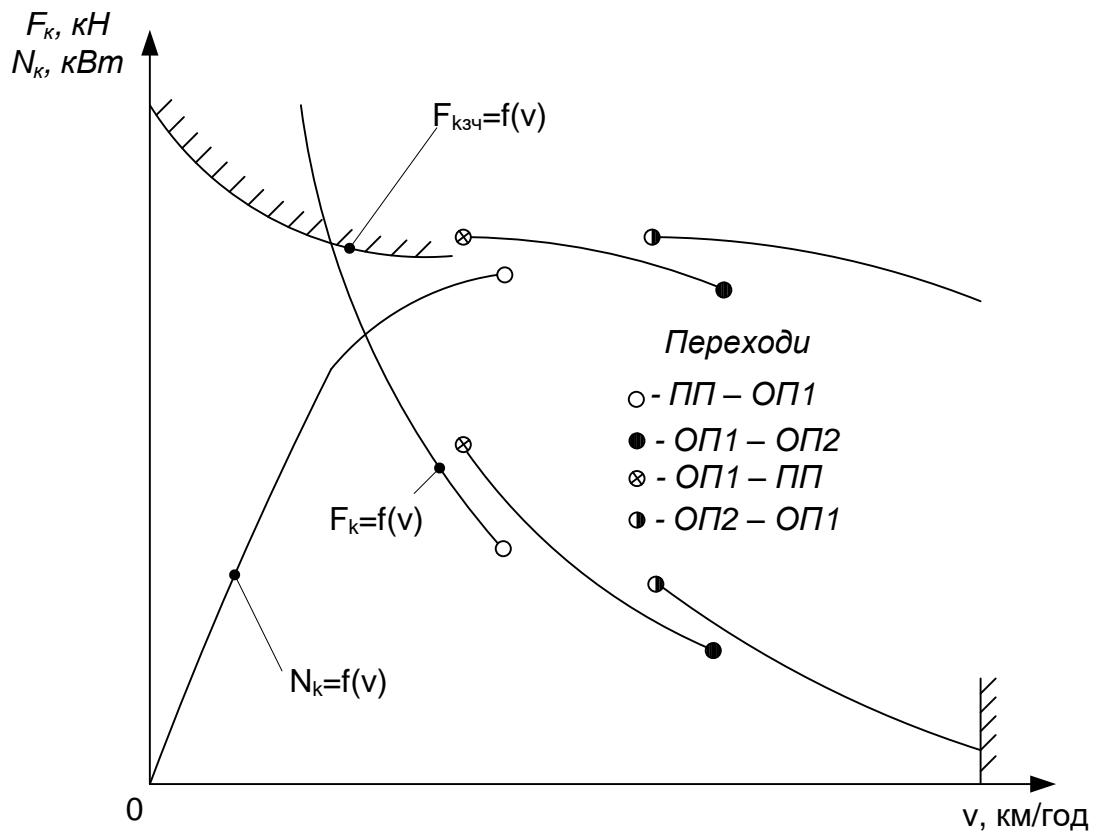


Рисунок 11.5 – Тягова та потужнісна характеристики тепловоза

## 12 ГАЛЬМІВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ ПОТУЖНОСТІ ТЕПЛОВОЗА

При переведенні тягових електродвигунів у гальмівний режим вони вимикаються від тягового генератора, їхні якірні обмотки під'єднуються до гальмівних резисторів, а обмотки збудження – до регульованого джерела живлення [2, 3].

Такий двигун у гальмівному режимі, так само, як і в тяговому режимі, має ряд обмежень, якими визначаються межі регулювання гальмівної сили, тому гальмівні характеристики поділяються на два види: граничні та регульовальні (часткові).

