

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**МЕХАНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра електроенергетики, електротехніки  
та електромеханіки**

**РОЗРАХУНОК ТЯГОВОГО ДВИГУНА  
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до виконання курсової роботи**

**з дисципліни  
«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»**

**Харків – 2022**

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки 25 травня 2020 р., протокол № 12.

Рекомендуються для бакалаврів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (за освітньою програмою «Електричний транспорт») та спеціальності 273 «Залізничний транспорт» (за освітньою програмою «Електровози та електропоїзди») денної та заочної форм навчання.

Укладачі:

професори О. М. Ананьєва,  
М. М. Бабаєв,  
В. С. Блиндюк,  
доцент Н. П. Карпенко

Рецензент

доц. С. І. Яцько

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Загальні положення з проектування ТЕД.....	5
2 Розрахунок активного шару якоря.....	8
3 Компенсаційна обмотка та її розрахунок.....	16
4 Розрахунок магнітного кола ТЕД.....	20
5 Розрахунок комутації та додаткових полюсів.....	29
6 Оцінка потенціальних умов на колекторі ТЕД.....	36
7 Визначення характеристик ТЕД.....	39
7.1 Визначення навантажувальних характеристик.....	39
7.2 Визначення швидкісної характеристики.....	40
7.3 Розрахунок характеристик ККД.....	41
7.4 Визначення характеристик рухомого моменту на валу ТЕД.....	43
Питання до захисту курсової роботи.....	44
Список літератури.....	45
Додаток А Варіанти завдання на курсову роботу.....	46
Додаток Б Основні технічні дані тягових електродвигунів.....	47
Додаток В Конструкція електричної машини постійного струму.....	56
Додаток Г Криві намагнічування феромагнітних матеріалів..	58

## ВСТУП

Випускники університету за спеціальностями 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 273 «Залізничний транспорт» готуються до роботи як фахівці із застосування електроустаткування на підприємствах залізничної галузі. Саме тому вони мають знати характеристики електричних машин.

Для виконання курсової роботи здобувач вищої освіти має знати основні положення теорії електричних машин, умови та режими роботи тягових електродвигунів (ТЕД) на електричному рухомому складі (ЕРС).

У курсовій роботі рекомендується провести перевірний розрахунок одного з серійних тягових електродвигунів і порівняти оптимальність вибору параметрів активного шару якоря. Результати розрахунків на кожному етапі треба порівнювати з довідниковими даними.

При виконанні курсової роботи розраховуються:

- активний шар якоря (вибір обмотки якоря);
- магнітне коло;
- комутація;
- потенціальні умови на колекторі;
- електромеханічні характеристики.

Тип тягового електродвигуна відповідно до свого варіанта здобувач обирає згідно з додатком А даних методичних вказівок. Основні технічні характеристики ТЕД, необхідні для виконання курсової роботи, наведено в додатку Б.

Робота оформляється у вигляді розрахункової записки і двох креслень на форматі А4 – повздовжнього та поперечного перетинів спроектованого двигуна. На кресленнях необхідно зазначити основні розміри, одержані при розрахунках (діаметри якоря та колектора, осьову довжину осердя якоря та ін.).

## 1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ З ПРОЄКТУВАННЯ ТЕД

При проєктуванні керуються загальними положеннями теорії електричних машин [1–3]. Розміри машини, її вагові, експлуатаційні та економічні показники залежать переважно від головних розмірів машини: зовнішнього діаметра та осьової довжини осердя (додаток В) [4]. Головні розміри пов'язані з механічними, магнітними та струмовими навантаженнями, що характеризуються частотою обертання, індукцією у повітряному проміжку і лінійним навантаженням якоря.

Залежність між розрахунковою (конструктивною) потужністю  $P_i$  та основними розмірами встановлюється через електромагнітну сталу Арнольда [5, 6]:

$$P_i = \frac{D_a^2 \cdot l_a \cdot n_n}{C_A}, \quad (1.1)$$

де  $D_a$  – діаметр якоря, см;

$l_a$  – осьова довжина осердя, см;

$n_n$  – номінальна частота обертання, об/хв;

$C_A$  – електромагнітна стала Арнольда.

$$C_A = \frac{6,1 \cdot 10^7}{\alpha_i \cdot A \cdot B_\delta}, \quad (1.2)$$

де  $\alpha_i$  – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття;

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

$B_\delta$  – магнітна індукція у повітряному проміжку між полюсом та якорем у номінальному режимі.

$$P_i = P_n \cdot \frac{1+\eta}{2 \cdot \eta}, \quad (1.3)$$

де  $P_i$  – номінальна потужність ТЕД (у тривалому режимі), кВт;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії, у відносних одиницях.

Значення  $\eta$  для ТЕД електровозів приблизно може дорівнювати 0,94, а для ТЕД електропоїздів – 0,92.

Якщо немає обмежень, то діаметр якоря, см, приблизно можна визначити за формулою К. І. Шепфера:

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{P_H}{n_H}}. \quad (1.4)$$

Для ТЕД значення діаметра якоря обмежується діаметром тягового колеса ЕРС, і його вибір робиться за умов вписування ТЕД в екіпаж.

Для електровозів постійного струму серій ВЛ10, ВЛ11 та ін., які мають діаметр тягового колеса  $D_\delta = 1250$  мм –  $D_a = 74$  см. Для електровозів змінного струму серії ВЛ80 з таким саме діаметром колеса з причин забезпечення надійності ТЕД при пульсуючому струмі  $D_a = 66$  см.

При  $D_\delta = 1200$  мм –  $D_a = 66$  см (електровоз ВЛ8).

При  $D_\delta = 1050$  мм –  $D_a = 52$  см для електровозів,  $D_a = 49,3$  см для електропоїздів.

При  $D_\delta = 950$  мм –  $D_a = 45$  см (перспективні електропоїзди).

Довжина осердя якоря також обмежена. При ширині колії 1520 мм, яка існує в Україні,  $l_a \leq 42$  см для ТЕД вантажних електровозів. Існуючі вимоги щодо максимального використання активного об'єму якоря потребують прийняти максимально можливий діаметр якоря, тоді осьова довжина осердя, см, визначається за формулою:

$$l_a = \frac{6,1 \cdot 10^7 \cdot P_i}{\alpha_i \cdot A \cdot B_\delta \cdot n_H \cdot D_a^2}. \quad (1.5)$$

Значення лінійного навантаження якоря сучасних ТЕД електровозів досягає значень 400÷500 А/см, а  $B_\delta \leq 1,0$  Тл (для ТЕД електропоїздів  $B_\delta \approx 0,7 \div 0,8$  Тл).

Важливим параметром є відношення полюсної дуги до полюсного ділення:

$$\alpha_i = \frac{b_p}{\tau}, \quad (1.6)$$

де  $\tau$  – полюсне ділення.

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2p}. \quad (1.7)$$

Величину  $\alpha_i$  вибирають максимально можливою. Її називають коефіцієнтом використання машини. Величина  $\alpha_i$  обмежується умовами забезпечення надійної комутації. Орієнтовано можна задати  $\alpha_i \approx 0,62 \div 0,68$  для некомпенсованих ТЕД та  $\alpha_i \approx 0,64 \div 0,72$  – для компенсованих.

Важливим фактором є також вибір кількості полюсів. Кількість головних полюсів  $2p$  при  $D_a = 45 \div 52$  см дорівнює 4, при  $D_a = 74$  см –  $2p = 6$ .

Наявність колектора в ТЕД постійного та пульсуючого струмів накладає обмеження на вибір обмотувальних даних і режимів роботи ТЕД, зокрема:

1) колекторне ділення

$$t_k = \frac{\pi \cdot D_k}{K} \geq 4 \text{ мм}, \quad (1.8)$$

де  $D_k$  – діаметр колектора;

$K$  – кількість колекторних пластин.

Як правило,  $D_k = (0,75 \div 0,9) \cdot D_a$ . Більші значення  $D_k$  обмежуються можливістю приєднання провідників обмотки якоря до півників колектора;

2) лінійна швидкість на поверхні колектора

$$V_{k \max} = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_{\max}}{60} \leq 52 \div 55 \text{ м/с}, \quad (1.9)$$

де  $n_{\max}$  – максимальна робоча швидкість обертання ТЕД, об/хв;

3) максимальна напруга між сусідніми пластинами колектора для некомпенсованих ТЕД

$$u_{k \max} \leq 35 \div 37 \text{ В}; \quad (1.10)$$

4) середня напруга між сусідніми пластинами колектора

$$u_k = \frac{2p \cdot U}{K} \leq 16 \div 18 \text{ В}; \quad (1.11)$$

5) максимальне значення реактивної ЕРС при комутації і максимальній робочій швидкості обертання якоря

$$e_{p \max} \leq 8 \div 9 \text{ В}; \quad (1.12)$$

6) максимальне значення небалансної ЕРС у комутуючих секціях обмотки якоря при пульсуючому живленні

$$\Delta e \leq 0,7 \div 1,0 \text{ В}; \quad (1.13)$$

7) значення струму в пазу якоря або компенсаційної обмотки не повинно перевищувати 1200 А.

## 2 РОЗРАХУНОК АКТИВНОГО ШАРУ ЯКОРЯ

При розрахунку активного шару якоря вибирається тип обмотки, кількість її провідників та їх розмір, кількість пазів осердя та їх геометричні розміри.

Для ТЕД електровозів застосовується петльова обмотка якоря, яка має кількість паралельних гілок, що дорівнює кількості полюсів:

$$2a = 2p. \quad (2.1)$$

Для ТЕД електропоїздів і метрополітену, як правило, приймається хвильова обмотка, яка має

$$2a = 2, \quad (2.2)$$

однак при збільшенні потужності понад 200 кВт можливо застосування петльової обмотки.

Обравши тип обмотки, визначаємо її кроки [6].

Кількість колекторних пластин на паз визначаємо за формулою:

$$u_k = \frac{k}{z}, \quad (2.3)$$



де  $k$  – кількість колекторних пластин;  
 $z$  – число пазів якоря.

Результуючий крок обмотки в елементарних пазах або крок по колектору в колекторних діленнях:

$$\begin{array}{l} \text{для петльової обмотки} \\ \text{для хвильової обмотки} \end{array} \quad \begin{array}{l} y_k = 1, \\ Y_k = \frac{K-a}{p} = \frac{K-1}{p}. \end{array} \quad (2.4)$$

Перший крок по реальних пазах:

$$y_{z1} = \frac{z}{2p} - \varepsilon_n, \quad (2.5)$$

де  $\varepsilon_n$  – укорочення обмотки у пазових діленнях, крок має дорівнювати цілому числу.

Перший частковий крок по елементарних пазах (у колекторних діленнях):

$$y_l = y_{z1} \cdot u_k. \quad (2.6)$$

Другий крок по реальних пазах:

$$\begin{array}{l} \text{для петльової обмотки} \\ \text{для хвильової обмотки} \end{array} \quad \begin{array}{l} Y_{z2} = Y_{z1} - \frac{1}{u_k}, \\ Y_{z2} = \frac{Y_k}{u_k} - Y_{z1}. \end{array} \quad (2.7)$$

Другий частковий крок по елементарних пазах (у колекторних діленнях):

$$\begin{array}{l} \text{для петльової обмотки} \\ \text{для хвильової обмотки} \end{array} \quad \begin{array}{l} y_2 = y_l - 1, \\ y_2 = y_k - 1. \end{array} \quad (2.8)$$

Укорочення по колекторних пластинах:

$$\varepsilon_k = K/2p - Y_1. \quad (2.9)$$

Якщо застосовуємо просту петльову обмотку, то необхідно визначити число вирівнювачів на паз та крок вирівнювачів по колектору

$$Y_y = \frac{k}{p}, \quad (2.10)$$

де  $k$  – кількість колекторних пластин;  
 $p$  – кількість пар полюсів.

Важливим етапом проектування є вибір кількості та розмірів пазів якоря. При цьому треба дотримуватися прикладів побудованих машин та користуватися такими рекомендаціями:

- ширина зубчатого ділення на поверхні якоря має бути, як правило, у межах:

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_a}{Z} = 1,8 \div 3,5 \text{ см}, \quad (2.11)$$

де  $Z$  – кількість пазів;

- кількість колекторних пластин, які приходяться на один паз, має бути в межах  $3 \leq U_n \leq 7$ ;

- ширина паза дорівнює:

$$b_n \approx (0,4 \div 0,45) \cdot t_1; \quad (2.12)$$

- відношення глибини паза до його ширини за умови оптимального проектування та комутації має бути в межах:

$$\frac{h_n}{b_n} \approx 3,2 \div 4,5. \quad (2.13)$$

Менші значення належать до ТЕД електропоїздів.

