

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ЕКОНОМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТУ

Кафедра «тяговий руханий склад залізниць»



## **ТЯГОВІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

«ПЕРЕВІРОЧНИЙ РОЗРАХУНОК ТЯГОВОГО ДВИГУНА»

Для студентів спеціальності 7.092202 «Електричний транспорт»

Спеціалізація «Електровози та електропоїзди»

усіх форм навчання

Київ 2012

УДК 621. 314. 2.

**Данилевський В. І.** Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Перевірочний розрахунок тягового двигуна».

Для студентів спеціальності 7.092202 «Електричний транспорт» Спеціалізація «Електровози та електропоїзди» усіх форм навчання і спеціальностей. – К.: ДЕТУТ, 2012. – 23 с.

У методичних вказівках до виконання курсового проекту перевірочний розрахунок тягових двигунів електрорухомого складу з метою придбання навиків студентами з проведення розрахунків і досліджень електричних машин, підтвердження теорії роботи і їх конструювання. Навчитися будувати експлуатаційні характеристики і проведення розрахунків основних параметрів.

У роботі використані основні властивості електромагнітних і електроізоляційних матеріалів, які застосовуються в електромашинобудуванні, розглянуті теоретичні засади втрат і коефіцієнти корисної дії, а також практичне застосування їх на практиці. Метою проведення перевірочного розрахунку є закріплення теоретичного матеріалу, викладеного на лекційних заняттях, а також шляхом проведення дослідження електричних машин в електротехнічній лабораторії кафедри тягового рухомого складу.

Призначені для студентів університету усіх форм навчання по спеціальності 7.092202 «Електричний транспорт», спеціалізація «Електровози та електропоїзди».

Розглянуті і затверджені на засіданні кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць» (протокол № 5 від 26.01.2011 р.) та на засіданні методичної комісії факультету ІРСЗТ (протокол № 7 від 23 лютого 2011р.).

Укладач: В. І. Данилевський, к.т.н., доц. кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць»

Рецензенти: Ю. В. Черняк к.т.н, доц. кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць»;

В. Г. Чистяк, к.т.н., заступник головного інженера Головного управління локомотивного господарства Укрзалізниці

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
Склад проекту.....	5
Проектування ТЕД.....	5
1. Електромагнітний розрахунок.....	6
1.1 Колекторне ділення.....	7
1.2. Лінійна швидкість на поверхні колектора	7
1.3. Максимальна напруга між сусідніми пластинами колектора для некомпенсованих ТЕД.....	7
1.4. Середня напруга між сусідніми платівками колектора.....	7
1.5. Максимальне значення реактивної ЕРС при комутації і максимальній робочій швидкості обертання якоря.....	8
1.6. Максимальне значення не балансної ЕРС в комутуючих секціях обмотки якоря при пульсуючому живленні.....	8
1.7. Об'єм струму в пазу якоря або компенсаційної обмотки .....	8
1.8 Розрахунок активного шару якоря.....	8
1.9. Розрахунок магнітного кола ТЕД.....	9
1.10. Розрахунок комутації та допоміжних полюсів.....	12
1.11. Оцінка потенціальних умов на колекторі ТЕД.....	14
1.12. Визначення характеристик ТЕД .....	16
1.12.1 Визначення навантажувальних характеристик ТЕД.....	16
1.12.2 Визначення швидкісних характеристик.....	17
1.12.3. Розрахунок характеристик ККД.....	18
Список літератури.....	19
Додатки.....	21

## ВСТУП

Методика розрахунку тягових електричних двигунів призначена для студентів, які навчаються за спеціальністю 07.092.202 «Електричний транспорт» Вона має на меті закріпити теоретичні знання, набуті студентом на лекціях практичними розрахунками складових, а також провести розрахунки електромеханічних характеристик тягового двигуна та пересвідчитися у відповідності теоретичних висновків практичному застосуванню.

Відмінність тягових електричних машин від загальнопромислових полягає у використанні електротехнічних матеріалів на граничній межі. Ці вимоги викликані роботою двигунів в обмежених габаритах, при низьких вагових показниках та високому змінному механічному й електричному навантаженню на конструкції, в умовах підвищеного попадання всередину пилу й вологи (у тому числі з утворенням пару при високих температурах та інею при низьких температурах), а також тривалим терміном служби. Тягові електричні машини повинні відповідати вимогам ГОСТ 2582-81 і ГОСТ 15150-69, за якими допускаються одиночні удари із прискоренням до  $280 \text{ м/с}^2$  при моторно-осьовому підвішуванні двигуна, робота при температурі навколишнього повітря від мінус  $50^\circ \text{C}$  (іноді від мінус  $60^\circ \text{C}$ ) до плюс  $40^\circ \text{C}$ . При роботі в зоні помірною або помірно-холодного клімату регламентована відносна вологість повітря – 80 %, середньорічна абсолютна вологість – 11 г.м кв; припустима експлуатація на висоті 1200 м – іноді до 1400 м від рівня моря; термін експлуатації 25 – 30 років. Різка зміна механічного навантаження, температури й вологості провокує утворення тріщин у конструкціях, ізоляційних матеріалах і антикорозійному покритті. Виконуючи розрахунки складових частин тягових двигунів студент повинен враховувати приведені застереження, а також використовувати сучасні матеріали та методику розрахунку окремих складових тягового двигуна. Особливу увагу необхідно приділити застосуванню електричним обмотувальним проводам які уже мають виткові ізоляції та системам електроізоляційних матеріалів, які застосовуються при ремонті, а також просочувальним матеріалам, які за своєю хімічною природою мають бути одного хімічного складу.