Граничні характеристики визначаються деякими максимально допустимими параметрами системи електричного гальмування, до яких належать:

1) максимальний струм збудження тягового електродвигуна, допустимий за умовою нагрівання котушок головних полюсів;

2) максимальний гальмівний струм, який обмежений нагріванням обмотки якоря двигуна та гальмівних резисторів;

3) максимальна гальмівна сила за умовами зчеплення коліс з рейками;

4) максимальне значення реактивної ЕРС у секції обмотки якоря. Цей параметр, який є критерієм, може бути визначений як добуток струму якоря тягового електродвигуна на його частоту обертання, тобто  $I_{я} n_{мд}$ .

У роботі необхідно визначити граничні характеристики електричного гальма за першими трьома параметрами. Максимальний струм збудження та максимальний гальмівний струм (максимальний струм якоря) приймають рівними струму тривалого режиму тягового двигуна:

$$B_{max} = F_{кр}. \quad (12.1)$$

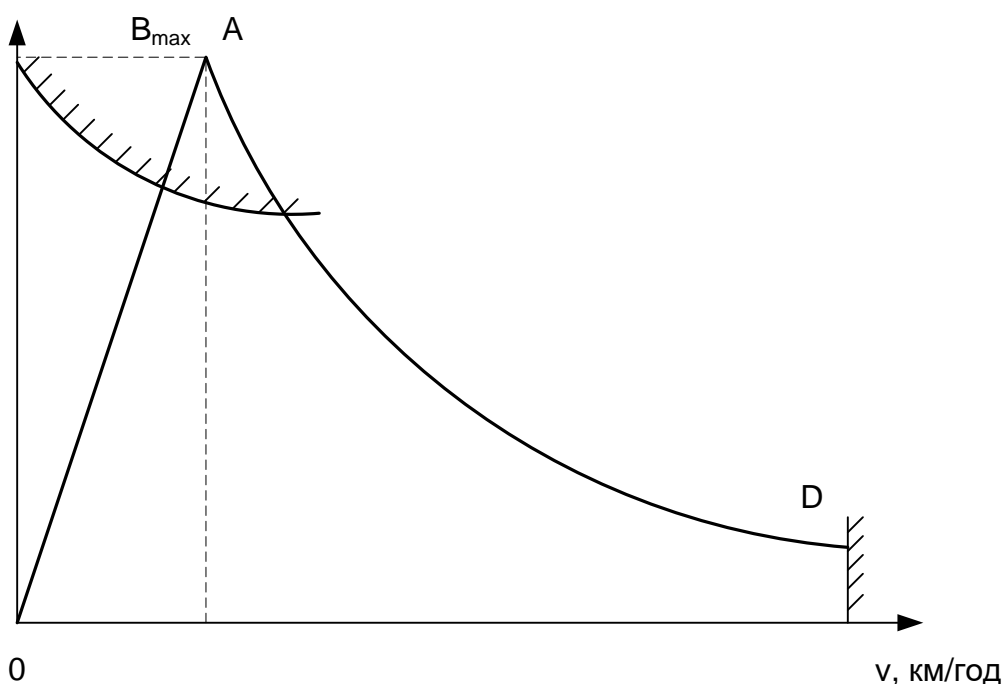


Рисунок 12.1 – Граничні характеристики електричного гальма

Максимальна гальмівна потужність може бути отримана за умови

$$V_{min} = \kappa_2 V_p, \quad (12.2)$$

де  $\kappa_2 = 1,4 \div 1,6$ .

Звичайно значення  $V_{min}$  приймається дещо меншим за вказану величину:

$$V_{min} = (0,8 \div 0,9) \kappa_2 V_p. \quad (12.3)$$

Тоді лінія  $OA$  (рисунок 12.1) описується рівнянням

$$B = F_{кр} \cdot \frac{V_p}{V_{min}}. \quad (12.4)$$

Лінія  $AD$ , що має форму гіперболи, в усіх точках якої гальмівна потужність (добуток гальмівної сили на швидкість) незмінна, описується рівнянням

$$B = F_{кр} \cdot \frac{V_{min}}{V}. \quad (12.5)$$

Гальмівна потужність,  $кВт$ ,

$$P_2 = 0,278 \cdot B_{max} \cdot V_{min}. \quad (12.6)$$

Потужність системи електричного гальма тепловоза на затискачах тягових електродвигунів