При виконанні курсової роботи розміри паза надані, тому визначаємо лише геометрію зубця [6]:

- ширина паза в штампі

$$e'_n = e_n + 0,2. \quad (2.14)$$

- висота паза в штампі

$$h'_z = h_z + 0,1. \quad (2.15)$$

Геометрія зубця така:

- зубцевий крок по поверхні якоря

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_a}{z}; \quad (2.16)$$

- ширина головки зубця по поверхні якоря

$$b_{z1} = z_1 \cdot \theta'_n; \quad (2.17)$$

- зубцевий крок по дну пазів

$$t_2 = \frac{\pi \cdot (D_a - 2 \cdot h_z)}{z}; \quad (2.18)$$

- ширина ніжки зубця

$$b_{z2} = t_2 \cdot \theta'_n; \quad (2.19)$$

- на одній третині висоти паза зубцевий крок

$$t_{1/3} = \frac{\pi \cdot (D_a - \frac{4}{3} \cdot h_z)}{z}; \quad (2.20)$$

- ширина зубця розрахункова

$$B_{z1/3} = t_{1/3} - b'_n; \quad (2.21)$$

- коефіцієнт форми зубця

$$K_3 = \frac{t_{1/3}}{0,94 \cdot B_{z1/3}} - 1. \quad (2.22)$$

Важливим є правильний вибір конструкції ізоляції, що поділяється на виткову, корпусну, покривну (рисунок 3, а).

Кількість активних провідників обмотки якоря  $N$  визначається вибраною величиною лінійного навантаження

$$A = \frac{I_a \cdot N}{2 \cdot a \cdot \pi \cdot D_a} \quad (2.23)$$

При виборі  $N = 2K$  треба слідкувати за обмеженнями, щоб  $t_k \geq 4$  мм.

Площа поперечного перетину активного провідника обмотки  $q_a$  знаходиться із заданої величини теплового фактора  $A \cdot j_a$ , в якому  $j_a$  – щільність струму, А/мм<sup>2</sup>. Тоді

$$q_a = \frac{I_a}{2 \cdot a \cdot j_a}, \quad (2.24)$$

де  $I_a/2a$  – струм у паралельній гілці обмотки.

Тепловий розрахунок означає нагрів обмотки якоря, який нормується залежно від класу нагрівостійкості ізоляції обмотки. Для вибору  $A \cdot j_a$  слід керуватися рекомендаціями [5]. Значення щільності струму залежно від класу нагрівостійкості ізоляції можна визначити за добутком  $A \cdot j_a$  (рисунок 1).

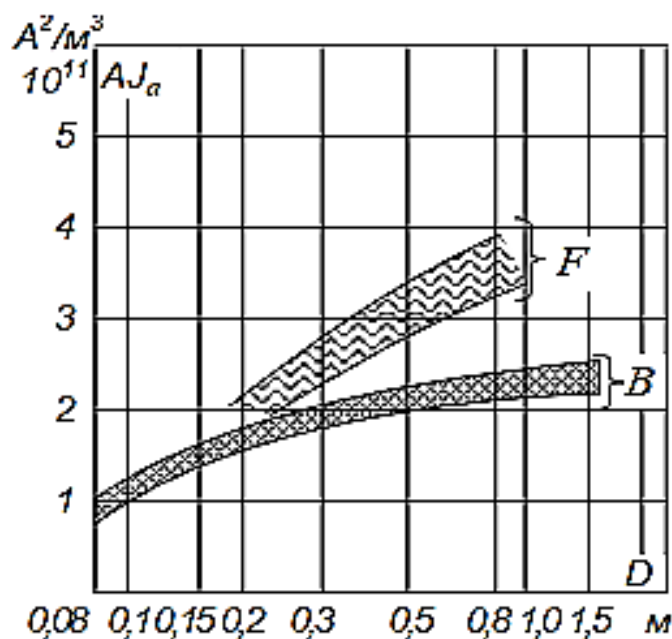


Рисунок 1 – Залежність добутку  $A \cdot j_a$  від діаметра якоря

Однак треба брати до уваги, що  $j_a$  не має перевищувати  $7 \text{ A/mm}^2$ .

### Геометричний розрахунок обмотки якоря

Визначивши параметри обмотки якоря і геометрію зубця, виконуємо геометричний розрахунок лобових частин котушки якоря [6]. Розрахунок виконуємо відповідно до рисунку 2.

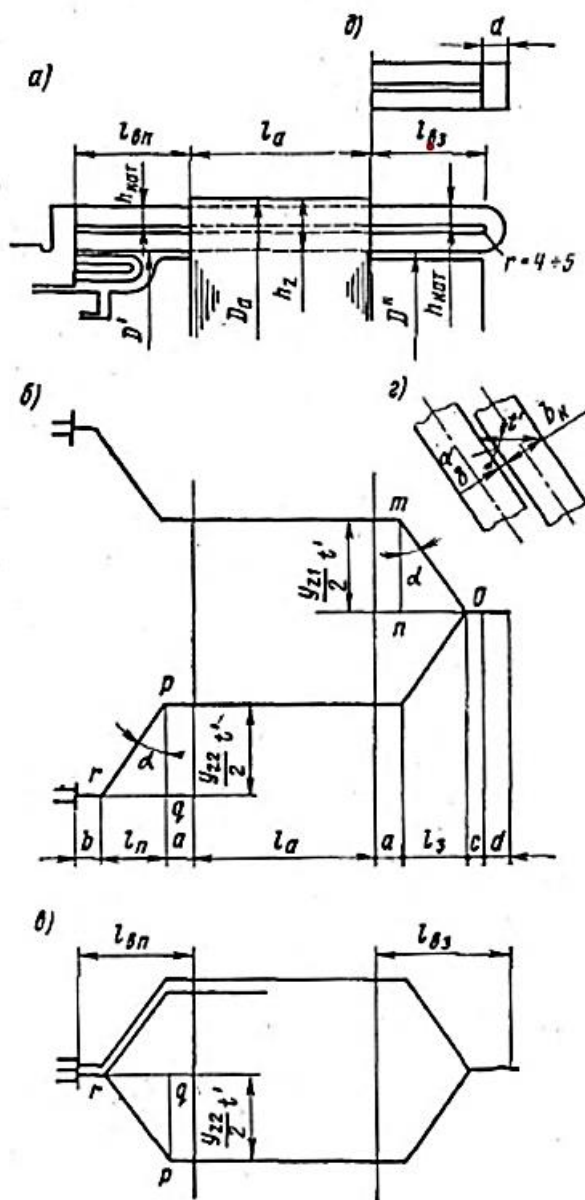


Рисунок 2 – Геометричні розміри секцій обмотки якоря:  
 а – котушка обмотки якоря ТЕД; б – ескіз секції хвильової обмотки; в – ескіз секції петльової обмотки; г – кут похилої частини котушок; д – ширина скоби

Повні передні та задні вильоти лобових частин обмотки відповідно дорівнюють:

$$l_{\text{ВП}} = \alpha + l_{\text{П}} + b, \quad (2.25)$$

$$l_{\text{ВЗ}} = \alpha + l_3 + c + d, \quad (2.26)$$

де  $a$  – прямолінійна ділянка котушки при виході з паза, розмір цієї ділянки залежить від напруги відносно корпусу [6];

$c$  – прямолінійна ділянка у головок з урахуванням радіуса вигину: для суцільних головок складає 2 – 5 мм, для розрізних – 12 мм;

$d = r + \frac{h_z}{2} = r + h_{\text{кот}}$  – розмір головки котушки ( $r = 5$  мм – внутрішній радіус вигину головки);

$b$  – прямолінійна ділянка кінцівок котушки при підході до півників колектора. Якщо є можливість для введення в півники колектора здійснити перекручування кінців проводів обертом на  $90^\circ$ , то  $b = 15$ – $20$  мм; якщо доводиться розплющувати кінцівки провідників, то  $b = 40$  мм. Розплющування застосовують у тому випадку, якщо колекторний розподіл по дну пазів менший за ширину провідника [6].

Колекторний розподіл по дну пазів

$$t_{2k} = \frac{\pi \cdot (D_a - 2h'_z)}{K}, \quad (2.27)$$

Кут  $\alpha$ , під яким розташовані похилені частини котушок

$$\sin \alpha = \frac{b_k + \delta}{t_2}, \quad (2.28)$$

де  $\delta = 0,3$  мм – найменший проміжок між сусідніми котушками;

$b_k$  – товщина котушки в пазовій частині;

$t_2$  – зубцевий крок по найменшому діаметру укладання лобових частин обмотки.

Проекції похилих, косих ділянок котушки переднього  $l_n$  і заднього  $l_3$  на поздовжню вісь двигуна будуть дорівнювати:

$$l_n = \frac{y_{z2}}{2} \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.29)$$

$$l_3 = \frac{y_{z1}}{2} \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.30)$$

З огляду на те, що верхній і нижній боки котушки розташовані на різних діаметрах, то, визнаючи їх довжини, зубцевий крок  $t'$  і кут нахилу  $\alpha'$ , будемо вимірювати на діаметрі, що проходить через середину паза:

$$t' = \frac{\pi \cdot (D_a - h_z')}{z}; \quad (2.31)$$

$$\alpha' = \arcsin\left(\frac{b_k + \delta'}{t'}\right), \quad (2.32)$$

де  $\delta' = 0,35$  мм – проміжок між сусідніми котушками.

Отже, довжини переднього і заднього похилу ділянок дорівнюють:

$$L_{\Pi} = \frac{y_{z2}}{2} \cdot \frac{t'}{\cos \alpha'}; \quad (2.33)$$

$$L_3 = \frac{y_{z1}}{2} \cdot \frac{t'}{\cos \alpha'}. \quad (2.34)$$

Довжина лобової частини напіввитка

$$l_{\text{лоб}} = b + L_{\Pi} + a + a + L_3 + c + \frac{\pi \cdot d}{2}. \quad (2.35)$$

Середня довжина одного провідника обмотки якоря

$$l_N = l_{\text{лоб}} + l_a, \quad (2.36)$$

де  $l_a$  – довжина пакету осердя якоря.

Опір обмотки якоря при 20 °С, Ом,

$$r_{a20^\circ} = \frac{l_N \cdot N}{57 \cdot g_a \cdot (2a)^2} \quad (2.37)$$

Маса міді обмоток, кг,

$$G_N = (8,9 \cdot q_a \cdot \sum l_N) \cdot 10^{-3}. \quad (2.38)$$

МРС поперечної реакції якоря на полюсному діленні

$$F_a = A \frac{\tau}{2}, \quad (2.39)$$

Наприкінці розділу необхідно навести розташування провідників обмотки в пазу якоря. Види розташування наведені на рисунку 3. Провідники секцій у пазу розташовують на «ребро» (рисунок 3, а) або «плазом» (рисунок 3, в). З метою зменшення додаткових втрат при високих провідниках і укладанні їх на «ребро», провідники поділяються за висотою на дві частини, ізолювані одна від одної (рисунок 3, б).

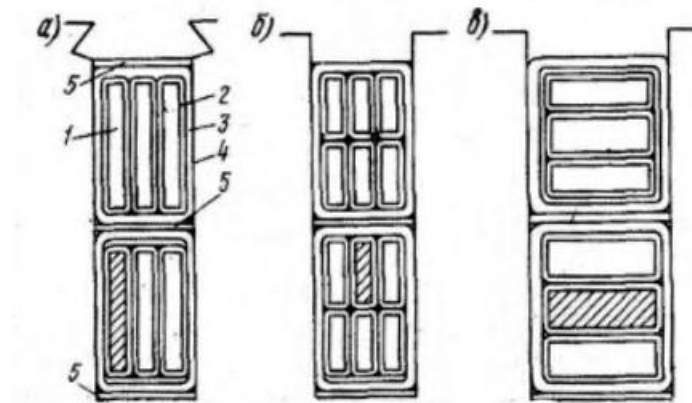


Рисунок 3 – Розташування провідників секцій обмотки в пазу осердя якоря:

- 1 – провідник; 2 – виткова ізоляція; 3 – корпусна ізоляція;  
 4 – покривна ізоляція; 5 – прокладка з міканіта

### 3 КОМПЕНСАЦІЙНА ОБМОТКА ТА ЇЇ РОЗРАХУНОК

Призначення компенсаційної обмотки (КО) в електричних машинах – пригнічення поперечної реакції якоря, що дає змогу знизити максимальну міжламельну напругу приблизно на 25 % в стаціонарних режимах і а 40–50 % – в перехідних.



Вважають доцільним застосування КО в тягових двигунах постійного та пульсуючого струму потужністю більше ніж 700 кВт. Закладають КО у відкриті пази наконечників головних полюсів (рисунок 4).