## Склад проекту

В курсовому проекті слід провести перевірочний розрахунок одного із серійних тягових електродвигунів (ТЕД).

Виконуються такі розрахунки:

1. Електромагнітний розрахунок, що містить такі етапи:

- вибір габариту тягового двигуна;
- вибір і розрахунок обмотки і розмірів якоря і його електричних навантажень;
- вибір і розрахунок інших обмоток машин: компенсаційної і додаткових полюсів;
- вибір геометрії магнітного кола двигуна;
- вибір і обґрунтування обмоток збудження;
- розрахунок параметрів колектора, потенціальних умов на ньому, комутації двигуна;
- розрахунок характеристик машини, її втрат і коефіцієнта корисної дії(ККД)

2. Вентиляційні і теплові розрахунки.

3. Механічні розрахунки вибіркові за вказівкою викладача; що включають в себе: розрахунки вала, кріплення колектора, кріплення обмотки якоря, розрахунок і вибір підшипників, розрахунок кріплення головного і додаткового полюсів та розрахунок міцності остова.

4. Графічна частина проекту, що складається з двох аркушів формату А1, які представляють складальне креслення двигуна( поздовжній і поперечний розрізи) та третій аркуш формату А3 на вибір викладача креслення окремого вузла або деталі.

Крім графічної частини, на аркушах ватману в розрахунковій записці вміщують обов'язкові ескізи:

- масштабний ескіз конструкції паза якоря із специфікацією заповнення паза;
- схема обмотки якоря( може бути на міліметрівці);
- масштабний ескіз між полюсного вікна двигуна з позначенням геометричних параметрів магнітного кола і розміщення обмоток у вікні;
- характеристики намагнічування і робочі характеристики на міліметрівці.

## Проектування ТЕД

При проектуванні керуються загальними положеннями теорії електричних машин. Головним в проектуванні є правильний вибір основних розмірів якоря – зовнішнього діаметра та осьової довжини осердя. Важливим фактором є також вибір кількості полюсів.

## 1. Електромагнітний розрахунок

Залежність між розрахунковою потужністю та основними розмірами встановлюється через електромагнітну постійну Арнольда:

$$P_i = \frac{D_a^2 l_a n_c}{\tilde{N}_A},$$

$$\text{де } C_a = \frac{6,1 \times 10^7}{a_i A \times \hat{A}_\delta};$$

$$D_\delta = D_t \frac{1 + \eta}{2\eta};$$

$D_t$  – номінальна потужність ТЕД (в тривалому режимі), кВт;

$\eta$  – ККД, в. о.;

$n_c$  – номінальна частота обертання (в тривалому режимі), об./хв.;

$a_i$  – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття;

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

$\hat{A}_\delta$  – магнітна індукція у повітряному зазорі між полюсом та якорем в номінальному (тривалому) режимі.

Значення  $\eta$  для ТЕД електровозів приблизно можна прийняти рівним 0,94, а для ТЕД електропоїздів – 0,92.

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

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{D_t}{n_n}}.$$

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

Для електровозів серій ВЛ-10, ВЛ-11, Д-1 та ін., які мають діаметр ведучого колеса 1250 мм,  $D_a = 74$  см. Для електровозів змінного струму серії ВЛ-80 з таким же діаметром колеса з причин забезпечення надійності ТЕД при пульсуючому струмі  $D_a = 66$  см.

При  $D_\delta = 1200$  мм –  $D_a = 66$  см ( ВЛ-8 ).

При  $D_\delta = 1050$  мм –  $D_a = 52$  см/ 49,3 см/ (ТЕД електровозів та 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 СНД,  $l_a \leq 42\tilde{n}i$  для ТЕД вантажних електровозів. Активний об'єм якоря вимагає прийняти максимально можливий діаметр якоря, від якого потужність залежить в квадраті; тоді осьова довжина осердя, см, визначається за формулою

$$l_a = \frac{6,1 \cdot 10^7 D_s}{a_i A \cdot B_\delta \cdot n_n D_a^2}.$$

Значення лінійного навантаження якоря сучасних ТЕД електровозів сягає значень 400 – 500 А/см,  $\hat{A}_\delta \leq 1,0$  Тл. Для ТЕД електропоїздів –  $\hat{A}_\delta \approx 0,7-0,8$  Тл.

Важливим параметром є  $a_i \approx \frac{b_\delta}{\tau}$  – відношення полюсної дуги до полюсного ділення  $\tau = \frac{\pi D_a}{2 \delta}$ .

Величину  $a_i$  вибирають максимально можливою. Її називають коефіцієнтом використання машини. Величина  $a_i$  обмежується умовами забезпечення надійної комутації, про що вказано у розділі 3. Орієнтовно можна задати  $a_i \approx 0,62 - 0,67$  для некомпенсованих ТЕД. При проектуванні краще додержуватись даних побудованих ТЕД.

Кількість головних полюсів  $2p$  при  $D_a$  45 – 52 см дорівнює 4, при  $D_a=74$  см –  $2p = 6$ . При  $D_a$  66 см сучасні ТЕД також мають  $2p = 6$ , в старих ТЕД було  $2p = 4$  (НБ406Б).

### 1.1. Колекторне ділення

$$t_k = \frac{\pi D_K}{K} \geq 4 \dot{i} \dot{i} ,$$

де  $D_k$  – діаметр колектора;

$K$  – кількість колекторних платівок.

