

**МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра “Системи електричної тяги”**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до виконання контрольної роботи  
з дисципліни**

***"ЗАЛІЗНИЦІ ТА МЕТРОПОЛІТЕНИ"***

**Харків 2009**

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри "Системи електричної тяги" 21 січня 2008 р., протокол №5.

Рекомендуються для студентів денної та заочної форми навчання спеціальностей "Електричний транспорт" і "Електричні системи та комплекси транспортних засобів".

Укладачі:

доценти О.І. Семененко, В.С. Нікулін,  
старш. викл. М.М. Одегов

Рецензент

доц. А.Ф. Агулов

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання контрольної роботи  
з дисципліни

*"ЗАЛІЗНИЦІ ТА МЕТРОПОЛІТЕНИ"*

Відповідальний за випуск Семененко О.І.

Редактор Буранова Н.В.

---

Підписано до друку 30.09.08 р.  
Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.  
Умовн.-друк.арк. 2,0. Обл.-вид.арк. 2,25.  
Замовлення № Тираж 100. Ціна

---

Видавництво УкрДАЗТу, свідоцтво ДК № 2874 від. 12.06.2007 р.  
Друкарня УкрДАЗТу,  
61050, Харків - 50, пл. Фейєрбаха, 7

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Контрольну роботу належить оформити у вигляді пояснювальної записки з кресленнями, графіками та діаграмами на аркушах паперу формату А4 відповідно до вимог державних стандартів України. Для побудови графіків та діаграм слід використовувати міліметровий папір такого ж формату. На титульному аркуші вказують назву міністерства, вищого навчального закладу та кафедри, назву контрольної роботи, ініціали і прізвище студента та викладача, який буде перевіряти роботу, дату виконання.

Пояснювальна записка може виконуватись як вручну, так і за допомогою персонального комп'ютера. В роботі необхідно вказувати найменування розділу і найменування кожної розрахункової операції, далі записують розрахункову формулу у загальному вигляді, після чого через знак рівняння її числовий вираз і результат. Докладних пояснень, а особливо переписувань тексту із підручника, робити не слід. В разі потреби самостійно зробити стислі пояснення до виконаних розрахунків або побудов.

Точність розрахунків має бути не нижче 0,1%, тобто округлення необхідно виконувати до трьох значущих цифр. Якщо на підставі розрахункової формули заповнюється таблиця, то достатньо розрахунок навести для одного значення, а в таблицю записати результати всіх інших розрахунків за цією формулою.

Всі таблиці та рисунки зі схемами і графіками обов'язково повинні мати нумерацію. Масштаб при побудові графіків слід обирати відповідно до нормального ряду: 0,1; 0,2 (0,25); 0,4; 0,5; 1,0; 2,0 (2,5); 4,0; 5,0; 10,0 і т.д. одиниць на міліметр.

План послідовності виконання роботи складається студентом після вивчення відповідного матеріалу та усвідомлення поставлених нижче задач і рекомендацій. Складання плану (алгоритму) розв'язання допомагає при розрахунках, а особливо при використанні засобів обчислювальної техніки. Для прикладу наведено порядок виконання першого завдання, а надалі студенту це необхідно буде робити самостійно.

Виконана контрольна робота після її зарахування зберігається до іспиту. Для складання іспиту кожен студент

повинен бути готовим відповісти на будь-яке із поданих нижче контрольних запитань.

## ЗАВДАННЯ 1

На першій сторінці роботи необхідно записати номер варіанта і вихідні дані із таблиці 1.1 [5]. Номер варіанта слід взяти за двома останніми цифрами учбового шифру або його може задати викладач.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані для завдання 1

Остання цифра учбового шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Маса поїзда $m$ , т	3800	3200	3500	4600	3300	4200	4800	5000	3600	4400
Радіус кривої $R_1$ , м	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950
Радіус кривої $R_2$ , м	750	800	850	900	950	1000	1100	1150	1200	1050
Передостання цифра учбового шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Крутість підйому $i_1$ , ‰	2	3	2	3	4	3	4	3	4	4
Крутість підйому $i_2$ , ‰	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6

Задана ділянка залізниці має довжину 17 км і складається із шести елементів профілю (літерою  $N$  при заданні довжини елемента профілю позначено цифру, яка відповідає останній цифрі учбового шифру):

1 Прямий горизонтальний елемент довжиною  $S_1 = (3800 + N00)$  м.

2 Горизонтальний елемент з кривою, описаною радіусом  $R_1$ , довжиною  $S_2 = (1200 - N00)$  м.

3 Прямий елемент профілю з підйомом крутизною  $i_1$ , довжиною  $S_3 = (3500 - N00)$  м.