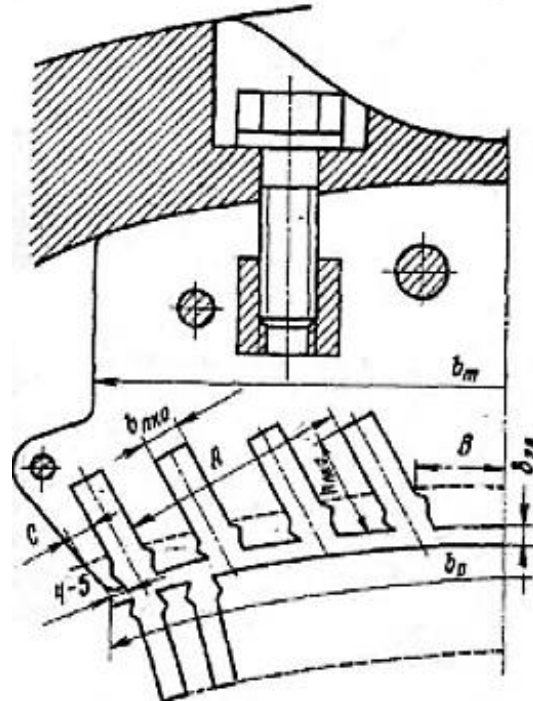


Рисунок 4 – Ескіз осердя головного полюса

Компенсаційну обмотку намагаються виконати за схемою з однією паралельною гілкою  $a_{ко} = 1$ , включаючи котушки всіх полюсів в одне послідовне коло [6].

Виходячи з того, що КО знищує спотворювальну дію намагнічуючої сили якоря на полюсній дузі та заданий ступінь компенсації  $v_{ко} = 1,07 \div 1,17$ , знаходимо кількість витків компенсаційної обмотки на полюс:

$$W_{ко} = v_{ко} \cdot \frac{A \cdot \frac{\tau}{2} \cdot a_{\delta} \cdot a_{ко}}{I_a} \quad (3.1)$$

Обмотку виконуємо котушковою (секційною), розташовуючи в кожному пазі по одній активній стороні секції. Тоді кількість ефективних провідників в пазі  $N_{зко}$  буде дорівнювати кількості витків у секції  $W_{eko}$ . За умовою охолодження і рівномірності розподілу намагнічуючої сили КО

об'єм струму в пазі для великих і середніх машин має бути  $I_{ZKO} \leq 1800 \div 2000$  А.

$$N_{ZKO} = w_{eKO} = \frac{I_{ZKO} \cdot a_{KO}}{I_{KO}}. \quad (3.2)$$

Оскільки кількість провідників на полюс дорівнює  $2W_{KO}$ , то кількість компенсаційних пазів дорівнює:

$$Z_{KO} = \frac{2 \cdot W_{KO}}{N_{ZKO}}. \quad (3.3)$$

Запропоновано таке виконання компенсаційної обмотки, коли осі компенсаційних пазів паралельні осі відповідного додаткового полюса, тому  $Z_{KO}$  має бути парним числом.

З метою уникнення вібрацій машини внаслідок коливання магнітного потоку в повітряному проміжку, зубцевий крок по полюсному наконечнику має відрізнятися від зубцевого кроку по якорю не менше ніж на 10 %. Цю умову можна записати:

$$Z_{KO} \neq (0,9 \div 1,1) \cdot \frac{z}{2p} \cdot a_{\delta}. \quad (3.4)$$

Намагнічуюча сила компенсаційної обмотки на полюс

$$F_{KO} = \frac{I_a}{a_{KO}} \cdot W_{KO}. \quad (3.5)$$

Ступінь компенсації

$$\nu_{KO} = \frac{F_{KO}}{a_{\delta} \cdot F_{aq}} = \frac{W_{KO}}{a_{\delta} \cdot W_a}. \quad (3.6)$$

Щільність струму в КО допускається на 12–20 % вище ніж в обмотці якоря, тобто

при ізоляції класу В –  $j_{KO} = 6 - 7$  А/мм<sup>2</sup>;

при ізоляції класу Н –  $j_{KO} = 7 - 8$  А/мм<sup>2</sup>.

Вибираємо провідник, його переріз, а потім визначаємо щільність струму в КО:

$$j_{\text{КО}} = \frac{I_a}{a_{\text{КО}} \cdot q_{\text{КО}}}. \quad (3.7)$$

Геометричні розміри лобових частин КО визначаються на підставі рисунку 5 [6].

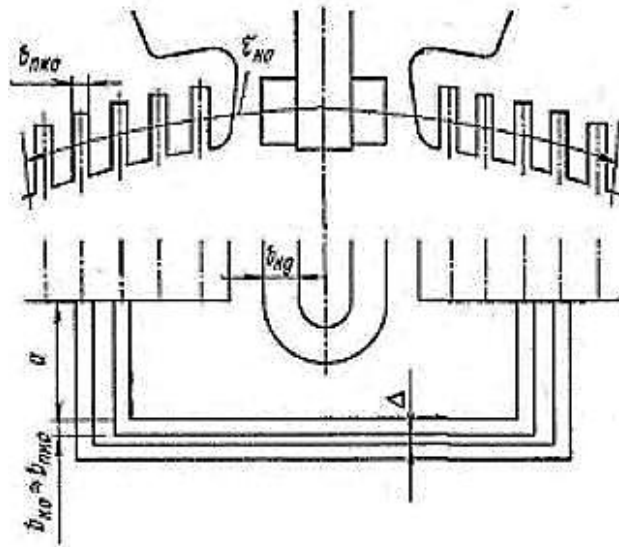


Рисунок 5 – Розміщення компенсаційної обмотки ТЕД

$a = 25$  мм – довжина прямолінійної ділянки внутрішньої котушки при виході з паза;

$b_{\text{пко}} = 11,4$  – ширина компенсаційного паза;

$\Delta = 5$  мм – проміжок між кінцевими частинами сусідніх котушок.

Сумарна довжина переднього і заднього лобових вильотів, мм,

$$L_{\text{лоб.ко}} = 2 \cdot \left[ a + b_{\text{пко}} \frac{z_{\text{КО}}}{2} + \Delta \cdot \left( \frac{z_{\text{КО}}}{2} - 1 \right) \right]. \quad (3.8)$$

Середню довжину витка визначаємо для середньої котушки. Довжина лобової частини напіввитка середньої котушки, мм,

$$l_{\text{ско}} = \tau_{\text{ко}} \cdot \left( 1 - \frac{a_{\delta}}{2} \right) + 2a + b_{\text{пко}} \cdot \frac{z_{\text{КО}}}{2} + \Delta \cdot \left( \frac{z_{\text{КО}}}{2} - 1 \right). \quad (3.9)$$

Тут  $\tau_{\text{ко}} \cdot \left( 1 - \frac{a_{\delta}}{2} \right) = \frac{\pi \cdot (D_a + 2 \cdot \delta_{\text{ГН}} + h'_{\text{ЗКО}})}{2p} \cdot (1 - 0,5 \cdot a_{\delta})$  – розгорнута довжина кінцевої ділянки лобової частини середньої

катушки, яка взята по діаметру, який проходить через середини висот компенсаційних пазів.

Середня довжина витка компенсаційної обмотки, м,

$$l_{\text{ср.ко}} = 2 \cdot (l_{\text{ско}} + l_m). \quad (3.10)$$

Опір компенсаційної обмотки при температурі 20 °С, Ом,

$$r_{\text{ко}} = \frac{2\rho \cdot w_{\text{ко}} \cdot l_{\text{ср.ко}}}{57 \cdot a_{\text{ко}}^2 \cdot q_{\text{ко}}}. \quad (3.11)$$

Вага міді компенсаційної обмотки, кг,

$$m_{\text{мко}} = 8,9 \cdot l_{\text{ср.ко}} \cdot 2\rho \cdot w_{\text{ко}} \cdot q_{\text{ко}}. \quad (3.12)$$

#### 4 РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО КОЛА ТЕД

Магнітне коло ТЕД складається з окремих ланок: повітряного проміжку, зубців якоря, спинки (ярма) осердя якоря, осердя полюса (для некомпенсованих машин разом із наконечником), зубців компенсаційної обмотки (для компенсованих ТЕД), остова (ярма) у вигляді двох складових: основної і місця переходу (виходу) із полюса в остов, стикування полюса з остовом (рисунки 6).

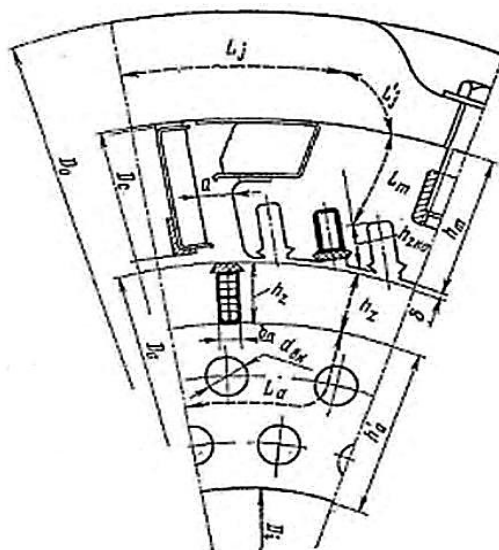


Рисунок 6 – Магнітне коло ТЕД

Мета розрахунку – визначення основних розмірів магнітопроводу та кількості витків обмотки збудження.

Схема розрахунку магнітного кола:

1) за заданими геометричними розмірами визначаємо площу поперечного перерізу ланки;

2) за значенням магнітного потоку визначаємо величину магнітної індукції в ланці;

3) за отриманою величиною магнітної індукції по кривих намагнічування для сталей визначаємо напруженість магнітного поля у ланці;

4) визначаємо магніторушійну силу, яка необхідна для проведення магнітного потоку через конкретну ланку ( $F = H L$ );

5) визначаємо загальну магніторушійну силу, що необхідна для проведення магнітного потоку по магнітопроводу машини.

Отже, загальна магніторушійна сила (МРС), яка необхідна для проведення магнітного потоку, знаходиться у вигляді суми таких складових:

$$F_0 = F_\delta + H_z L_z + H_a L_a + H_m L_m + H_{zk} L_{zk} + (H_0 L_0 + H_j L_j) + F_{\delta j}, \quad (4.1)$$

де  $H$  – напруженість магнітного поля у наведених ланках магнітного кола;

$L$  – довжина ланок кола в напрямі ліній магнітного поля.

При розрахунку магнітного кола рекомендується використовувати криві намагнічування феромагнітних матеріалів, що наведені в таблицях Г.1, Г.2, Г.3 додатка Г.

Для визначення геометричних розмірів ланок магнітного кола треба пам'ятати, що великі значення індукцій магнітного поля у феромагнітних ланках призводять до магнітного насичення ланок і непропорційного різкого зростання МРС обмотки збудження. Занижені значення індукцій збільшують масу та габарити ТВД.

Практикою електромашинобудування відпрацьовані оптимальні значення магнітних індукцій у ланках магнітного кола ТВД. Орієнтовно в номінальному режимі вони такі:

- $B_{\delta} = 0,8 \div 1$  Тл (менші значення для ТЕД електропоїздів);
- $B_{z1/3} = 2,1 \div 2,2$  Тл (на 1/3 висоти зубця від дна паза);
- $B_a = 1,4 \div 1,6$  Тл;
- $B_m = 1,5 \div 1,7$  Тл;
- $B_{zk} = 1,7 \div 1,8$  Тл;
- $B_0 = 1,3 \div 1,6$  Тл;
- $B_j \leq B_0$  (із розрахунку).

Значення вказаних магнітних навантажень можуть коливатися в межах наведених даних.

З урахуванням значень магнітних індукцій, довжини осердя якоря, полюсів і спинки знаходять поперечні розміри наведених ланок за значенням магнітного потоку в номінальному режимі роботи ТЕД [5].

Номінальний магнітний потік у повітряному проміжку ТЕД визначається номінальним значенням ЕРС обмотки якоря:

$$E = C_E \cdot \Phi \cdot n, \quad (4.2)$$

$$E = U - I \cdot \sum r, \quad (4.3)$$

де  $U$  – напруга на якорі ТЕД у номінальному режимі;

$\sum r$  – сума активних опорів обмоток у полі якоря.

Як правило,  $I \cdot \sum r \approx 0,054$ , тоді  $E = 0,95 \cdot U$ .

Більш точно падіння напруги на опорах обмоток кола якоря знаходяться за розрахунковими даними опорів обмоток, які наведені у вихідних даних до проектування.