Звичайно,  $D_k \approx (0,75-0,9) D_a$ . Більші значення  $D_k$  обмежуються можливістю приєднання провідників обмотки якоря до прапорців колектора.

### 1.2. Лінійна швидкість на поверхні колектора

$$v_{k\lambda\delta} = \frac{\pi D_K \cdot n_{\text{max}}}{60} \leq 52 - 55 \text{ м/с},$$

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

$D_k$  – діаметр колектора, м.

### 1.3. Максимальна напруга між сусідніми пластинами колектора для некомпенсованих ТЕД

$$U_{k\lambda\delta} \leq 35-37(40) \text{ В}.$$

#### 1.4. Середня напруга між сусідніми платівками колектора

$$U_k = \frac{2 \delta U}{K} \leq 16-18 \hat{A}.$$

1.5. Максимальне значення реактивної ЕРС при комутації і максимальній робочій швидкості обертання якоря

$$l_{\delta i \hat{\alpha} \hat{\sigma}} \leq 8-9 \hat{A}.$$

1.6. Максимальне значення не балансної ЕРС в комутуючих секціях обмотки якоря при пульсуючому живленні

$$\Delta_{\hat{a}} \leq 0,7-1,0 \text{ (В)}.$$

1.7. Об'єм струму в пазу якоря або компенсаційної обмотки не повинен перевищувати 1200А.

#### 1.8. Розрахунок активного шару якоря

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

Для ТЕД електровозів застосовується петльова обмотка якоря, яка має кількість паралельних віток, рівну кількості полюсів:

$$2a = 2p.$$

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

$$2a = 2;$$

хоча при збільшенні потужності понад 200 кВт не виключено застосування петльової обмотки.

Важливим етапом проектування є вибір кількості та розмірів пазів якоря. При цьому слід дотримуватись прикладів побудованих машин, користуватись такими рекомендаціями:

- ширина зубцевого ділення на поверхні якоря повинна бути, як правило, в межах

$$t_i = \frac{\pi D_a}{Z} = 1,8-3,5 \hat{n} \hat{i},$$

де  $Z$  – кількість пазів;

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

- ширина паза, звичайно, рівна



$$b_i \approx (0,4 - 0,45)t_i;$$

• відношення глибини паза до його ширина за умови оптимального проектування та комутації повинно бути в межах:

$$\frac{h_i}{b_i} = 3,2 - 4,5.$$

Менші значення належать до ТЕД електропоїздів.

Дуже важливим є правильний вибір конструкції ізоляції. Слід ознайомитись з літературою [4], де наводяться рекомендації до вибору ізоляції, а також скористатись прикладами [1, с. 79.]

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

$$A = \frac{NI}{2a\pi D_a}.$$

При виборі  $N = 2K$  треба слідкувати за обмеженнями розд. 2, щоб  $t_k \geq 4\dot{i}$ .

Площа поперечного перетину активного провідника обмотки  $g_a$  знаходиться з заданої величини теплового фактора –  $A \cdot j_a$ , в якому  $j_a$  – щільність струму,  $A / \dot{i}^2$ . Тоді

$$g_a = \frac{I}{2aj_a} = \frac{i_a}{j_a},$$

$i_a$  – струм в паралельній вітці обмотки.

Тепловий фактор визначає обмотки якоря, який нормується [6] залежно від класу нагрівостійкості ізоляції обмотки. Для вибору  $Aj_a$  слід керуватись рекомендаціями [1, с. 14]. Однак слід також мати на увазі, що  $j_a$  не повинна перевищувати  $7A / \dot{i}^2$ .

## 1.9. Розрахунок магнітного кола ТЕД

Мета розрахунку – визначення основних розмірів магнітопроводу та кількості витків обмотки збудження. Магнітне коло складається з окремих ланок:

- повітряного зазора;
- зубців якоря;
- спинки (ярма) осердя якоря;
- осердя полюса (для некомпенсованих машин з наконечником);
- зубців компенсаційної обмотки ( для компенсованих ТЕД );

- станини (ярма) у вигляді двох складових: основної і місця переходу (виходу) із полюса в станину;
- стикування полюса зі станиною.

Таким чином, загальна МРС, яка необхідна для проведення магнітного потоку, знаходиться у вигляді суми складових:

$$F_0 = F_\delta + H_z L_z + H_a L_a + H_m L_m + H_{zk} L_{zk} + (H_j L_j + H_j' L_j') + F_\delta,$$

де  $H$  напруженості магнітного поля в перелічених ланках магнітного кола;  
 $L$  – довжина ланок кола в напрямі ліній магнітного поля.

Для визначення геометричних розмірів ланок магнітного кола слід пам'ятати, що великі значення індукцій магнітного поля у феромагнітних ланках призводить до магнітного насичення ланок і непропорційного різкого зростання МРС обмотки збудження. Занижені значення індукцій збільшують масу та габарити ТЕД. Практикою електромашинобудування відпрацьовані оптимальні значення магнітних індукцій в ланках магнітного кола ТЕД Орієнтовно в номінальному режимі вони такі:

$B_\delta = 0,8 - 1,0 \text{ Тл}$  (менші значення для ТЕД електропоїздів);  $\hat{A}_{y1/3} = 2,1 - 2,2 \text{ Тл}$  (на 1/3 висоти зубця від дна паза)  $\hat{A}_a = 1,4 - 1,6 \text{ Тл}$ ;  $\hat{A}_m = 1,5 - 1,7 \text{ Тл}$ ;  $\hat{A}_{zk} = 1,7 - 1,8 \text{ Тл}$ ;  $\hat{A}_j = 1,45 \text{ Тл}$ ;  $\hat{A}_j' \leq \hat{A}_j$  (із розрахунку);  $\hat{A}_\delta = \hat{A}_m = 1,5 - 1,7 \text{ Тл}$ .