4 Елемент профілю з підйомом крутизною  $i_1$ , який суміщено з кривою радіусом  $R_2$ , довжиною  $S_4 = (500 + N00)$  м.

5 Прямий елемент профілю з підйомом крутизною  $i_2$ , довжиною  $S_5 = 4500$  м.

6 Прямий горизонтальний елемент довжиною  $S_6 = 3500$  м.

Крім вказаних вище даних на першій сторінці слід також зобразити схему профілю та плану заданої ділянки в масштабі довжини  $M_S = 0,1$  км/мм. Горизонтальний елемент профілю на схемі позначається горизонтальною лінією, зверху записується крутість, а знизу – довжина елемента  $S_n$  ( $n$  – номер елемента профілю) в метрах. Підйоми позначаються похилими лініями з указанням зверху крутості  $i$  в тисячних частках ( $\text{‰}$ ), у даному випадку для першого елемента профілю крутість дорівнює нулю. Криві позначаються умовними лініями на плані з указанням радіусу  $R$  у метрах, як це показано на рисунку 1.1.

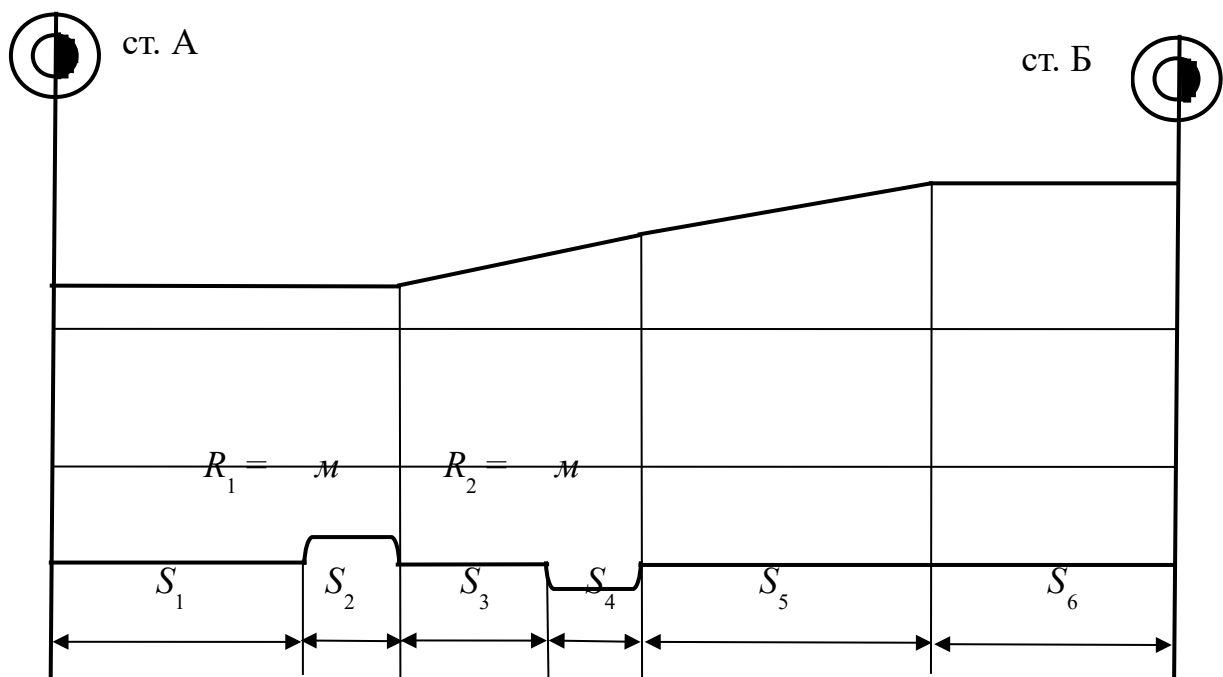


Рисунок 1.1 – План і профіль заданої ділянки залізниці

Згідно з наведеною нижче послідовністю виконання і методичними вказівками за особистим варіантом завдання потрібно визначити:

1 Сили опору руху поїзда  $\Sigma W$  заданої маси  $m$  на кожному елементі профілю заданої ділянки шляху при різних швидкостях руху ( $V = 50, 60, 80$  та  $100$  км/год).

2 Сталу швидкість руху поїзда  $V$  та силу тяги  $F_k$  електровоза із заданою тяговою характеристикою на кожному елементі профілю.

3 Механічну потужність  $P_m$ , яку реалізував електровоз для руху поїзда на кожному елементі профілю шляху.

4 Струм  $I_e$ , який споживав електровоз на кожному елементі профілю шляху із тягової мережі.

5 Електричну енергію  $A_e$ , яку спожив електровоз, та її вартість.

6 Питомі витрати електричної енергії  $a$ , яка була використана для руху поїзда по заданій ділянці.