$C_E$  визначається за обмотувальними даними конкретного ТЕД з урахуванням того, що  $N = 2 \cdot K$ .

$$C_E = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a}. \quad (4.4)$$

$$\Phi = \frac{E}{C_E \cdot n}. \quad (4.5)$$

За значенням магнітного потоку в номінальному режимі знаходяться індукції:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{S_{\delta}}; \quad B_{z1/3} = \frac{\Phi}{S_{z1/3}}; \quad B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot S_a};$$

$$B_m = \frac{\sigma \cdot \Phi}{S_m}; \quad B_{zk} = \frac{\sigma_k \cdot \Phi}{S_{zk}}; \quad B_0 = \frac{\sigma \cdot \Phi}{2 \cdot S_0}; \quad B_j = \frac{\sigma \cdot \Phi}{2 \cdot S_j}, \quad (4.6)$$

де  $\sigma$ ,  $\sigma_k$  – коефіцієнти магнітного розсіювання для головних полюсів та в зоні компенсаційної обмотки. Можна орієнтовно прийняти  $\sigma = 1,2$ ;  $\sigma_k = 1,05$ ;

$S$  – площі поперечного перерізу ланок магнітного кола:

Площа поперечного перерізу повітряного проміжку

$$S_{\delta} = \alpha_{\delta} \tau l_{\delta}. \quad (4.7)$$

Площа перерізу зубців якоря на висоті 1/3 від основи

$$S_{z(1/3)} = \frac{e_{z1/3} \cdot z \cdot l_a \cdot \alpha_{\delta} \cdot 0,94}{2 \cdot p}. \quad (4.8)$$

Площа перерізу спинки осердя якоря

$$S_a = \frac{l_a \cdot 0,94 \cdot (D_a - D_i - 2h_z' - \frac{4}{3} \cdot n_k \cdot d_k)}{2}, \quad (4.9)$$

де 0,94 – коефіцієнт заповнення сталлю, який враховує ізоляцію листів осердя;

$D_i$  – внутрішній діаметр якоря;

$n_k$  – кількість рядів осьових вентиляційних каналів;

$d_k$  – діаметр вентиляційного каналу.

Площа перерізу осердя полюса

$$S_m = e_m \cdot l_m \cdot 0,915. \quad (4.10)$$

Коефіцієнтом 0,915 врахуємо підріз полюса на торцях, визваний більшим радіусом закруглення при намотці міді котушки на вузьке ребро.

Розрахунок перерізу зубцевого шару компенсаційної обмотки виконуємо стосовно до рисунку 4. Перетини паралельних похилих зубців беремо перпендикулярно напрямку магнітного потоку; перетин центрального зуба (розмір В = 3,0 см) і крайнього зубця (розмір С = 0,8 см) беремо на висоті 1/3 від основи.

Площа перерізу зубцевого шару КО

$$S_{zko} = 2(A + B + C - 2b'_{пко})l_m \cdot 0,97. \quad (4.11)$$

Площа поперечного перерізу остова

$$S_o = h_o l_o. \quad (4.12)$$

Площа поперечного перерізу ланки виходу із полюса в остов

$$S_j = h_j (l_m + b_m). \quad (4.13)$$

Розрахунок МРС  $F_0$  виконується, як правило, для одного полюса. При визначенні МРС окремих ланок довжину шляху магнітного потоку в окремій ланці приймають:

- в осерді головного полюса дорівнює висоті полюса;
- в зубцевому шарі КО дорівнює висоті зубця КО;
- в зубцевому шарі осердя якоря дорівнює висоті зубця;
- в спинці осердя якоря

$$L_a = \frac{\pi \cdot (D_a - h_a - 2 \cdot h_z)}{4 \cdot p} + 0,5 \cdot h_a, \quad (4.14)$$

де  $h_a$  – висота спинки якоря;

$$h_a = \frac{D_a}{2} - \frac{D_i}{2} - h_z; \quad (4.15)$$

- в ланці переходу із полюса в остов



$$L_j = \frac{B_m}{2}; \quad (4.16)$$

- в остові

$$L_j = \frac{\pi \cdot (D_a + 2 \cdot (\delta + h_m) + h_o)}{4p} + \frac{h_o}{2}. \quad (4.17)$$

МРС повітряного проміжку знаходять для його розрахункового значення:

$$F_\delta = \frac{B_\delta \cdot \delta_p}{\mu_0}, \quad (4.18)$$

де  $\delta_p = \delta' \cdot K_\delta$ , см;

$\delta' = \delta$  – для компенсованих ТЕД.

Для некомпенсованих ТЕД  $\delta'$  визначається залежно від відношення проміжків під краєм та центром полюса, яке може бути  $\frac{\delta_{кр}}{\delta_{ц}} = 2 \div 4$ . Нерівномірний повітряний проміжок необхідно привести до еквівалентного рівномірного повітряного проміжку, використовуючи коефіцієнт  $k_e$ , рисунок 7 [6].

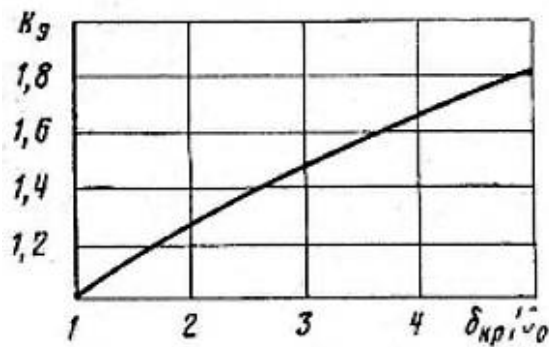


Рисунок 7 – Визначення коефіцієнта приведення нерівномірного повітряного проміжку до рівномірного

$K_\delta$  – коефіцієнт повітряного проміжку (коефіцієнт Картера).

$$K_\delta = \frac{t_1 + 10 \cdot \delta'}{b_{z1} + 10 \cdot \delta'} \cdot \frac{t_k + 10 \cdot \delta'}{b_{zk} + 10 \cdot \delta'}, \quad (4.19)$$

де  $t_1$  – зубчасте ділення якоря;

$b_{z1} = t_1 - b_n$  – ширина зубця на поверхні якоря;  
 $t_k$  – зубчасте ділення КО на поверхні полюса;  
 $b_{zk}$  – ширина зубця компенсаційної обмотки;  
 $\mu_0$  – магнітна проникливість повітря.

МРС сталевих ланок магнітного кола розраховуються з використанням кривих намагнічування сталей, з яких складається осердя ланки.

У місці стику полюса з остовом наявність щілини вважають товщиною 0,01 см, тоді  $F_{\delta j} \approx 0,008 B_m$ .

Розрахунок магнітного кола після вибору геометричних розмірів його ланок виконують для різних значень магнітного потоку:

$$\frac{\Phi}{\Phi_H} = 0,5; 0,8; 1,0; 1,15; 1,25 .$$

Дані розрахунків  $\Phi = f(F_0)$  рекомендується занести до таблиці 4.1 і побудувати у вигляді графічної залежності, яка має назву магнітної характеристики ТЕД.

Таблиця 4.1

Назва величини	Значення при $\Phi_{\delta}^*$				
	0,5	0,8	1,0	1,15	1,25
1	2	3	4	5	6
Основний магнітний потік $\Phi_{\delta}$ , Вб					
Магнітна індукція у повітряному проміжку (під серединою полюса) $B_{\delta}$ , Тл					
Магнітна індукція у сталевих ділянках, Тл: - в осерді головного полюса $B_m$ ; - у зубчатій зоні полюса $B_{zk}$ ; - у зубчатій зоні на висоті $h_{z1/3}$ $B_{z1/3}$ ; - у спинці якоря $B_a$ ; - у місці виходу з полюса в остов $B_j$ ; - у спинці остова $B_o$					

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6
<p>Напруженість магнітного поля сталевих ділянок, А/м:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>H_m</math>;</li> <li>- <math>H_{zk}</math>;</li> <li>- <math>H_{z1/3}</math>;</li> <li>- <math>H_a</math>;</li> <li>- <math>H_j</math>;</li> <li>- <math>H_o</math></li> </ul>					
<p>Магнітна напруга, А:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- повітряного проміжку <math>u_{M\delta}</math>;</li> <li>- полюсів <math>u_{Mm}</math>;</li> <li>- зубців компенсаційної обмотки <math>u_{Mzk}</math>;</li> <li>- зубцевої зони якоря <math>u_{Mz}</math>;</li> <li>- спинки якоря <math>u_{Ma}</math>;</li> <li>- місця виходу з полюса в остов <math>u_{Mj}</math>;</li> <li>- спинки остова <math>u_{Mo}</math></li> </ul>					
<p>Магніторушійна сила обмотки збудження на полюс</p> $F_f = \sum_k u_{MK}$					

Далі знаходиться повна МРС обмотки збудження:

$$F_{зб} = F_o + F_p, \quad (4.20)$$

де  $F_p$  – розмагнічувальна МРС поперечної реакції якоря.

Для некомпенсованих ТЕД  $F_p$  знаходиться у вигляді:

$$F_p = K_{ря} \cdot F_a, \quad (4.21)$$

$K_{ря}$  знаходиться залежно від  $B_{z1/3}$  і значення еквівалентного повітряного проміжку за кривими, рисунок 8 [6].

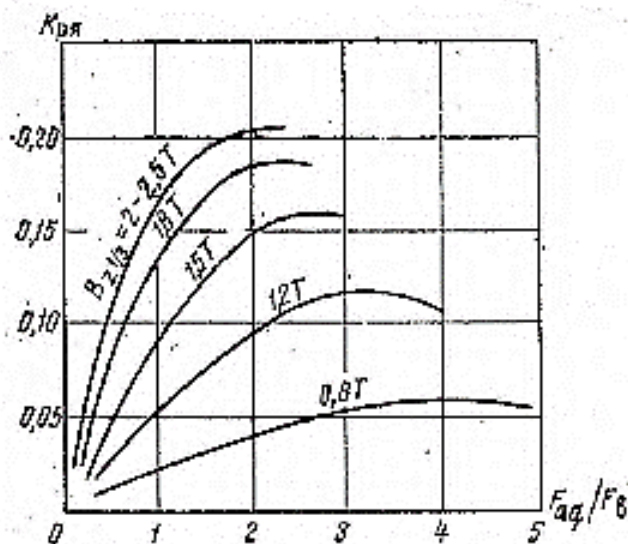


Рисунок 8 – Залежність  $K_{р\text{я}}(F_{aq}/F_0)$  при низці значень індукції у зубцях  $B_{z1/3}$

У компенсованих ТЕД вплив МРС реакції якоря на МРС збудження можна не враховувати. Тоді

$$F_{зб} = F_0. \quad (4.22)$$

Кількість витків обмотки збудження знаходиться за формулою

$$\omega_{зб} = \frac{F_{зб}}{I \cdot \beta_{\Pi}}, \quad (4.23)$$

де  $\beta_{\Pi}$  – коефіцієнт постійного шунтування обмотки збудження для ТЕД пульсуючого струму.

Значення  $\beta_{\Pi}$  дається у вихідних даних до проектування ( $\beta_{\Pi} \approx 0,92 \div 0,97$ ). Для двигунів постійного струму  $\beta_{\Pi} = 1$ . Якщо обмотка збудження з'єднується у дві паралельні гілки (ТЕД електропоїздів), то кількість витків обмотки треба подвоїти.

Ступінь насичення магнітної системи тягових двигунів впливає на їх тягові характеристики, регульовальні властивості та ін.

Коефіцієнт насичення

$$K_H = \frac{F_{зб}}{F_{\delta}}. \quad (4.24)$$

При  $K_H < 1,6$  магнітні системи тягових двигунів вважають малонасиченими, при  $K_H = 1,6 - 2,0$  – середньонасиченими, при  $K_H > 2$  – сильнонасиченими.

## 5 РОЗРАХУНОК КОМУТАЦІЇ ТА ДОДАТКОВИХ ПОЛЮСІВ

Забезпечення надійності комутації вважається найбільш важливою проблемою. Оптимальна комутація вимагає ретельного вибору обмотки якоря, величини полюсного перекриття, ширини електрощіток, обмежує значення перевантажень, швидкості обертання та ін.

Розрахунок комутації докладно розглянуто у главі 10 [6].

Метою даного розрахунку є визначення ширини зони комутації та величини реактивної електрорухомої сили (ЕРС). Цими двома показниками оцінюють якість комутації на етапі проектування ТЕД.

Ширина зони комутації – величина дуги на поверхні якоря, яку описує провідник обмотки в стані комутації, см,

$$b_{зк} = \pi D_a \left( u_k - \frac{a}{p} + \gamma + \varepsilon_k \right) / K, \quad (5.1)$$

де  $D_a$  – діаметр якоря;

$u_k$  – кількість колекторних пластин на паз;

$a$  – кількість пар паралельних гілок обмотки;

$p$  – кількість пар полюсів ТЕД;

$\gamma$  – щіткове перекриття;

$\varepsilon_k$  – вкорочення обмотки по колекторних пластинах;

$K$  – кількість колекторних пластин.

Щіткове перекриття визначаємо за формулою:

$$\gamma = \frac{b_{щ}}{t_k}, \quad (5.2)$$

де  $b_{щ}$  – ширина щітки;  
 $t_k$  – колекторний поділ;

$$t_k = \frac{\pi \cdot D_k}{K}. \quad (5.3)$$

Укорочення по колекторних пластинах:

$$\varepsilon_k = K/2p - Y_1, \quad (5.4)$$

де  $Y_1$  – перший частковий крок по елементарних пазах (в колекторних діленнях).

Величина  $b_k$  має бути в межах:

- для некомпенсованих ТЕД  $b_k \leq 0,7 \cdot (\tau - b_p)$ ;

- для компенсованих ТЕД  $b_k \leq 0,7 \cdot (\tau - b_n)$ .

Значення  $b_k$  накладає обмеження на вибір величини полюсного перекриття або  $b_p$ , про що зазначалося вище.