Значення вказаних магнітних навантажень можуть коливатись поблизу наведених даних.

З урахуванням значень магнітних індукцій, довжини осердя якоря, полюсів та спинки визначаються поперечні розміри перерахованих ланок за значенням магнітного потоку в номінальному режимі ТЕД. Номінальне значення магнітного потоку в повітряному зазорі ТЕД визначається номінальним значенням ЕРС обмотки якоря:

$$\hat{A} = \tilde{N}_A \hat{O}i,$$

$$E = U - I_\Sigma r,$$

де  $U$  – напруга на якорі ТЕД в номінальному режимі;  
 $I_\Sigma r$  – сума активних опорів обмоток в полі якоря.

Звичайно,  $I_\Sigma r \approx 0,054$ , тоді  $E \approx 0,95U$ .

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

$C_E = \frac{\partial N}{60_a}$  визначається за обмотувальними даними конкретного ТЕД з урахуванням, що  $N = 2K$ .

$$\hat{O} = \frac{\dot{A}}{\tilde{N}_A n}$$

За значенням магнітного потоку в номінальному режимі знаходяться індукції:

$$\hat{A}_\delta = \frac{\hat{O}}{S_\delta}; \quad \hat{A}_{z1\backslash3} = \frac{\hat{O}}{S_{z1\backslash3}}; \quad \hat{A}_a = \frac{\hat{O}}{2S_a}; \quad \hat{A}_m = \frac{o\hat{O}}{S_m}; \quad \hat{A}_{zk} = \frac{o_k\hat{O}}{S_{zk}}; \quad \hat{A}_j = \frac{o\hat{O}}{2S_j},$$

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

де  $S$  – площі поперечного перетину ланок магнітного кола.

Розрахунок МРС  $F_0$  – Виконується, як правило, для одного полюса. МРС повітряного зазора знаходять для його розрахункового значення

$$F_\delta = 0,8\hat{A}_\delta\delta_\delta 10^4,$$

де  $\delta_\delta = \delta' K_\delta, \tilde{n}i$ ;

$\delta' = \delta$  – компенсованих ТЕД. Для некомпенсованих ТЕД  $\delta'$  визначається залежно від відношення повітряних проміжків під краєм та центром полюса, яке може бути  $\frac{\delta_{k\delta}}{\delta_\delta} = 2 - 4$  [1, с.39];

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

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

де  $t_1$  – зубцеве ділення якоря;

$b_{z1} = t_1 - b_i$  – ширина зубця на поверхні якоря;

$t_k$  – зубцеве ділення компенсаційної обмотки на поверхні полюса;

$b_{zk}$  – ширина зубця компенсаційної обмотки.

Останні ланки магнітного кола розраховуються з використанням кривих намагнічування сталей, з яких складається осердя ланки. В місці стику полюса зі станиною вважають наявність щілини товщиною 0,01 см, тоді  $F_\delta \approx 80\hat{A}_m$ .

Розрахунок магнітного кола після вибору геометричних розмірів його ланок виконують на базі прикладів [1] для різних значень магнітного потоку:

$$\frac{\hat{O}}{\hat{O}_i} = 0,5 \cdot 0,8, 1,0, 1,15, (1,25).$$

Дані розрахунків  $\hat{O} = f(F_0)$  бажано занести до таблиці [1, с. 142] і побудувати у вигляді графічної залежності, яка має назву магнітної характеристики ТЕД

$$\hat{O} = f(F_0).$$

Далі знаходиться повна МРС обмотки збудження:

$$F_{3A} = F_0 + F_p,$$

де  $F_p$  – розмагнічуючи МРС поперечної реакції якоря. Для некомпенсованих ТЕД  $F_p$  знаходиться у вигляді

$$F_p = K_p F_a.$$

$$F_a = \frac{A\tau}{2} - \text{МРС поперечної реакції якоря.}$$

$K_p$  знаходиться залежно від  $B_{213}$  і значення еквівалентного повітряного проміжку по кривих [1, с. 148, рис. 255].

В компенсованих ТЕД впливом МРС реакцій якоря на МРС збудження можна знехтувати, тоді

$$F_{3A} \approx F_0.$$

Кількість витків обмотки збудження знаходиться за формулою

$$\omega_{3A} = \frac{F_{3A}}{I \cdot \beta_i},$$

де  $\beta_i$  – коефіцієнт постійного шунтування обмотки збудження для ТЕД пульсуючого струму. Значення  $\beta_i$  дається у вихідних даних до проектування ( $\beta_i \approx 0,92 - 0,92$ ). Для двигунів постійного струму  $\beta_i = 1$ . Якщо обмотка збудження з'єднується у дві паралельні вітки (ТЕД електропоїздів), то кількість витків обмотки слід подвоїти.

#### 1.10. Розрахунок комутації та допоміжних полюсів

Комутація є «ахілесовою п'ятою» машини постійного струму. Тому забезпечення її надійності вважають найбільш важливою проблемою. Оптимальна комутація вимагає ретельного вибору обмотки якоря, величини

полюсного перекриття, ширини електрощіток, обмежує значення перевантажень, швидкості обертання та ін.