$$P'_2 = P_2 \cdot \eta_{мд} \cdot \eta_{zn}. \quad (12.7)$$

Напруга на гальмівному резисторі

$$U_2 = \frac{P'_2}{m_{мд} \cdot I_{мдном}}. \quad (12.8)$$

Еквівалентний опір гальмівного резистора

$$R_2 = \frac{U_2}{I_{мдном}}. \quad (12.9)$$

Крива обмеження гальмівної сили за зчепленням коліс з рейками при електричному гальмуванні

$$B_{зч} = P_{зч} \cdot \psi_{кз}, \quad (12.10)$$

де  $\psi_{кз} = 0,094 + 4/(27,5 V)$ .

За результатами розрахунків побудувати гальмівну характеристику передачі за аналогією до рисунка 12.1.

При розробленні силової схеми електричного гальма тепловоза взяти за зразок електричну схему електричного гальма одного з тепловозів з електричним гальмом. У пояснювальній записці дати стислий опис роботи силової схеми електричного гальма.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Коновалов С. В., Козар Л. М. Студентська навчальна звітність. Текстова частина (пояснювальна записка). Загальні вимоги до побудови, викладення та оформлення: метод. посіб. з додержання вимог нормоконтролю у студентській навчальній звітності. Харків: УкрДАЗТ, 2004. 38 с.

2 Калиниченко Ю. С., Кузнецов А. І. Тягові електричні машини. Двигуни постійного струму: навч. посіб. Харків: ХНАМГ, 2004. 218 с.

3 Безрученко В. М., Варченко В. К., Чумак В. В. Тягові електричні машини електрорухомого складу: навч. посіб. Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. 252 с.

4 Проектування електричних машин: навч. посіб. / Д. В. Циценков, О. Б. Іванов, О. В. Бобров, В. В. Кузнецов, В. В. Артемчук, М. О. Баб'як; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпропетровськ: НТУ «ДП», 2020. 408 с.

5 Електричні машини і апарати: навч. посіб. / Ю. М. Куценко, В. Ф. Яковлев та ін. Київ: Аграрна освіта, 2013. 449 с.

## ДОДАТОК А (довідковий)

### Довідкові дані електрообладнання локомотивів

Таблиця А.1 – Потужність, яку використовує допоміжне обладнання тепловозів, *кВт*

Найменування обладнання	Серія тепловоза						
	2ТЕ10В(М)	ТЕП60	ТЕП70	ТЕМ2	ТЕМ7	ТЕ109	2ТЕ116
Вентилятори холодильника дизеля	121,4	132,5	166,9	37,5	56,6	107,5	183,2
Вентилятори охолодження тягових електродвигунів	22,0	22,1	–	8,8	70,0	25,0	47,3
Вентилятор охолодження тягового генератора	18,4	18,1	74,1	–	–	22,8	34,5
Компресор	44,2	37,5	–	36,8	35,0	46,4	–
Двомашинний агрегат	27,2	32,6	43,3	11,4	13,0	33,9	50,0
Інше обладнання	5,5	1,3	–	–	19,0	11,8	–
Загальна потужність усього допоміжного обладнання	238,7	244,1	284,3	97,5	193,6	247,4	315,0
Частка (у відсотках) від потужності дизеля	10,9	11,1	9,7	10,7	13,2	11,2	14,3