Також одним з головних параметрів комутації є величина реактивної ЕРС, яка використовується:

1) для оцінювання напруженості комутації;

2) як вихідна величина при визначенні кількості витків додаткового полюса.

Середня величина реактивної ЕРС, В,

$$e_p = \frac{\mu_0 \cdot 8 \cdot i_a \cdot u_k \cdot w_c^2 \cdot l_a \cdot \lambda \cdot V_k}{t_k \left( u_k - \frac{a}{p} + \gamma + \varepsilon_k \right)}, \quad (5.5)$$

де  $i_a$  – струм паралельної гілки обмотки якоря;

$W_c$  – кількість витків секції (для ТЕД зазвичай  $W_c=1$ );

$V_k$  – лінійна швидкість на поверхні колектору;

$t_k$  – колекторний поділ;

$\lambda$  – відносне значення магнітної провідності потоків розсіювання, які зчеплені з комутуючими секціями.

Струм паралельної гілки обмотки якоря

$$i_a = \frac{I_a}{2a}. \quad (5.6)$$

Лінійна швидкість на поверхні колектора

$$V_k = \frac{\pi D_k \cdot n}{60} \quad (5.7)$$

Загальне значення магнітної провідності окремих елементів секції

$$\lambda = \lambda_{n1} + \lambda_{n2} + \lambda_k + \lambda_n, \quad (5.8)$$

де  $\lambda_{n1}$  – магнітна провідність шляху потоку розсіювання для частини паза над міддю;

$\lambda_{n2}$  – магнітна провідність шляху потоку розсіювання для частини паза, що зайнята міддю, секцій;

$\lambda_k$  – магнітна провідність шляху потоку розсіювання по коронках зубців;

$\lambda_n$  – магнітна провідність шляху потоку розсіювання лобових частин обмотки.

Ескіз паза наведено на рисунку 9.

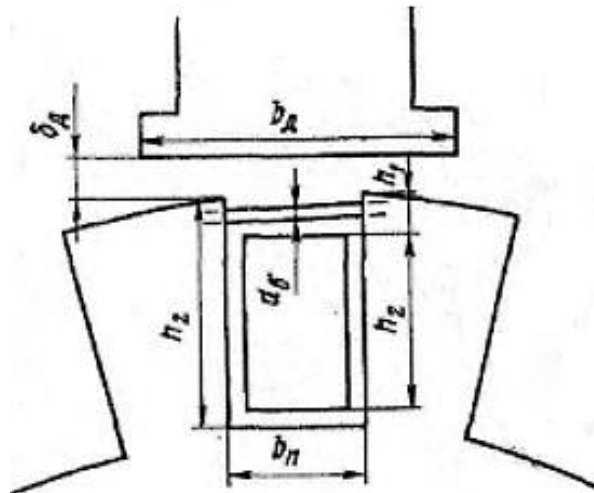


Рисунок 9 – Ескіз паза осердя якоря

Магнітна провідність для частини паза над міддю [6]

$$\lambda_{n1} = K_{\text{банд.}} \cdot \frac{h_1}{b_n''} \quad (5.9)$$

де  $K_{\text{банд.}}$  – коефіцієнт, що враховує збільшення магнітної провідності через наявність бандажа;

$K_{\text{банд.}} = 1$  при немагнітних бандажах, при магнітних бандажах  $K_{\text{банд.}} \approx 2$ ;

$h_1$  – висота, що визначається сумою товщини клина, прокладки під ним та ізоляцією зверху до міді;

$b_n''$  – ширина паза над міддю обмотки;

$$b_n'' = b_n' + 1,74, \quad (5.10)$$

де  $b_n'$  – ширина паза у штампі.

Для частини паза зайнятого міддю

$$\lambda_{n2} = K_i \cdot \frac{h_2}{3b_n'}, \quad (5.11)$$

де  $h_2$  – висота паза, зайнятого міддю;

$k_i$  – коефіцієнт, що враховує зменшення потоку розсіювання в процесі комутації в верхній частині провідників, визначається залежно від приведеної висоти провідника. Коефіцієнт  $k_i$  знаходимо за кривою  $k_i(\xi)$  (рисунок 10) залежно від величини  $\xi$  [6].

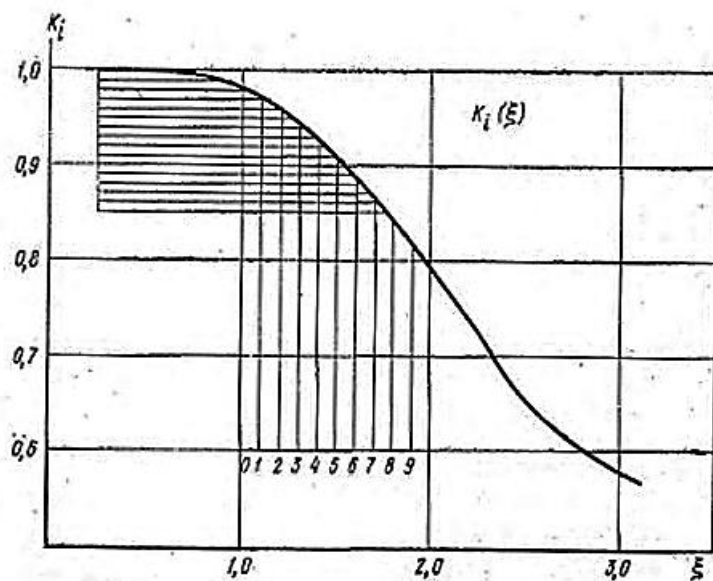


Рисунок 10 – Визначення коефіцієнту  $k_i$



$$\xi = h_{np} \sqrt{\frac{b_M \cdot \omega \cdot \lambda_M \cdot \mu_0}{b_n' \cdot 2}}, \quad (5.12)$$

де  $h_{np}$  – висота елементарного провідника, м;

$b_M$ ,  $b_n'$  – ширина міді в пазі та паза в штампі (в однакових одиницях);

$\omega$  – колова частота;

$\lambda_M = 38 \cdot 10^6$  – питома провідність міді при очікуваній температурі, См/м.

Колову частоту визначаємо за формулою:

$$\omega = 2\pi f'; \quad (5.13)$$

$$f' = \frac{V_k}{2t_k(u_k + \gamma - \frac{a}{p})}. \quad (5.14)$$

Провідність по коронках зубців

$$\lambda_k = \frac{b_d}{4 K_{\delta_d} \cdot \delta_d}, \quad (5.15)$$

де  $K_{\delta_d}$  – коефіцієнт повітряного проміжку додаткового полюса;

$b_d \approx 1,5t_1$  – ширина наконечника додаткового полюса.

$$K_{\delta_d} = \frac{t_1 + 10\delta_d}{e_{z1} + 10\delta_d}, \quad (5.16)$$

де  $\delta_d$  – величина першого повітряного проміжку.

Провідність лобових частин при немагнітних бандажах

$$\lambda_l = 0,465 \cdot \frac{l_n}{l_a} \cdot \lg\left(1 + \frac{\pi \cdot \tau}{4 \cdot h_z}\right), \quad (5.17)$$

де  $l_n$  – сумарна довжина передньої та задньої лобових частин секцій, яку беруть з геометричного розрахунку секцій.

## Провідність лобових частин при магнітних бандажах

$$\lambda_l = 0,062 \cdot \mu_o \cdot \frac{l_l}{l_a} \cdot \frac{\tau}{h_z}. \quad (5.18)$$

Як правило,  $\lambda = 3,5 \div 6$ .

Значення реактивної ЕРС при найбільшій швидкості обертання не має перевищувати  $8 \div 9$  В, що призводить до обмеження потужності двигуна в режимах послабленого поля.

### *Розрахунок додаткових полюсів*

Додаткові полюси мають створювати в зоні комутації магнітне поле з індукцією  $B_k$ , достатньою для наведення у проміжку комутуючої ЕРС  $e_k$ , яка дорівнює реактивній ЕРС та направлена їй назустріч [6].

$$e_k = e_p = 2B_k \cdot l_a \cdot w_c \cdot V_{ан}, \quad (5.19)$$

звідси

$$B_k = \frac{e_p}{2l_a \cdot w_c \cdot V_{ан}}. \quad (5.20)$$

Ширина наконечника додаткового полюса вибирається кілька менше від ширини зони комутації:

$$b_\partial = b_k - 3 \cdot \delta_\partial. \quad (5.21)$$

Повітряний проміжок під додатковим полюсом збоку якоря  $\delta_\partial$  для компенсованих машин дорівнює  $9 \div 10$  мм. Крім того, для зменшення потоків розсіювання застосовують другий повітряний проміжок  $\delta'_\partial$  між осердям додаткового полюса й остовом, як правило,  $4 \div 6$  мм.

Ширина осердя додаткового полюса  $b_{m\partial}$  визначається допустимим значенням індукції  $B_\partial$ . Для забезпечення задовільної комутації при перевантаженнях магнітне коло додаткових полюсів має бути ненасиченим, а при номінальному струмі  $B_\partial \leq 0,75$  Тл.

Розрахункове значення індукції в осерді полюсів  $B_{\partial}$  визначається за формулою

$$B_{\partial} \approx B_k \sigma_{\partial} \frac{b_{\partial} + 3\delta_{\partial}}{b_{m\partial}} \cdot \frac{l_a}{l_{\partial}}, \quad (5.22)$$

де  $\sigma_{\partial}$  – коефіцієнт магнітного розсіювання.

Для компенсованих ТЕД  $\sigma_{\partial} \approx 2$ , а для некомпенсованих ТЕД  $\sigma_{\partial} \approx 3$ .

Прийнявши  $B_{\partial}$  у межах допустимих значень, за формулою (4.9) можна визначити ширину осердя  $b_{m\partial}$ .

Магніторушійна сила, що необхідна для створення індукції  $B_k$  при наявності компенсаційної обмотки і другого повітряного проміжку, дорівнює

$$F_{\partial} = F_a - F_{ko} + F_{\delta\partial} + F'_{\delta'\partial}, \quad (5.23)$$

де  $F_a = A \cdot \frac{\tau}{2}$  – МРС реакції якоря під серединою додаткового полюса, А;

$F_{\delta\partial}$  – падіння МРС у повітряному проміжку збоку якоря, А;

$F'_{\delta'\partial}$  – падіння МРС у повітряному проміжку збоку остова, А;

$F_{ko} = W_k \cdot I_a$  – МРС компенсаційної обмотки, А.

Падіння МРС у першому повітряному проміжку, А,

$$F_{\delta\partial} = 0,8B_k \cdot \delta_{\partial} \cdot k_{\delta\partial} \cdot k' \cdot 10^4, \quad (5.24)$$

Падіння МРС у другому повітряному проміжку, А,

$$F'_{\delta'\partial} = 0,8B_{\partial} \cdot \delta_{\partial} \frac{b_{m\partial}}{b_{m\partial} + 3\delta'_{\partial}} \cdot 10^4, \quad (5.25)$$

де  $\delta_{\partial}$  і  $\delta'_{\partial}$  приймаються у сантиметрах;

$k' = 1,03 - 1,05$  – коефіцієнт, що враховує відхилення у величині проміжку через виробничі відхилення;

$k_{\delta\partial}$  – коефіцієнт повітряного проміжку (формула (5.16)).

Скориставшись законом повного струму ( $F_{\partial} = I_{aH} \cdot W_{\partial}$ ), можна визначити кількість витків додаткового полюса

$$W_{\partial} = \frac{F_{\partial}}{I_{aH}} . \quad (5.26)$$

Коефіцієнт компенсації реакції якоря

$$\nu = \frac{F_D + F_{KO}}{F_{ря}} . \quad (5.27)$$

## 6 ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛЬНИХ УМОВ НА КОЛЕКТОРІ ТЕД

Підвищення напруги між сусідніми колекторними пластинами вище допустимого рівня може спричинити коловий вогонь по колектору. Максимальне значення напруги, що встановлене практичним досвідом, не має перевищувати

$$\Delta u_{k \max} \leq 35 \div 37 \text{ В.} \quad (6.1)$$

Ця максимальна напруга визначається максимальним значенням магнітної індукції у повітряному проміжку між головним полюсом та якорем, яка може сильно зростати під краєм полюса в некомпенсованих ТЕД завдяки дії поперечної реакції якоря.

У компенсованих ТЕД, в яких середнє значення напруги між колекторними пластинами не перевищує  $16 \div 18$  В, дія реакції якоря не призводить до критичного стану потенціальні умови на колекторі. Вони залишаються на рівні тих, які теоретично існують у режимах без навантаження. Саме тому оцінку потенціальних умов рекомендується проводити для некомпенсованих ТЕД. Якщо не враховувати падіння напруги в секції якірної обмотки, то напруга між двома сусідніми колекторними пластинами дорівнює ЕРС, яка наводиться в провідниках при їх обертанні в магнітному полі. Цю ЕРС у будь-якій точці полюсного ділення можна визначити за законом Фарадея:

$$e_x \approx \Delta u_{kx} = 2 \cdot \frac{p}{a} \cdot w_c \cdot B_{\delta x} \cdot l_a \cdot v_a, \quad (6.2)$$

де  $\frac{p}{a}$  – кількість пар полюсів та паралельних гілок якоря.