При розрахунках комутації визначається ширина зони комутації – величини дуги на поверхні якоря, яку описує провідник обмотки в стані комутації, см

$$b_k = b_u \frac{D_a}{D_k} + t_1 \left( 1 + \varepsilon_f - \frac{aZ}{pK} \right),$$

де  $\varepsilon_f = \left| \frac{Z}{2\delta - y_z} \right|$  – вкорочення кроку обмотки якоря;

$\delta_z$  – крок обмотки по пазах (вихідні дані). Для петльових обмоток  $\varepsilon_f$  дорівнює, як правило, половині паза, або  $\varepsilon_f = 0,5$ .

Величина  $b_k$  повинна бути в межах:

- $b_k \leq 0,7(\tau - b_p)$  – для некомпенсованих ТЕД;
- $b_k \leq 0,55(\tau - b_f)$  – для компенсованих ТЕД.

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

Другим і головним параметром комутації є середня величина реактивної ЕРС, В

$$l_p \approx 2Al_a \sigma_a \lambda \cdot 10^{-6},$$

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

$l_a$  – довжина осердя ( розрахункова довжина якоря ), см;

$\sigma_a$  – лінійна швидкість на поверхні якоря, м/с;

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

$$\lambda = \frac{h}{b} + \frac{l}{l} + \frac{2,5 \cdot 10^5}{l_a A \sigma_a p | a},$$

де  $l_s$  – довжина будь-якої частини секції обмотки якоря  $l_s \approx 1,4\tau$ , см,  $\tau$  – полюсне ділення, звичайно  $\lambda \approx 3,5 - 6$ .

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

Розрахунок допоміжних полюсів об'єднує вибір повітряного зазора, розмірів осердя та кількості витків обмотки.

Кількість витків змінюється дискретно, тому його приймають з урахуванням коефіцієнта

$$\sigma = \frac{F_0 + F_k}{F_0} \approx 1,15 - 1,3,$$

в якому  $F_0 = \varpi_0 I$ ,  $F_k = \varpi_k I$ ,  $F_a = \frac{A\tau}{2}$  – МРС обмоток допоміжних полюсів, компенсаційної та якоря.

Величина повітряного зазора під допоміжними полюсами визначається за формулою, см

$$\delta \cong \frac{(u-1)\tau}{1,6K_{\delta}\lambda},$$

де  $K_{\delta}$  – коефіцієнт повітряного зазора:  $K_{\delta} \cong \frac{t_1 + 10\delta_{\delta}}{b_{\delta} + 10\delta_{\delta}}$ .

Значення  $\delta_{\delta}$  береться із вихідних даних або приймається приблизно 1 – 1,5 см. Далі розрахунок корегується залежно від одержаних результатів.

Ширина осердя допоміжних полюсів та ширина наконечника полюса повинні бути мінімальними з урахуванням недостачі місця для розташування полюсів в ТЕД. При перевантаженні в  $2I_f$  [6] не повинно бути магнітного насичення осердя полюсів:  $\hat{A}_{m\delta} \leq 1,5$  Тл, а при номінальному струмі  $\hat{A}_{m\delta} \leq 0,75$  Тл.

$$\hat{A}_{m\delta} \cong \frac{\hat{O}_{m\delta}}{l_{m\delta} b_{m\delta}}; l_{m\delta} \approx l_a; \hat{O}_{m\delta} = \sigma_{\delta} \hat{O}_k,$$

де  $\sigma_{\delta}$  – коефіцієнт магнітного розсіювання. Для некомпенсованих ТЕД  $\sigma_{\delta} \approx 3$ , а для компенсованих –  $\sigma_{\delta} = 2$ .

Уточнення цих значень вимагає рішення польових задач. Неточність вибору  $\sigma_{\delta}$  корегується дослідною накладкою комутації методом області без іскрової роботи.

$$\hat{O}_k \cong \hat{A}_k b_k L_{m\delta} 10^{-4}, \hat{A}_k \cong \lambda A 10^{-4}.$$

Значення  $b_k, l_{m\delta}$ , см, а значення  $A$ , А/см.

Ширина наконечника полюса вибирається залежно від ширини зони комутації:

$$b_{\delta} \approx (b_k - 3\delta_{\delta})$$

або приймається рівною ширині осердя полюса, якщо значення  $b_{\delta}$  близькі до неї.

### 1.11. Оцінка потенціальних умов на колекторі ТЕД

Підвищення напруги між сусідніми колекторними пластинами вище допустимого рівня може призвести до явищ кругового вогню по колектору.

Максимальне значення напруги, як встановлено практичним досвідом, не повинно перевищувати

$$U_{kna\delta} \leq 35 - 37 \hat{A}.$$

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

В компенсованих ТЕД, в яких середнє значення напруги між колекторними пластинами не перевищує 16 – 18В, дія реакції якоря не призводить до критичного стану потенціальні умови на колекторі. Вони залишаються на рівні тих, які теоретично існують в режимах без навантаження. Тому оцінку потенціальних умов слід проводити для некомпенсованих ТЕД. Напруга між сусідніми колекторними пластинами визначається за формулою

$$I_{\delta} = 2 \frac{P}{a} \hat{A}_{s\delta} l_a \sigma_a,$$

де  $\hat{A}_{s\delta}$  – Тл;  $l_a - l$ ;  $\sigma_a - i / \tilde{n}$ ;

$P/a$  – кількість пар полюсів та паралельних віток обмотки якоря.