## Послідовність виконання завдання 1

Нижче поданий порядок виконання всіх необхідних розрахунків. На кожному кроці в дужках указані номери розрахункових формул, які наведені та пояснюються далі в цих методичних вказівках.

1 Розрахувати сили опору руху поїзда на першому елементі профілю шляху (1.1 та 1.3). Результати розрахунку записати в таблицю за формою таблиці 1.2 для всіх заданих швидкостей руху.

2 Розрахувати сили опору руху поїзда на другому елементі профілю шляху при заданих швидкостях (1.1, 1.3, та 1.4). Результати записати в таблицю 1.2.

3 Розрахувати сили опору руху поїзда на третьому елементі профілю шляху при заданих швидкостях (1.1, 1.3, та 1.5). Результати записати в таблицю 1.2.

4 Розрахувати сили опору руху поїзда на четвертому елементі профілю шляху при заданих швидкостях (1.1, 1.3, 1.4 та 1.5). Результати записати в таблицю 1.2.

5 Розрахувати сили опору руху поїзда на п'ятому елементі профілю шляху при заданих швидкостях (1.1, 1.3, та 1.5). Результати записати в таблицю 1.2.

6 Розрахувати сили опору руху поїзда на шостому елементі профілю шляху при заданих швидкостях (1.1 та 1.3). Результати записати в таблицю 1.2.

7 Побудувати криві залежності опору руху від швидкості на всіх елементах профілю шляху та тягову характеристику електровоза (див. розд. 2 метод. вказівок).

8 Визначити сталі швидкості руху та сили тяги електровоза на кожному елементі профілю шляху (див. розд. 2 метод. вказівок). Результати записати в таблицю 1.2.

9 Розрахувати механічну потужність, яку було реалізовано електровозом при русі зі сталими швидкостями на заданих елементах профілю шляху (1.7). Результати розрахунку записати у відповідний рядок таблиці 1.2.

10 Розрахувати кількість механічної енергії, яку витрачено електровозом на рух (тягу) поїзда на кожному елементі профілю шляху (1.8). Результати розрахунку записати у відповідний рядок таблиці 1.2.

11 Розрахувати сумарні витрати механічної енергії електровоза на рух поїзда по всій заданій ділянці шляху (1.9).

12 Розрахувати кількість електричної енергії, яку спожив електровоз із контактної мережі (1.10) для руху поїзда по заданій ділянці.

13 Розрахувати струм, який споживав електровоз із контактної мережі на кожному елементі профілю шляху в системі електричної тяги постійного струму (1.12). Результати розрахунку записати у відповідний рядок таблиці 1.2.

14 Розрахувати струм, який споживав електровоз із контактної мережі в системі електричної тяги змінного струму на кожному елементі профілю шляху (1.13). Результати розрахунку записати в таблицю 1.2.

15 Розрахувати кількість електричної енергії, яка споживалась системою електричної тяги із зовнішньої системи електропостачання для руху заданого поїзда по заданій ділянці шляху (1.15). Визначити вартість отриманої електричної енергії (1.16).

16 Розрахувати питомі витрати електричної енергії на рух заданого поїзда по заданій ділянці шляху (1.17). Результат порівняти з реальними нормами питомих витрат електричної енергії.

17 Студентам також надається право записати власні висновки щодо роботи.

В таблиці 1.2 для прикладу подано один з варіантів результатів розрахунків.

Таблиця 1.2 – Результати розрахунків



Номер елемента профілю шляху		1	2	3	4	5	6
Довжина елемента $S_n$ , м		4100	900	3000	1000	4500	3500
Підйом крутістю $i$ , ‰		0	0	4	4	6	0
Крива радіусом $R$ , м		-	500	-	900	-	-
Сумарний опір руху при заданій швидкості $\Sigma W$ , кН	$V=$ 50км/год	69	124	226	257	304	69
	$V=$ 60км/год	77	132	234	265	312	77
	$V=$ 80км/год	98	153	255	286	333	98
	$V=$ 100км/год	124	179	281	312	359	124
Стала швидкість руху поїзда $V_n$ , км/г		86	75	62	60	57	86
Сила тяги електровоза при сталій швидкості $F_{kn}$ , кН		100	140	230	265	310	100
Механічна потужність електровоза $P_{mn}$ , кВт		2389	2917	3961	4417	4908	2389
Механічна енергія електровоза $A_{mn}$ , кВт·г		111	35	192	74	387	97
Постійний струм, який споживає електровоз $I_{en}^n$ , А		916	1118	1518	1693	1881	916
Змінний струм, який споживає електровоз $I_{en}^{zm}$ , А		126	154	210	234	260	126

# Методичні вказівки до виконання завдання 1

## 1 Сили опору руху поїзда

Силу, яку створює електровоз для руху поїзда, називають силою тяги і позначають  $F_k$ . Цій силі протидіють сили тертя, які виникають під час руху поїзда, і складова сили тяжіння, яка діє назустріч руху поїзда на підйомі. Такі сили називають силами опору руху і позначають  $W$ .