$w_c$  – кількість витків у секції;

$B_{\delta x}$  – поточне значення індукції в місці, яке розташовано від осі полюса на відстані  $x$ , Тл;

$l_a$  – активна довжина провідника обмотки якоря, м;

$v_a$  – колова швидкість якоря, м/с.

Початок координати  $x$  приймається на осі головного полюса.

При проектуванні використовують поняття «середня міжламельна напруга», що визначається як

$$\Delta u_{kcp} = \frac{2pU_k}{K}, \quad (6.3)$$

де  $U_k$  – напруга, що підведена до колектора, В;

$K$  – кількість колекторних пластин.

При розрахунках треба враховувати нелінійність феромагнітних ділянок магнітного кола, де проходить потік поперечної реакції якоря. У ТЕД вирішення цього завдання полегшується тим, що найбільш небезпечні режими за потенціальними умовами існують при ослабленому полі, коли вплив насичення феромагнітних ділянок на кінцевий результат розрахунку є незначним. При визначенні міжламельної напруги не враховують падіння магнітної напруги в сталевих ділянках магнітопроводу і вважають, що вся МРС обмотки збудження прикладається до повітряного проміжку. Отже, залежність між магнітною індукцією у повітряному проміжку та МРС з урахуванням поперечної реакції якоря визначається у лінійному вигляді так:

$$B_x \approx \mu_0 \cdot \frac{F_{зб} \pm A \cdot x}{\delta_x \cdot K_{\delta x}}, \quad (6.4)$$

де  $F_{зб}$  – МРС обмотки збудження;

$K_{\delta x}$  – коефіцієнт повітряного проміжку.

Для зниження впливу поперечної реакції якоря на поле головних полюсів застосовують нерівномірний повітряний проміжок. Значення повітряного проміжку під полюсом зростає до краю полюса. Проміжок роблять ексцентричним із відношенням проміжку під краєм полюса до проміжку під центром полюса  $\frac{\delta_{Kp}}{\delta_0} = 2 \div 4$ . При ексцентричному проміжку його значення на відстані  $x$  від осі полюса складає

$$\delta_x = \delta_0 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\delta_{Kp}}{\delta_0} - 1 \right) \cdot \left( \frac{2 \cdot x}{b_p} \right)^2 \right], \quad (6.5)$$

де  $b_p$  – ширина полюсної дуги (геометрична).

Тоді величина магнітної індукції у будь-якій точці під головним полюсом для ТЕД без КО:

$$B_x = \mu_0 \cdot \frac{F_{зб} \pm A \cdot x}{D}, \quad (6.6)$$

де

$$D = \frac{t_1 + 10 \cdot \delta_0 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\delta_{Kp}}{\delta_0} - 1 \right) \cdot \left( \frac{2 \cdot x}{b_p} \right)^2 \right]}{b_{z1} + 10 \cdot \delta_0 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\delta_{Kp}}{\delta_0} - 1 \right) \cdot \left( \frac{2 \cdot x}{b_p} \right)^2 \right]} \cdot \delta_0 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\delta_{Kp}}{\delta_0} - 1 \right) \cdot \left( \frac{2 \cdot x}{b_p} \right)^2 \right];$$

$$-\frac{b_p}{2} \leq x \leq \frac{b_p}{2}; \quad \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Для покращення потенціальних умов на колекторі застосовують компенсаційну обмотку. Ця міра сприяє рівномірному розподіленню індукції у повітряному проміжку. Формула (6.4) має такий вигляд:

$$B_x = \mu_0 \cdot \frac{F_{зб} \pm x A \mp x A_{ко}}{K_\delta \cdot \delta}, \quad (6.7)$$

Повітряний проміжок  $\delta$  під головним полюсом роблять рівномірним.

Визначивши індукцію  $B_x$  за формулами (6.6) або (6.7), розраховуємо міжламельну напругу (ЕРС) за формулою (6.2) у будь-якій точці під головним полюсом.

## 7 ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕД

### 7.1 Визначення навантажувальних характеристик

Насамперед розраховуються та будуються навантажувальні характеристики:

$$\frac{E}{n} = f(I_{зб}) \text{ при } I = I_a = const. \quad (7.1)$$

Характеристики треба розрахувати та побудувати для значень струмів якоря ( $I = I_a$ ) від 0,25 до  $2 \cdot I_{ном}$ . Характеристики розраховуються для незалежного збудження. Першою будується характеристика холостого ходу при  $I = 0$ . Вона є відображенням магнітної характеристики, розрахованої у розділі 4.

Магнітна характеристика – це залежність  $\Phi = f(F_0)$ . Враховуючи, що  $E = C_E \cdot \Phi \cdot n$ , а  $F_0 = I_{зб} \cdot \omega_{зб}$ , знаходимо складові характеристики холостого ходу:

$$\frac{E}{n} = C_E \cdot \Phi ; C_E = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} ; I_{зб} = \frac{F_0}{\omega_{зб}}. \quad (7.2)$$

Далі визначаються навантажувальні характеристики для струмів якоря: 0,25; 0,5; 1,0; 1,5;  $2 \cdot I_{ном}$ . Для їх побудови знаходиться значення дії поперечної реакції якоря, яка розмагнічує магнітну систему в некомпенсованих ТЕД. Дані розрахунків заносяться до таблиці 7.1 і будуються у вигляді графіків.

Таблиця 7.1 – Навантажувальні характеристики ТЕД

$I_{зб}, A$	0	$0,5 \cdot I_H$	$0,8 \cdot I_H$	$1,0 \cdot I_H$	$1,15 \cdot I_H$	$1,25 \cdot I_H$
$F_0, A$						
$\Phi, Tл$						
$E/n$						

Для компенсованих ТЕД не враховують дію реакції якоря, у зв'язку з цим усі навантажувальні характеристики подібні до характеристики холостого ходу  $E/n = f(I_{зб})$  при  $I = 0$ .

## 7.2 Визначення швидкісної характеристики

Швидкісна характеристика  $n = f(I)$  знаходиться при незмінній напрузі на якорі ТЕД за формулою:

$$n = \frac{U - (I \cdot \sum r + 2)}{E/n}, \quad (7.3)$$

де  $\sum r = r_a - r_{зб} + r_{\partial} + r_k$ ;

цифра 2 – це падіння напруги в щітковому контакті.

При ослабленому полі  $r'_{зб} = r_{зб} \cdot \beta$ .

При повному полі або при постійному шунтуванні обмотки збудження для двигунів пульсуючого струму значення  $n$  знаходяться за допомогою навантажувальних характеристик ТЕД. По осі абсцис відкладається значення струму збудження  $I_{зб} = I$  або  $I_{зб} = \beta \cdot I$  для двигунів пульсуючого струму, а по осі ординат знаходиться значення  $E/n$  за навантажувальною характеристикою, яка відповідає значенню заданого струму навантаження  $I$ . За значенням  $E/n$  визначається швидкість обертання або руху ЕРС за наведеними формулами.

При ослабленому полі розрахунок характеристик подібний.

По осі абсцис відкладається значення струму збудження  $I_{зб} = \beta \cdot I$ , а по осі ординат знаходиться значення  $E/n$  для заданого струму навантаження  $I$ .



Дані розрахунків заносяться до таблиці 7.2 і будуються графіки для вибраних значень  $\beta$ .

$\beta_{\min}$  не рекомендується брати меншим за 0,3 за умовами потенціальної стійкості.

Таблиця 7.2 – Швидкісна характеристика

$I$	$0,5 \cdot I_H$	$0,8 \cdot I_H$	$1,0 \cdot I_H$	$1,15 \cdot I_H$	$1,25 \cdot I_H$
$n$ , об/хв, при $\beta_{n.n.}$					
$n$ , об/хв, при $\beta_{o.n.}$					

### 7.3 Розрахунок характеристик ККД

Значення ККД ТЕД визначається за формулою:

$$\eta = \frac{U \cdot I - \sum \Delta P}{U \cdot I} = P_1 \cdot \left( 1 - \frac{\sum \Delta P}{P_1} \right), \quad (7.4)$$

де  $P_1 = U \cdot I$  – підведена потужність до ТЕД;

$\sum \Delta P$  – витрати потужності в ТЕД.

$$\sum \Delta P = I^2 \cdot \sum r + 2 \cdot I + P_{\text{дод}} + P_0, \quad (7.5)$$

де  $I^2 \cdot \sum r$  – джоулеві втрати потужності на опорах обмоток електричного кола якоря;

$2 \cdot I$  – втрати потужності в перехідному колі щіток;

$P_{\text{дод}}$  – додаткові витрати потужності, що дорівнюють  $0,05 \cdot P_1$  для компенсованих ТЕД і  $0,01 \cdot P_1$  для некомпенсованих машин;

$P_0$  – втрати потужності без навантаження.

$$P_0 = P_{\text{СТ}} + P_{\text{Щ}} + P_{\text{підш}}, \quad (7.6)$$

де  $P_{\text{СТ}}$  – магнітні втрати в двигуні при холостому ході;

$P_{\text{Щ}}$  – втрати на тертя щіток;

$P_{\text{підш}}$  – механічні втрати в підшипниках.

Магнітні втрати в двигуні при холостому ході

$$P_{CT} = 2,25 \cdot p_z \cdot G_z + p_a \cdot G_a, \quad (7.7)$$

де  $p_z$  – питомі втрати в зубцях якоря, Вт/кг;

$G_z$  – вага зубців якоря, кг;

$p_a$  – питомі втрати в ярмі якоря, Вт/кг;

$G_a$  – вага тіла якоря, кг.

Питомі втрати в зубцях якоря

$$p_z = \left[ 0,044 \cdot f + 5,6 \cdot \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right] \cdot (B_{z1/3})^2. \quad (7.8)$$

Значення  $B_z$  розраховуємо за формулою:

$$B_{z1/3} = \frac{\Phi}{S_{z1/3}}. \quad (7.9)$$

Питомі втрати в ярмі якоря

$$p_a = \left[ 0,044 \cdot f + 5,6 \cdot \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right] \cdot (B_a)^2. \quad (7.10)$$

Вага зубців якоря, кг,

$$G_z = \left\{ \frac{\pi}{4} [D_a^2 - (D_a - 2 \cdot h_z)^2] - Z \cdot b_n \cdot h_z \right\} \cdot l_a \cdot k_{CT} \cdot j_{CT}. \quad (7.11)$$

Вага тіла якоря, кг,

$$G_a = \frac{\pi}{4} [(D_a - 2 \cdot h_z)^2 - D_i^2 - m_k \cdot d_k^2] \cdot l_a \cdot k_{CT} \cdot j_{CT}, \quad (7.12)$$

де  $m_k$  – кількість вентиляційних каналів;

$j_{CT}$  – щільність сталі, кг/см<sup>3</sup>;

$d_k$  – діаметр вентиляційних каналів;

$k_{CT}$  – коефіцієнт сталі.

Втрати на тертя щіток

$$P_{\text{Щ}} = 9,81 \cdot \Sigma S_{\text{Щ}} \cdot p_{\text{Щ}} \cdot \rho \cdot V_k, \quad (7.13)$$

де  $\Sigma S_{\text{Щ}}$  – загальна площа прилягання щіток до колектора, см<sup>2</sup>;

$p_{\text{Щ}}$  – питоме навантаження на щітку;

$\rho$  – коефіцієнт тертя щіток по колектору, кг/см<sup>2</sup>;

$V_k$  – колова швидкість колектора, м/с.

$$V_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n}{60}. \quad (7.14)$$

Механічні втрати в підшипниках

$$P_{\text{підш}} = 0,002 \cdot U \cdot I_H. \quad (7.15)$$

Дані розрахунків заносяться до таблиці 7.3 і будується графік характеристики ККД.

Таблиця 7.3 – Характеристика ККД

$I$		$0,5 \cdot I_H$	$0,8 \cdot I_H$	$1,0 \cdot I_H$	$1,15 \cdot I_H$	$1,25 \cdot I_H$
$P_1$ , кВт						
$\beta_{n.n.}$	$\Sigma \Delta P$ , кВт					
	$\eta$					
$\beta_{o.n.}$	$\Sigma \Delta P$ , кВт					
	$\eta$					

#### 7.4 Визначення характеристик рухомого моменту на валу ТЕД

Моментну характеристику  $M = f(I)$  визначають за формулою:

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I, \quad (7.16)$$

$$\text{де } C_M = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a}.$$

Результати розрахунків заносяться до таблиці 7.4 і будується графік моментної характеристики.