Початок координати  $X$  приймається на осі головного полюса.

При строгій постановці задачі треба зараховувати нелінійність феромагнітних ділянок магнітного кола, де проходить потік поперечної реакції якоря. В ТЕД рішення цієї задачі полегшується тим, що найбільш небезпечні режими за потенціальними умовами існують при ослабленому полі, коли вплив насичення феромагнітних ділянок на кінцевий результат розрахунку незначний. Таким чином, залежність між магнітною індукцією в повітряному проміжку та МРС визначається в лінійному вигляді:

$$\hat{A}_{\delta} \approx \mu_0 \frac{F_{\delta} \pm A \tilde{O}}{\delta_{\delta} K_{g\delta}},$$

звичайно, значення повітряного проміжку під полюсом зростає до краю полюса. Зазор роблять ексцентричним [1, с. 37] з відношенням проміжку під краєм полюса до проміжку під центром полюса:  $\frac{\delta_{kp}}{\delta_0} = 2 - 4$ . При ексцентричному

його з проміжку значення на відстані  $X$  від осі полюса

$$\delta_{\delta} = \delta_0 \left[ 1 + (\delta_{kp} / \delta_0 - 1) \cdot (2\delta / b_p)^z \right],$$

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

Тоді

$$\hat{A}_{\delta} \cong \mu_0 \frac{F_{\delta} + A \cdot \tilde{O}}{D},$$

$$\text{де } D \cong \frac{t_1 + 10\delta_0 [1 + (\delta_{kp} / \delta_0 - 1) \cdot (2\tilde{\sigma} / b_p)^2]}{b_{z1} + 10\delta_0 [1 + (\delta_{kp} / \delta_0 - 1) \cdot (2\tilde{\sigma} / b_p)^2]} \cdot \delta_0 [1 + (\delta_{kp} / \delta_0 - 1) \cdot (2\tilde{\sigma} / b_p)^2]$$

$$\frac{b_p}{2} \leq \tilde{O} \leq +\frac{b_p}{2}, \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \tilde{A} / i .$$

Звичайно,  $F_\delta \geq Ab_p / 2$  або  $\hat{A}_\delta \geq 0$ .

Для визначення  $\hat{A}_{\text{маб}}$  найбільш раціонально побудувати залежність  $\hat{A}_\delta(\tilde{O})$  за правилами математики.

Значення  $F_\delta$  у формулі для  $\hat{A}_\delta$  можна приблизно прирівняти до значення МРС обмотки збудження:

$$F_\delta \approx F_{3A} I \beta,$$

де  $I$  – максимально допустиме (з умов комутації) значення струму при ослабленому полі;

$\beta$  – коефіцієнт ослаблення поля.

## 1.12. Визначення характеристик ТЕД

### 1.12.1 Визначення навантажувальних характеристик ТЕД

Перш за все слід розрахувати та побудувати навантажувальні характеристики:

$$\frac{E}{n} = f(I_{3A}) \text{ при } I = I_a = \text{const.}$$

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

Магнітна характеристика – це залежність  $\hat{O} = f(F_0)$ . Враховуючи, що  $E = C_E \hat{O} n$ , а  $F_0 = I_{3A} \omega_{3A}$ , знаходимо складові характеристики холостого ходу:

$$\frac{\hat{A}}{n} = C_k \hat{O}, \tilde{N}_{\hat{A}} = \frac{pN}{60_a}, I_{3A} = \frac{F_0}{\omega_{3A}}.$$

Далі визначаються навантажувальні характеристики для струмів якоря: 0,25; 0,5; 1,0; 1,5;  $2I_{\text{м}}$ .

Для її побудови знаходиться значення дії поперечної рекомендації якоря, яка розмагнічує магнітну систему в некомпенсованих ТЕД. Значення  $F_0 = K_0 A \tau / 2$ , де  $F_p$  знаходиться по кривих [1, с.148, рис.255]. Значення  $\hat{A}_{z1/3}$  береться за даними розрахунку магнітного кола пропорційно значенням  $E/n$  по характеристиці холостого ходу. Дані розрахунків зносять до таблиці та будуються у вигляді графіків.



$E/i$	0	0,5	0,8	1,0	1,15	(1,25)
$\dot{I}\partial\partial I = 0$						
$\dot{I}\partial\partial I = 0,25I_i$						
$\dot{I}\partial\partial I = 0,5I_i$						
$\dot{I}\partial\partial I = I_i$						
$\dot{I}\partial\partial I = 1,5I_i$						
$\dot{I}\partial\partial I = 2I_i$						

### Навантажувальні характеристики

Для компенсованих ТЕД нехтують дією реакції якоря, тоді всі навантажувальні характеристики подібні до характеристики холостого ходу:  $\dot{A}/n = f(I_{3\dot{A}})$  при  $I=0$ .

#### 1.12.2. Визначення швидкісних характеристик

Швидкісні характеристики  $n = f(I)$ , або  $\varrho = f(I)$  знаходяться при незмінній напрузі на якорі ТЕД за формулою:

$$n = \frac{U - (I\Sigma r + 2)}{E/n}, \sigma = 0,188 \frac{\dot{A}_A n}{\mu}$$

де  $\Sigma r = r_0 + r_{3\dot{a}} + r_0 + r_k$ ;

Цифра 2 – це 2В на падіння напруги в щітковому контакті;

$\dot{A}_A$  – діаметр бандажа колісної пари;

$\mu$  – передаточне відношення зубчатої передачі.