**Примітка.** Потужність приведена до колінчастого вала дизеля. Для кожного агрегату вказана максимальна потужність.

Таблиця А.2 – Основні технічні дані тягових генераторів постійного струму

Показники	Одиниця вимірювання	Тип генератора					
		ГПЗ11БУ	ГПЗ00БУ	ТД-802	ГПЗ11БУ	ГПЗ12У	
Серія тепловоза	–	2ТЕ10В(М)	ТЕМ2	ЧМЕЗ	ТЕП60	2М62	
Потужність	<i>кВт</i>	2000	780	885	2000	1270	
Напруга: тривала	<i>В</i>	465	645	377	462	356	
	<i>В</i>	700	870	565	635	570	
Струм тривалий	<i>А</i>	4320	1210	2350	4320	3570	
Максимальна кутова швидкість якоря	<i>рад/с</i>	89,0	78,5	78,5	78,5	78,5	
ККД	<i>%</i>	93,8	94,0	–	95,4	94,5	
Маса	<i>кг</i>	8700	4800	4700	9000	7400	
Обертальний момент	<i>10<sup>3</sup> Н м</i>	224,7	9,94	11,27	20,96	16,18	
Показник маси:							
	<i>С<sub>м</sub></i>	<i>кг/Н м</i>	0,387	0,483	0,417	0,429	0,457
	<i>С<sub>р</sub></i>	<i>кг/кВт</i>	4,35	6,15	5,31	4,72	5,83

Таблиця А.3 – Основні технічні дані тягових синхронних генераторів

Показники	Одиниця вимірювання	Тип генератора		
		ГС501АУ1	ГС504А	ГС515У2
Серія тепловоза	–	2ТЕ116	ТЕП70	ТЕМ7
Потужність	<i>кВт</i>	2190	2750	1400
Напруга:				
тривала	<i>В</i>	300	360	175
максимальна	<i>В</i>	535	580	280
Сила струму (тривалий)	<i>А</i>	2х2440	2х2400	2х2500
Максимальна кутова швидкість ротора	<i>рад/с</i>	104,6	104,6	104,6
ККД	<i>%</i>	93,8	95,0	95,5
Маса	<i>кг</i>	6000	6500	4800
Обертальний момент	<i>10<sup>2</sup> Н м</i>	209,4	262,9	133,8
Показник маси:				
<i>С<sub>м</sub></i>	<i>кг/Н м</i>	0,287	0,247	0,359
<i>С<sub>р</sub></i>	<i>кг/кВт</i>	2,74	2,36	3,43



Таблиця А.4 – Основні технічні дані тягових агрегатів тепловозів

Показники	Одиниця вимірювання	Тип тягового агрегату					
		А711У2		А713У2		А714УХЛ	
		ТГ	ДГ	ТГ	ДГ	ТГ	ДГ
Серія тепловоза	–	ТЕ120		ТЕП75		2ТЕ121	
Потужність	<i>кВт</i>	2800	400	4060	810	2800	630
Напруга: тривала максимальна	<i>В</i>	350	400	525	215	366	400
	<i>В</i>	575	–	770	–	580	–
Струм генератора тривалий	<i>А</i>	2х2480	2х258	2х2440	2х1160	2х2400	2х570
Максимальна кутова швидкість	<i>Рад/с</i>	104,6	104,6	115,1	115,1	104,6	104,6
ККД	<i>%</i>	–	–	–	–	–	–
Маса	<i>кг</i>	6500		9200		8200	
Обертальний момент	<i>10<sup>2</sup> Н м</i>	305,9		423,1		327,9	
Показник маси:							
	<i>См</i>	<i>кг/Н м</i>	0,212	0,217	0,250		
	<i>Ср</i>	<i>кг/кВт</i>	2,03	1,89	2,39		