Таблиця 7.4 – Моментна характеристика

$I$	$0,5 \cdot I_H$	$0,8 \cdot I_H$	$1,0 \cdot I_H$	$1,15 \cdot I_H$	$1,25 \cdot I_H$
$M$ при $\beta_{n.n.}$					
$M$ при $\beta_{o.n.}$					

## ПИТАННЯ ДО ЗАХИСТУ КУРСОВОЇ РОБОТИ

- 1 Що характеризує машинна стала Арнольда?
- 2 З якою метою розраховують магнітне коло тягового двигуна?
- 3 Як враховується зубчаста будова якоря при визначенні магнітної напруги повітряного проміжку?
- 4 Як визначається коефіцієнт насичення магнітного кола?
- 5 Що являє собою магнітна характеристика тягового двигуна?
- 6 З яких міркувань визначається тип обмотки якоря тягового двигуна?
- 7 Як впливає застосування компенсаційної обмотки на розміри і вагу машини?
- 8 Чому секції обмоток якорів тягових двигунів виконують одновитковими?
- 9 Які умови симетрії обмоток?
- 10 У яких випадках застосовують вирівнювачі та в якому місці тягового двигуна їх розташовують?
- 11 Як впливає поперечна реакція якоря на роботу тягового двигуна?
- 12 Від яких факторів залежить максимально допустима напруга між пластинами колектора?
- 13 У яких випадках виконують «скос» пазів на якорі тягового двигуна?

14 Як оцінюють якість комутації на стадії проектування тягового двигуна?

15 З яких міркувань роблять другий повітряний проміжок у магнітному колі додаткових полюсів?

16 Як впливає ширина щітки на величину реактивної ЕРС?

17 Як пов'язані ККД та потужність тягового двигуна?

18 При якій температурі визначають електричні втрати в міді обмоток?

19 Ізоляцію яких класів нагрівостійкості застосовують у тягових двигунах?

20 Як розраховують електромеханічні характеристики тягового двигуна?

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори: навч. посіб.; за ред. В. І. Мілих. Київ: Каравела, 2018. 452 с.

2 Загірняк М. В., Невзлін Б. І. Електричні машини: підручник. Вид. 2-ге, перероб. і доповн. Київ: Знання, 2009. 399 с.

3 Белікова Л. Я., Шевченко В. П. Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Одеса: Наука і техніка, 2012. 478 с.

4 Тяговый электродвигатель ТЛ-2К1. URL: <https://poznayka.org/s91107t1.html>.

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

6 Проектирование тяговых электрических машин: учеб. пособ. для вузов ж.-д. трансп. / М. Д. Находкин, Г. В. Василенко, В. И. Бочаров, М. А. Козорезов; под ред. М. Д. Находкина. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва: Транспорт, 1976. 624 с.

**ДОДАТОК А**  
**Варіанти завдання на курсову роботу**

Номер варіанта		Тип електродвигуна
1	14	НБ-406
2	15	ТЛ-2К
3	16	НБ-420А
4	17	НБ-412М
5	18	НБ-412К
6	19	НБ-418К
7	20	УРТ-110А
8	21	РТ-117
9	22	РТ-51Д
10	23	1ДТ.003.8У
11	24	1ДТ.003.11У
12	25	ДК-116А
13	26	ДК-117А

## ДОДАТОК Б

### Основні технічні дані тягових електродвигунів

Таблиця Б.1 – Основні технічні дані ТЕД електровозів

Параметри	Значення параметрів тягової машини типу						
	<b>НБ-406</b>	<b>ТЛ-2К</b>	<b>НБ-420А</b>	<b>НБ-412М</b>	<b>НБ-412К</b>	<b>НБ-418К</b>	
1	2	3	4	5	6	7	
Рід струму	постійний	постійний	пульсуючий	пульсуючий	пульсуючий	пульсуючий	
Кількість полюсів $2p$	4	6	4	6	6	6	
Напряга $U_{н3}$ , В	1500/3000	1500/3000	1500/3000	1450	1600	950	
Номинальна потужність $P_{н3}$ , кВт	470	560		550	550	740	
Номинальний струм $I_{н3}$ , А	340	400		410	410	820	
Номинальна частота обертання $n_{н3}$ , об/хв	765	815		825	895	915	
Годинна потужність $P_2$ , кВт	525	650	700	690	690	790	
Годинний струм $I_2$ , А	380	466	495	515	515	880	
Годинна частота обертання $n_2$ , об/хв	735	770	885	755	850	890	
Швидкість якоря $V_{я}$ , м/с	25,4	29,8	30,6	29,3	32,9	30,8	
Діаметр якоря, мм	660	740	660	740	740	660	
Довжина пакета якоря, мм	400	430	375	440	440	385	
Кількість пазів якоря	58	75	58	75	75	87	

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7
Розміри паза $h_n \times b_n$ , мм	13,76×51	12,7×47,5	13,8×51,1	12×43,5	12×43,5	10×42,2
Розміри дроту, мм	2(1,08×8,6)	2(0,9×8)	2,63×9,3	2(1×7,4)	2(1×7,4)	3,53×6,9
Кількість провідників	812	1050	696	1050	1050	696
Діаметр колектора, мм	565	660	480	660	660	520
Кількість колекторних пластин	406	525	348	525	525	348
Кількість витків головного полюса	48	19	25	34	20	11
Проміжок $\delta_{кр} / \delta_{ц}$ , мм/мм	15,4/7,7	4,5/4,5	5,15/5,15	15/7,5	4,5/4,5	4,7/4,7
Коефіцієнт полюсного перекриття $\alpha$	0,665	0,7	0,705	0,65	0,62	0,67
Кількість витків додаткового полюса	34	10	15	21	10	8
Магнітний потік $\Phi \cdot 10^{-2}$ , Вб	14,1	10,6	14	10,6	10,3	8,84
Кількість витків комп. обмотки	-	10	15	-	10	6



Таблиця Б.2 – Основні технічні дані ТЕД електропоїздів серії EP

Параметри	Значення параметрів тягової машини типу		
	УРТ-110А	РТ-117	РТ-51Д
1	2	3	4
Серія електропоїзда	EP2	EP22	EP9
Рід струму	постійний	постійний	пульсуючий
Напруга, В	1500	750	825
Коефіцієнт збудження: - номінальний; - мінімальний	0,5 0,5	0,5 0,23	0,54 0,32
Потужність на валу, кВт	200	230	160
Струм, А	146	344	215
Годинна частота обертання, об/хв	1145	800	960
Осердя якоря			
Діаметр зовнішній, мм	520	520	520
Діаметр внутрішній, мм	135	–	135
Кількість пазів	46	46	47
Розміри паза $h_n \times b_n$ , мм	43×13,6	45,7×13,3	43×13,8
Обмотка якоря			
Тип	хвильова	петльова	хвильова
Кількість провідників загальна	658	644	470
Кількість провідників у пазу	14	14	10
Кількість паралельних гілок $2a$	2	4	2
Розміри провідника $b_m \times h_m$ , мм	1×13,5	(10×74)×2	1,81×14,5
Опір обмотки при 20°C, Ом	0,164	0,0379	0,056

## Продовження таблиці Б.2

1	2	3	4
Колектор			
Діаметр, мм	460	440	460
Довжина робочої частини, мм	79	100	88
Кількість колекторних пластин	329	322	235
Колекторне ділення $t_{к3}$ , мм	4,4	4,3	6,14
Щітки			
Кількість щіткоутримувачів	4	4	4
Кількість щіток в одному щіткоутримувачі	2	2	2
Розміри щіток $b_{щ} \times l_{щ}$ , мм	16×32	20×40	(12,5×2)×32
Котушки головних полюсів			
Кількість полюсів	4	4	4
Кількість витків $W_{zn}$	76	58	68
Опір обмотки при 20°C, Ом	0,182	0,0965	1,128
Котушки додаткових полюсів			
Кількість витків $W_{дн}$	57	25	37
Опір обмотки при 20°C, Ом	0,0695	0,0127	0,025
Повітряні проміжки			
Проміжок під головними полюсами $\delta_{щ}/\delta_{кр2}$ , мм			12 (4,75)
Проміжок під дод. полюсами збоку якоря, мм	6	6,5	6
Проміжок під дод. полюсами збоку остова, мм	4,5	2,5	3,5

Таблиця Б.3 – Основні технічні дані ТЕД електропоїздів серії ЕПЛ

З/п	Параметри	Значення параметрів тягової машини типу	
		1ДТ.003.8У	1ДТ.003.11У
1	2	3	4
1	Серія електропоїзда	ЕПЛ2Т	ЕПЛ9Т
2	Режим роботи короткочасний	60 хвилин	
2.1	Потужність, кВт	240	220
2.2	Струм, А	350	295
2.3	Напруга, В	750	825
2.4	Ступінь збудження, %	20	50
2.5	Режим роботи	годинний	
2.6	Частота обертання, об/хв	1240	820
2.7	Коефіцієнт пульсації, %		25
2.8	ККД, %	91,5	90
3	Максимальна експлуатаційна частота обертання, об/хв	2065	2165
4	Напрямок обертання	в обидві сторони	в обидві сторони
5	Збудження	послідовне	послідовне
6	Спосіб охолодження	самовентиляція	самовентиляція
7	Ізоляція обмоток відносно корпусу на номінальну напругу, В	3300	2000
8	Клас нагрівостійкості ізоляції обмоток	F	F
	Опір обмотки якоря при 20°C, Ом		0,050 ± 0,003
	Опір обмотки головних полюсів при 20°C, Ом		0,097 ± 0,0058

Продовження таблиці Б.3

1	2	3	4
	Опір обмотки додаткових полюсів при 20°C, Ом		0,0152 ± 0,00091
9	Маса, кг, не більше	2300	2300
10	Дані щіток: - марка; - розміри, мм; - найменший радіальний розмір, мм; - тиск на щітку, Н (кгс); марки ЕГ2А; марки ЕГ61А	ЕГ2А або ЕГ61А (2×10)×40×50 26  22,5 ÷ 25 (2,3 ÷ 2,55) 25,5 ÷ 27,5 (2,6 ÷ 2,8)	ЕГ61А (2×10)×40×50 26  25,5 ÷ 27,5 (2,6 ÷ 2,8)
11	Кількість щіток	8	
12	Дані колектора, мм: - діаметр; - найменший діаметр; - проміжок між колектором та обіймою щіткоутримувача	440  424 3 ± 1	440  424 3 ± 1

Таблиця Б.4 – Основні технічні дані ТЕД поїздів метрополітену

Параметри	Значення параметрів тягової машини типу	
	ДК-116А	ДК-117А
1	2	3
Якір		
Діаметр, мм	280	306
Внутрішній діаметр, мм	75	90
Ефективна довжина осердя, мм	260	282
Кількість пазів	35	42
Розміри паза, мм	11,35×31	9,4×23,2
Кількість сторін секцій у пазу	10	10
Кількість витків у секції	1	1
Кількість ефективних провідників у пазу	10	10
Кількість провідників обмотки	350	420
Обмотка	хвильова	петльова
Маса міді обмотки, кг	29,0	27,3
Опір обмотки при 20°C, Ом	0,0604	0,0285
Розрахункова напруга ізоляції обмотки, В	750	750
Клас ізоляції дроту	Н	Н
Головні полюси		
Кількість полюсів	4	4
Розміри дроту, мм	1,81×25	2,26×25
Кількість витків обмотки	32	26

## Продовження таблиці Б.4

1	2	3
Маса міді обмотки, кг	48	52
Клас ізоляції обмотки	F (H)	F
Опір обмотки при 20°C, Ом	0,0445	0,0316
Полусне ділення, мм	220	240
Ширина осердя полюса, мм	–	104
Розрахункова напруга ізоляції обмотки, В	750	750
Додаткові полюси		
Кількість полюсів	4	4
Розміри дроту, мм	2,26×25	3,28×25
Кількість витків обмотки	26	15
Маса міді обмотки, кг	35,2	36
Клас ізоляції обмотки	F	F
Опір обмотки при 20°C, Ом	0,0242	0,0106
Ширина осердя полюса, мм	–	34
Розрахункова напруга ізоляції обмотки, В	750	750
Колектор		
Діаметр, мм	245	250
Довжина робочої частини, мм	70	72
Кількість колекторних пластин	175	210
Кількість колекторних пластин на паз	5	5
Щітки		

Продовження таблиці Б.4

1	2	3
Кількість щіткоутримувачів	4	4
Кількість щіток у щіткоутримувачі	2	2
Розміри щітки, мм	16×32×40	20×32×50
Годинний режим		
Напруга на затисках, В	375	375
Струм обмотки якоря, А	218	330
Лінійне навантаження, А/см	435	360
Реактивна ЕРС, В	1,06	1,36
Ослаблення збудження, %	50	50
Струм збудження, А	109	165
Частота обертання якоря, об/хв	1360	1480
Потужність на валу, кВт	72	110
ККД, %	88	89
Тривалий режим		
Напруга на затисках, В	375	375
Струм обмотки якоря, А	185	280
Лінійне навантаження, А/см	370	305
Ослаблення збудження, %	65	65
Струм збудження, А	120	182
Частота обертання якоря, об/хв	1220	1340
Потужність на валу, кВт	62	95