При ослабленому полі  $\dot{\omega}'_{\dot{c}\dot{a}} = \dot{\omega}_{\dot{c}\dot{a}} \cdot \beta$ .

При повному полі або при постійному шунтуванні обмотки збудження для двигунів пульсуючого струму значення  $n$  визначається за допомогою навантажувальних характеристик ТЕД. По осі абсцис відкладається значення струму збудження  $I_{\dot{c}\dot{a}} = \beta^2$ , або  $I_{\dot{c}\dot{a}} = \beta^2$  для двигунів пульсуючого струму, а по осі ординат знаходиться значення  $E/n$  по навантажувальній характеристиці, яка відповідає значенню заданого струму навантаження  $I$ . За значенням  $E/n$  визначається швидкість обертання або руху ЕРС за наведеними формулами.

При абсолютному полі розрахунок характеристик подібний. По осі абсцис відкладається значення струму збудження  $I_{\dot{c}\dot{a}} = \beta^2$ , а по осі ординат знаходяться значення  $E/n$  для заданого струму навантаження  $I$ . Дані розрахунку слід зобразити у вигляді графіків для вибраних значень  $\beta \cdot \beta_{mm}$ , не слід брати меншим 0,3 за умови потенціальної стійкості.

### 1.12.3. Розрахунок характеристик ККД

Значення ККД ТЕД визначається за формулою

$$\eta = \frac{UI - \Sigma \Delta P}{UI} = P_1 \left(1 - \frac{\Sigma \Delta P}{P_1}\right),$$

де  $P_1 = UI$  – підведена потужність до ТЕД.

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

$$\Sigma \Delta P = I^2 \Sigma r + 2I + P_{\delta 0 \delta} P_0.$$

Перше складове – джоулеві втрати потужності на опорах обмоток електричного кола якоря;

друге – втрати потужності в перехідному колі щіток;

$P_{\delta 0 \delta}$  – додаткові втрати потужності рівні  $0,05P_1$  для компенсованих ТЕД і  $0,05P_1$  – для некомпенсованих машин;

$P_0 = P_{N\delta} + P_u + D_A + D_{n\delta}$  – втрати потужності без навантаження.

При визначенні характеристик при ослабленні поля враховуються зміни значення  $\dot{\alpha}$  на  $\dot{\alpha}'$ , а також вплив значення  $n$  на  $P_0$ .

### 1.12.4. Визначення характеристик рухомого моменту на валу ТЕД

Електромагнітний момент ТЕД згідно з теорією визначається за формулою

$$M = C_M \hat{O}^2,$$

де  $\tilde{N}_M = \frac{pN}{2\pi a}$ ;

$\Phi$  – магнітний потік;

$I$  – струм якоря.

Момент на валу визначається за формулою

$$M_2 = M - \Delta M,$$

в якій  $\Delta M$  – момент обертання ТЕД без навантаження.

Звичайно йдуть іншим шляхом. При визначеній характеристиці ККД

$$M = 9,55 \frac{P_1}{n} \eta \cdot 10^{-3},$$

де  $P_1 = UI$ , кВт;  $n$ , об/хв. (із швидкісних характеристик для відповідного послаблення поля –  $\beta$ );  $\eta$  – ККД ТЕД (із характеристик ТЕД для відповідного  $\beta I_{MAO} = 2^2_i$ ).

## Список літератури

1. *Находкин М. Д., Василенко Г. А., Бочаров В. И. и др.* Проектирование тяговых электрических машин – М.: Транспорт, 1976.
2. *Гольдберг О. Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С.* Проектирование электрических машин – М.: Высшая школа, 1984.
3. *Николаев И. И.* Электрооборудование ЭРС: Задания и методические указания для выполнения курсового проекта – М.: ВЗИИТ, 1991.
4. Магистральные электровозы: технологические основы производства / В. И. Бочаров, А. И. Каргин, К. В. Колосков и др. – М.: Машиностроение, 1992.
5. *Справочник* / В. В. Березин, Н. С. Прохоров, Г. А. Горчаков и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
6. *ГОСТ 2582 – 81* Машини електричні обертові тягові. Загальні технічні вимоги.
7. *Безрученко В. М., Марченко В. К., Чумак В. В.* Тягові електричні машини електрорухомого складу. – Видавництво Дніпропетровськ, 2003. – 252 с.
8. Проектирование тяговых электрических машин (Под ред. М. Д. Находкина) – М.: Транспорт, 1976. 326с.
9. *Сергеев П. С. и др.* Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1969. – 259с.
10. *Захарченко Д. Д., Ротанов Н. А.* Тяговые машины. – М.: Транспорт, 1991. – г. – 343 с.
11. *Калінченк, Ю. С, Кузнецов. А. І.* Тягові електричні машини. Двигуни постійного струму. – Харків:ХНАМГ, 2004. - 85 с.