**Примітка.** ТГ – тяговий генератор, ДГ – допоміжний генератор.

Таблиця А.5 – Основні параметри тягових двигунів локомотивів

Тип електродвигуна	Потужність, кВт	Напруга, В ном./макс.	Струм, А ном./мін.	Струм, А макс.	Частота обертання, рад/с	ККД макс., %	Маса, кг	Статичний тиск/виртального повітря, Па / м <sup>3</sup> /с	Централь, мм	Серія локомотива
Тепловози										
ЕД108А	305	475/635	700/525	1100	195	91,5	3350	1180/1,17	520	ТЕП60
ЕД118А	305	463/700	720/476	1100	233	91,5	3100	1570/1,33	468,8	2ТЕ116, 2ТЕ10В, 2ТЕ10М
ЕД118Б	305	463/700	720/476	1100	240	91,6	3100		468,8	Те ж
ЕД121	413	542/750	830/600		243	91,8	2950	1374/1,67	502	ТЕП70
ЕД120АУ1	136	208/360	456/790	1160	198	83,0	3000	-1,5		ТЕМ7
ТЕ006	123/134	197/283	750/522		275		2540			ЧМЕ3
Електровози змінного струму										
НБ412К	675/755	1600/1850	450/515		175	94/93,4	4850	590/1,83	617,5	ВЛ60
НБ418К6	740/790	950/1180	820/880		214	94,8/94,5	4350	2160/1,75	594	ВЛ80
НБ407Б	720/755	1500/1925	510/535		172	-94,1	5000	1230/1,42	632	ВЛ82
НБ514	780/835	980/-	843/905		97/95	94,5/94,1	4300			ВЛ85
АЛ4442Нр	820/850	800/-	1100/1140		127/125	93,7/93,6	2950			ЧС4
Електровози постійного струму										
ТЛ2К1	575/670	1500	410/480			93,6/93,1	5000	-13,58	617,5	ВЛ11
ТЛ3	700/750	1500	-		85/83	93,5/-	5000			ВЛ15
НБ406	470/525	1500	380/340		80/77	92,1/92,0	5400			ВЛ8
АЛ4846еТ	618/700	1500	435/495		75/71	94,8/94,3	5250		726	ЧС2

**ДОДАТОК Б**  
(довідковий)

**ТАБЛИЦІ НАМАГНІЧУВАННЯ**

(середні значення величин напруженостей магнітного поля, *A/cm*)

**Я к і р**

Електротехнічні сталі марок Э12, Э13

<i>B,</i> <i>Tл</i>	<i>0</i>	<i>0,01</i>	<i>0,02</i>	<i>0,03</i>	<i>0,04</i>	<i>0,05</i>	<i>0,06</i>	<i>0,07</i>	<i>0,08</i>	<i>0,09</i>
<i>0,6</i>	3	3	3	3	3	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3
<i>0,7</i>	3,4	3,4	3,5	3,5	3,6	3,7	3,7	3,8	3,8	3,9
<i>0,8</i>	4	4	4,1	4,1	4,2	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6
<i>0,9</i>	4,8	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6
<i>1,0</i>	5,7	5,8	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1
<i>1,1</i>	7,2	7,4	7,5	7,6	7,7	8,0	8,2	8,5	8,7	8,9
<i>1,2</i>	9,3	9,6	9,9	10,1	10,5	11	11,3	11,6	11,9	12,3
<i>1,3</i>	12,8	13,3	13,8	14,2	14,6	15	15,7	16,3	17	17,6
<i>1,4</i>	18,2	19	19,8	20,6	21,2	22	23,5	25	26,5	28
<i>1,5</i>	29	30	31	32,5	33,5	35	37	39	41	43
<i>1,6</i>	49	50	53	56	60	63	67	71	75	79
<i>1,7</i>	83	88	93	98	104	110	116	122	128	135
<i>1,8</i>	142	149	156	163	171	179	187	196	205	214
<i>1,9</i>	224	235	246	257	269	281	294	308	322	336
<i>2,0</i>	350	364	378	393	408	423	439	457	476	495
<i>2,1</i>	515	535	556	577	598	620	643	666	689	712
<i>2,2</i>	735	759	783	807	831	855	880	905	930	955
<i>2,3</i>	980	1006	1032	1058	1085	1110	1135	1165	1195	1230
<i>2,4</i>	1270	1305	1340	1375	1415	1455	1495	1535	1570	1610
<i>2,5</i>	1650	1696	1730	1775	1820	1870	1920	1975	2030	2090