## ДОДАТОК В

### Конструкція електричної машини постійного струму

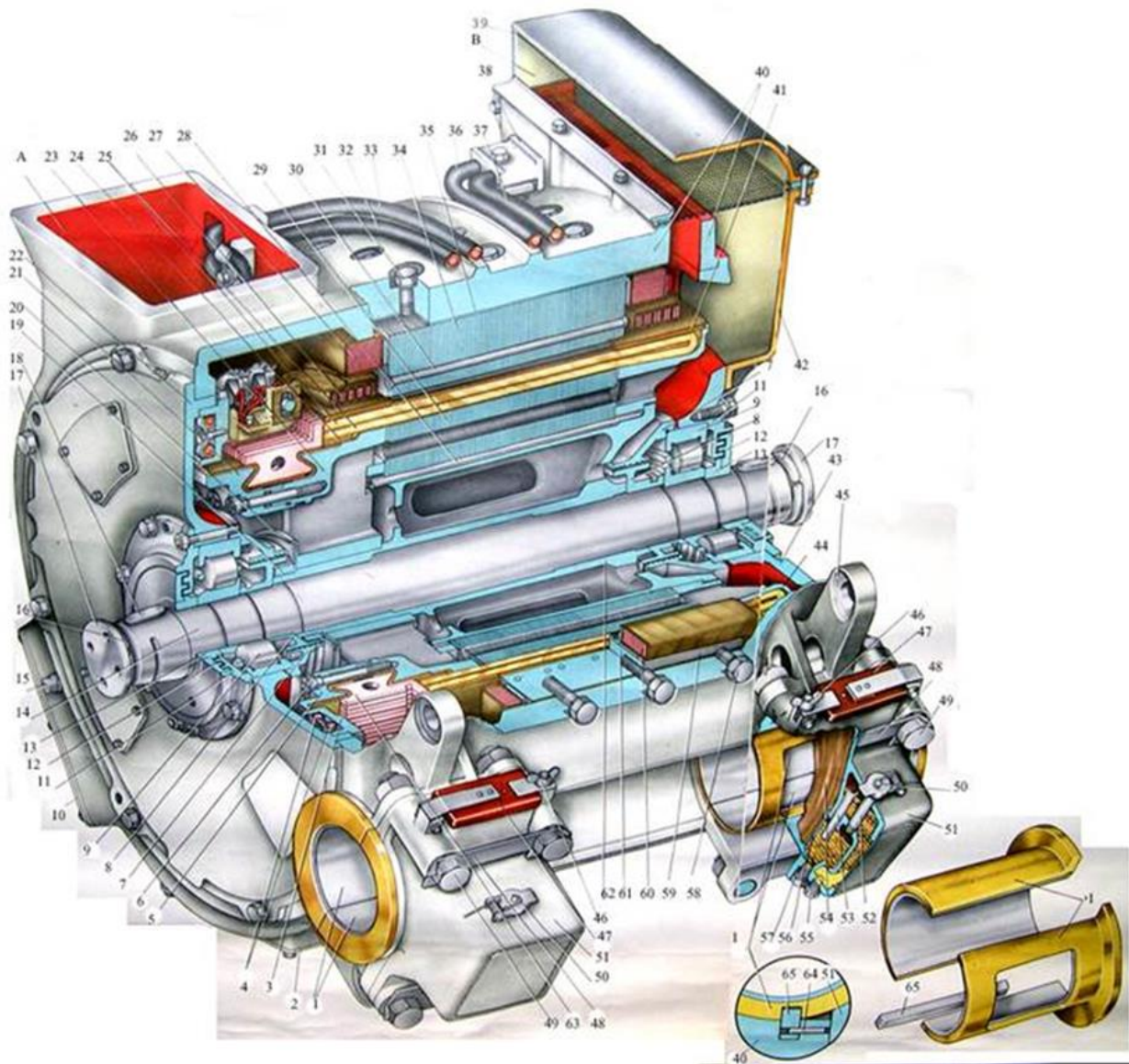


Рисунок В.1 – Конструкція електричної машини постійного струму (тяговий двигун постійного струму ТЛ-2К1)

На рисунку В.1 наведено такі позначення:

1 – вкладиш моторно-осьового підшипника; 2 – оглядовий люк; 3 – траверса; 4 – кабелі з'єднання кронштейнів траверси щіткотримача; 5 – передня натискна шайба (натискний конус); 6 – колекторний болт; 7 – задня кришка підшипника; 8 – кільце; 9 – підшипник якоря; 10 – передня кришка підшипника; 11 – кільце лабіринтне; 12 – ущільнювальне кільце; 13 – вал тягового



двигуна; 14 – валик шестерні проворота траверси; 15 – пружинна шайба; 16 – гайка спеціальна; 17 – шпонка шестерні; 18 – натискна гайка; 19 – масловідбійне кільце; 20 – натискний конус; 21 – підшипниковий щит з боку колектора; 22 – корпус (втулка) колектора; 23 – зрівняльне з'єднання; 24 – обмотка якоря; 25 – компенсаційна обмотка; 26 – котушка головного полюса; 27 – шпонка осердя якоря; 28 осердя якоря; 29 – заклепка осердя головного полюса; 30 – болт головного полюса; 31 – кабель (Я); 32 – кабель (ЯЯ); 33 – осердя головного полюса; 34 – сталева прокладка між головним полюсом і остовом; 35 – кабель (К); 36 – кабель (КК); 37 – клиця; 38 – вихлопний патрубок; 39 – остов; 40 – стеклобандаж; 41 – кожух; 42 – підшипниковий щит з боку протилежного колектору; 43 – натискна шайба; 44 – кронштейн; 45 – гайка-баранець; 46 – кришка моторно-осьового підшипника; 47 – стопорна планка; 48 – болт; 49 – кришка букси моторно-осьового підшипника; 50 – букса моторно-осьового підшипника; 51 – трубка для затоки мастила в моторно-осьові підшипники; 52 – перехідний канал; 53 – підбивна пряжа; 54 – пробка зливу мастила з робочої камери; 55 – перегородка; 56 – пробка зливу мастила з робочої камери; 57 – болт, що кріпить додатковий полюс до остова; 58 – прокладання додаткового полюса; 59 – котушка додаткового полюса; 60 – осердя додаткового полюса; 61 – втулка якоря; 62 – колектор; 63 – штифт; 64 – шпонка вкладишів моторно-осьового підшипника; 65 – шестерня проворота траверси; 66 – стрижень ізолятора; 67 – регулювальний гвинт; 68 – натискні пальці; 69 – циліндрична пружина; 70 – корпус щіткотримача; 71 – щітка з гнучким проводом (шунтом); 72 – верхня частина кронштейна; 73 – палець кронштейна щіткотримача; 74 – нижня частина кронштейна щіткотримача; 75 – болт кронштейна щіткотримача; 76 – болт фіксатора; 77 – фіксатор; 78 – стопорна планка; 79 – палець; 80 – регулювальний гвинт; 81 – трубка підведення мастила; 82 – гайка; 83 – ущільнення.

## ДОДАТОК Г

### Криві намагнічування феромагнітних матеріалів

Таблиця Г.1 – Крива намагнічування листової електротехнічної сталі марок 1211, 1212

B, Тл	H, А/см										
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
0,4	1,4	1,43	1,46	1,49	1,52	1,53	1,58	1,61	1,64	1,67	
0,5	1,71	1,75	1,79	1,83	1,87	1,91	1,95	1,99	2,03	2,07	
0,6	2,11	2,16	2,21	2,26	2,31	2,36	2,41	2,46	2,51	2,56	
0,7	2,61	2,66	2,71	2,76	2,81	2,87	2,93	2,99	3,06	3,12	
0,8	3,18	3,24	3,30	3,37	3,44	3,52	3,60	3,69	3,78	3,87	
0,9	3,97	4,07	4,17	4,27	4,37	4,47	4,58	4,69	4,80	4,91	
1,0	5,02	5,14	5,27	5,41	5,55	5,70	5,85	6,00	6,15	6,31	
1,1	6,47	6,64	6,82	7,01	7,20	7,39	7,59	7,79	8,00	8,21	
1,2	8,43	8,66	8,91	9,18	9,46	9,76	10,1	10,4	10,7	11,0	
1,3	11,4	11,8	12,2	12,6	13,0	13,4	13,8	14,3	14,8	15,3	
1,4	15,8	16,4	17,1	17,8	18,6	19,5	20,5	21,5	22,6	23,8	
1,5	25,0	26,4	27,9	29,5	31,1	32,8	34,6	36,6	38,8	44,12	
1,6	43,7	46,3	49,1	52,2	55,3	58,8	62,3	66,0	69,8	73,7	
1,7	77,8	82,0	86,3	90,7	96,3	101	106	111	116	122	
1,8	128	134	142	146	152	159	166	173	180	188	
1,9	197	206	216	226	236	246	256	268	282	296	

Продовження таблиці Г.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2,0	310	325	343	356	390	420	455	495	545	595
2,1	655	725	800	880	960	1040	1120	1200	1280	1360
2,2	1144	1520	1600	1680	1760	1840	1920	2000	2080	2160
2,3	2240	2320	2400	2480	2560	2640	2720	2800	2880	2960
2,4	3040	3120	3200	3280	3360	3440	3520	3600	3680	3760
2,5	3840	3920	4000	4080	4160	4240	4320	4400	4480	4560

Таблиця Г.2 – Крива намагнічування сталі марки 3411 (для полюсів)

B, Тл	H, А/см										
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	
1,0	1,70	1,70	1,80	1,85	1,90	1,90	2,0	2,0	2,10	2,10	2,10
1,1	2,20	2,20	2,30	2,35	2,40	2,40	2,50	2,60	2,60	2,60	2,70
1,2	2,80	2,90	3,0	3,10	3,20	3,20	3,30	3,40	3,50	3,50	3,60
1,3	3,70	3,80	4,0	4,10	4,20	4,30	4,50	4,60	4,70	4,70	4,80
1,4	5,0	5,20	5,40	5,60	5,80	6,0	6,20	6,40	6,60	6,60	6,80
1,5	7,0	7,30	7,60	7,90	8,20	8,50	8,80	9,10	9,40	9,40	9,70
1,6	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	18,0	19,0
1,7	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0	25,0	28,0	31,0	34,0	34,0	37,0
1,8	40,0	43,0	46,0	50,0	54,0	59,0	65,0	71,0	78,0	78,0	85,0
1,9	92,0	100	112	130	155	190	225	260	300	300	350
2,0	400	450	500	550	600	–	–	–	–	–	–

Таблиця Г.3 – Крива намагнічування литої сталі, товстих листів (Ст. 3), поковок

B, Тл	H, А/см										
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	
0	0	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48	0,56	0,64	0,72	
0,1	0,80	0,88	0,96	1,04	1,12	1,20	1,28	1,36	1,44	1,52	
0,2	1,6	1,68	1,76	1,84	1,92	2,0	2,08	2,16	2,24	2,32	
0,3	2,40	2,48	2,50	2,64	2,72	2,80	2,88	2,96	3,04	3,12	
0,4	3,20	3,28	3,36	3,44	3,52	3,60	3,68	3,76	3,84	3,92	
0,5	4,00	4,04	4,17	4,26	4,34	4,43	4,52	4,61	4,70	4,79	
0,6	4,88	4,97	5,06	5,16	5,25	5,35	5,44	5,54	5,64	5,74	
0,7	5,84	5,93	6,03	6,13	6,23	6,32	6,42	6,52	6,62	6,72	
0,8	6,82	6,93	7,03	7,24	7,34	7,45	7,55	7,66	7,76	7,87	
0,9	7,98	8,10	8,23	8,35	8,48	8,50	8,73	8,85	8,98	9,11	
1,0	9,24	9,38	9,53	9,69	9,86	10,4	10,22	10,39	10,56	10,76	
1,1	10,9	11,08	11,27	11,47	11,67	11,87	12,07	12,27	12,48	12,69	
1,2	12,9	13,15	13,4	13,7	14,0	14,3	14,6	14,9	15,2	15,55	
1,3	15,9	16,3	16,7	17,2	17,6	18,1	18,6	19,2	19,7	20,3	
1,4	20,9	21,6	22,3	23,0	23,7	24,4	25,3	26,2	27,1	28,0	
1,5	28,9	29,9	31,0	32,1	33,2	34,3	35,6	37,0	38,3	39,6	
1,6	41,0	42,5	44,0	45,5	47,0	48,7	50,0	51,5	53,0	55,0	

РОЗРАХУНОК ТЯГОВОГО ДВИГУНА  
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до виконання курсової роботи

з дисципліни  
*«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»*

Відповідальний за випуск Карпенко Н. П.

---

Підписано до друку 07.07.2020 р.

Умовн. друк. арк. 4,0. Тираж . Замовлення № .

Видавець та виготовлювач Український державний університет  
залізничного транспорту,

61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха,7.

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