**ДОДАТКИ**  
(довідковий)  
**Номінальний активний опір обмоток**  
**тягових електродвигунів електропоїздів**

Таблиця 1

Тип тягового електродвигуна	Опір обмоток при 20° С, Ом		
	якоря	головних полюсів	додаткових полюсів
ДК – 103Г	0,208	0,233	0,102
ДК – 106Б	0,165	0,183	0,082
ДК – 106Б2	0,175	0,19	0,07
УРТ – 110А	0,164	1,182	0,0695
УРТ – 110Б	0,039	0,0435	0,0175
РТ – 51Д	0,053	0,131	0,0216
РТ – 51М	0,053	0,131	0,0216
1ДТ.003.1	0,0513	0,0917	0,0152
1ДТ.003.4	0,051	0,0969	0,0179
1ДТ.003.5	0,051	0,097	0,017
1.ДТ.003.6	0,051	0,097	0,017

Таблиця 2

(довідковий)  
**Номінальний активний опір обмоток**  
**тягових електродвигунів електровозів**

Тип тягового електродвигуна	Опір обмоток при 20° С, Ом			
	якоря	головних полюсів	додаткових полюсів	компенсаційної
НБ – 406Б	0,0473	0,0442	0,0237	-
ТЛ – 2К1	0,0317	0,0268	0,01022	0,0263
НБ – 407Б	0,0287	0,0235	0,0113	0,022
НБ – 412К	0,031	0,025	0,01	0,022
НБ – 418кб	0,011	0,0068	0,0053	0,0065
2AL – 4846Et,	0,0362	0,0265	0,0136	-
3AL – 4846Et,				
4AL – 4846Et	0,0332	0,0232	0,0127	-
AL – 4846Dt	0,0068	0,00503	0,00337	-
AL – 4846Dt				
AL – 4442Np,				
1AL – 4442Np				
5AL – 4442nP		0,005	0,003336	-

Таблиця 3

(довідковий)

**Основні технічні характеристики тягових електродвигунів електропоїздів**

Показник	ДК – 103Г	ДК 106Б, ДК- 106Б2	УРТ 110А, УРТ- 110Б	РТ- 51Д, РТ 51М	1ДТ. 003.1	1ДТ. 003.4	1ДТ. 003.5	1ДТ. 003. 6
Напруга на колекторі, В	1500	1500	1500	825	750	750	750	750
Випробувальна напруга, В, при ремонті:								
- капітальному;	8800	8800	8800	5000	8800	8800	8800	8800
- середньому;	7000	7000	7000	4000	7000	7000	7000	7000
- поточному ПР – 3	6000	6000	6000	3500	6000	6000	6000	6000
Ослаблення	53	50	50	32	18	20	20	20
Збудження, %	2550	2200	2150	2000	2300	2300	2300	2300
Маса, кг	180	200	200	200	240	225	235	235
Потужність, кВт	132	146	146	266	350	330	345	345
Струм, А								
Частота	1100	1140	1145	1140	1340	1280	1250	1250
обертання, об/хв.	91	91	91	91	92	91,5	91,5	91,5
ККД, %								
Найбільша частота	2100	2080	2080	2080	2240	2240	2240	2240
обертання якоря, об/хв:	2520	2500	2600	2600	2800	3020	2800	2800
- в експлуатації; - при випробуваннях								

Таблиця 4  
(довідковий )

Основні технічні характеристики тягових електродвигунів електровозів

Показник	Тип тягового електродвигуна									
	НБ 406Б	ТЛ 2К1	НБ-407Б	НБ-412К	НБ-418кб	4846Ет 3АЛ- 4846ЕТ	4АЛ- АЛ- 4846дТ	АЛ- 4442nP 1АЛ- 4442nP	5АЛ- 4442nP	
Напруга на колекторі, В	1500	1500	1500	1600	950	1500	1500	800	8204	
Випробувальна напруга, В, при ремонті;										
- капітальному;	8800	8800	8800	6800	4800	8800	8800	4100	100	
- середньому;	7000	7000	7000	5500	3800	7000	7000	3300	3300	
- поточному ПР-3	6000	6000	6000	4800	3400	6000	6000	2900	2900	
Витрати повітря для вентиляції, $i^3 / \delta a$	95	95	85	110	105	120	120	96	102	
Ослаблення збудження, %	36	36	39	46	35	40	40	40	40	
Маса, кг	5400	4900	5000	4850	4400	5250	5250	2950	3200	
Годинний режим	525	650	755	755	790	700	770	850	900	
Потужність, кВт	380	480	535	515	880	495	545	1140	1120	
Струм, А										
Частота обертання, об/хв.	735	790	760	850	890	680	670	1200	1185	
ККД, %	92,9	93	91,7	94	94,5	94,3	94,3	93,6	93,6	
Тривалий режим	470	560		675	740	618	680	820	870	
Потужність, кВт	340	400	720	450	820	435	480	1100	1185	
Струм, А			510							
Частота обертання, об/хв.	765	820		895	915	720	710	1215	1185	
ККД, %	93,2	93,3	770	94,2	94,8	94,8	94,8	93,7	93,7	
Найбільша частота Обертання якоря, об/хв.:										
– в експлуатації;	1790	1675		1680	1950	1190	1230	1860	1860	
– при випробуваннях	2150	2260	1675	2200	2490	1600	1660	2420	2420	
			2270							

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ  
«ПЕРЕВІРОЧНИЙ РОЗРАХУНОК ТЯГОВОГО ДВИГУНА»

Відповідальний за випуск В. І. Данилевський

Редактор Л. В. Пономаренко  
Верстка В. О. Полічева

---

Підписано до друку 27. 04. 2011 р. Формат 60x84/16.  
Папір для тиражувальних апаратів. Гарн. Таймс.  
Друк на ризографі.  
Наклад 50 прим. Зам. № 30-2/10.

Надруковано в Редакційно-видавничому центрі ДЕТУТ.  
Свідотство про реєстрацію серія ДК № 3079 від 27.12.07р.  
03049, Київ, вул. Миколи Лукашевича, 19