**П о л ю с**  
Листова сталь

<i>B, Тл</i>	<i>0</i>	<i>0,01</i>	<i>0,02</i>	<i>0,03</i>	<i>0,04</i>	<i>0,05</i>	<i>0,06</i>	<i>0,07</i>	<i>0,08</i>	<i>0,09</i>
<i>0,6</i>	3	3	3	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,4	3,4
<i>0,7</i>	3,5	3,5	3,6	3,7	3,7	3,8	3,8	3,9	4	4
<i>0,8</i>	4,1	4,1	4,2	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8
<i>0,9</i>	4,8	4,9	4,95	5,05	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6
<i>1,0</i>	5,7	5,82	5,95	6,07	6,15	6,3	6,42	6,55	6,65	6,8
<i>1,1</i>	6,9	7,03	7,2	7,31	7,48	7,6	7,75	7,9	8,08	8,25
<i>1,2</i>	8,45	8,6	8,8	9,0	9,2	9,4	9,6	9,92	10,15	10,45
<i>1,3</i>	10,8	11,12	11,45	11,75	12,2	12,6	13	13,5	13,93	14,5
<i>1,4</i>	14,9	15,3	15,95	16,45	17	17,5	18,35	19,2	20,1	21,1
<i>1,5</i>	22,7	24,5	25,6	27,1	28,8	30,5	32	34	36,5	37,5
<i>1,6</i>	40	42,5	45	47,5	50	52,5	55,8	59,5	62,3	66
<i>1,7</i>	70,5	75,3	79,5	84	88,5	93,2	98	103	108,5	114
<i>1,8</i>	119	124	130	135	141	148	156	162	170	178
<i>1,9</i>	188	197	207	215	226	235	245	256	265	275
<i>2,0</i>	290	302	315	328	342	361	380	400	420	445
<i>2,1</i>	470	495	520	550	580	610	640	665	695	730
<i>2,2</i>	775	810	850	885	920	960	1000	1045	1085	1130

**С т а н и н а**  
стальне литво

<i>B, Тл</i>	<i>0</i>	<i>0,01</i>	<i>0,02</i>	<i>0,03</i>	<i>0,04</i>	<i>0,05</i>	<i>0,06</i>	<i>0,07</i>	<i>0,08</i>	<i>0,09</i>
<i>0,4</i>	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
<i>0,5</i>	1,9	1,9	1,9	2	2	2	2	2,1	2,1	2,1
<i>0,6</i>	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4	2,5	2,5	2,6
<i>0,7</i>	2,6	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9	3	3,0	3,1
<i>0,8</i>	3,2	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0
<i>0,9</i>	4,1	4,2	4,4	4,5	4,6	4,8	5	5,1	5,3	5,5
<i>1,0</i>	5,6	5,8	6	6,2	6,4	6,6	6,8	7	7,2	7,4
<i>1,1</i>	7,6	7,9	8,2	8,4	8,7	9	9,3	9,6	9,9	10,2
<i>1,2</i>	10,5	10,8	11,1	11,5	11,8	12,2	12,6	13	13,4	13,8
<i>1,3</i>	14,2	14,7	15,2	15,8	16,4	17,0	17,6	18,2	18,8	19,4
<i>1,4</i>	20,1	20,9	21,7	22,5	23,4	24,3	25,3	26,5	27,7	29
<i>1,5</i>	30,5	31,8	33,4	35,2	37,1	39,0	41	43,5	46	48,5
<i>1,6</i>	51	53,5	56	59	62	65	68	71	74	78
<i>1,7</i>	81	84	88	91	95	99	102	106	110	114
<i>1,8</i>	118	122	126	130	134	139	143	148	152	157
<i>1,9</i>	162	169	177	184	193	200	209	218	227	236
<i>2,0</i>	245	257	269	281	293	307	320	335	352	370
<i>2,1</i>	387	406	425	450	485	515	560	605	65	705

## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до контрольної роботи з дисципліни  
«ТЯГОВІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

Частина 1  
МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Відповідальний за випуск Жовтий Ю. В.

Редактор Буранова Н. В.

---

Підписано до друку 22.06.21 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

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

Видавець та виготовлювач Український державний університет  
залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.