Сили опору руху умовно поділяють на основний ( $W_o$ ) та додатковий ( $W_d$ ) опори. Основний опір руху залежить від типу рухомого складу та швидкості руху. Додатковий опір обумовлений планом та профілем шляху, а також особливими умовами руху (в тунелі, низькі температури навколишнього повітря та інші метеорологічні умови) і не залежить від швидкості руху поїзда.

Додатковий опір руху, як правило, визначається із урахуванням двох складових:

$$W_d = W_{кр} + W_i,$$

тобто додаткової сили тертя  $W_{кр}$  у кривих ділянках шляху та складової сили тяжіння  $W_i$  при русі на підйом. У даній роботі не враховуються сили опору, які діють в особливих умовах руху поїзда, тому сума сил опору руху визначається із умови

$$\sum W = W_o + W_{кр} + W_i. \quad (1.1)$$

Порядок розрахунку складових поданий нижче.

### 1.1 Розрахунок сили основного опору руху поїзда

Основний опір руху  $W_o$  [1, 2] складається із сил тертя кочення коліс по рейках, тертя в буксових підшипниках і тертя локомотива та вагонів об повітря (аеродинамічний опір повітряного середовища).

Із збільшенням швидкості руху сила основного опору руху збільшується. Математично залежність сили  $W_o$  від швидкості руху  $V$  визначається рівнянням

$$W_o = A + BV + CV^2.$$

Величина постійних коефіцієнтів  $A$ ,  $B$  та  $C$  залежить від типу рухомого складу та сили тяжіння, з якою поїзд тисне на рейки, тобто від його ваги. Сила ваги поїзда  $G$ , якщо відома його маса  $m$ , визначається із рівняння другого закону Ньютона, кН:

$$G = mg,$$

де  $m$  – маса поїзда, т;

$g$  – прискорення вільного падіння тіла,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

Для розрахунків  $W_o$  зручно користуватися питомою величиною основного опору руху [1, с.27], яка позначається буквою  $w_o$  та визначається із умови

$$w_o = \frac{W_o}{G}.$$

Якщо силу ваги поїзда вимірювати в кН, а повний опір руху  $W_o$  в Н, тоді питомий опір  $w_o$  вимірюється в Н/кН. Повний основний опір буде дорівнювати, кН:

$$W_o = w_o G \cdot 10^{-3}. \quad (1.2)$$

Величина  $w_o$  розраховується за емпіричними формулами, які отримані дослідним шляхом для всіх видів та типів рухомого складу. Порядок розрахунку величини питомого основного опору руху поїзда детально розглянутий в рекомендованій літературі [1, 2]. Для поїзда, який складається із чотиривісних вантажних вагонів та восьмивісного електровоза, при виконанні даної роботи скористуємося усередненими значеннями питомого основного опору руху поїзда  $w_o$  залежно від швидкості руху  $V$ , наведеними в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Значення питомого основного опору руху заданого поїзда від швидкості

$V$ , км/год	50	60	80	100
$w_o$ , Н/кН	1,75	1,95	2,49	3,15

Якщо виразити вагу поїзда через його масу та підставити в (1.2), отримаємо розрахункове рівняння, кН,

$$W_o = 9,81 w_o m \cdot 10^{-3}, \quad (1.3)$$

де  $w_o$  – питомий основний опір руху, Н/кН.

## 1.2 Розрахунок сили опору руху на кривих ділянках шляху

Під час руху поїзда на кривих ділянках шляху виникає додаткове тертя коліс об рейки [1, 2]. Колеса колісної пари жорстко сполучені (напресовані) з віссю колісної пари і не можуть повертатися відносно одне одного. При коченні колісної пари на кривих колесо, яке котиться по зовнішній рейці, повинно пройти більший шлях у порівнянні з колесом, яке котиться по внутрішній рейці при одному й тому ж числі обертів. При наявності жорсткого зв'язку між колесами виникає проковзування коліс відносно рейок, що призводить до додаткових витрат механічної енергії.

Отже, рух колісних пар на кривих характеризується появою додаткової сили тертя, яку позначаємо  $W_{кр}$ . Дослідним шляхом встановлено, що питомий опір руху на кривих ділянках шляху обернено пропорційний радіусу кривої. Величина його визначається за емпіричною формулою, Н/кН,

$$w_{кр} = \frac{700}{R},$$

де  $R$  – радіус кривої, м.

Сила опору руху поїзда на кривих ділянках шляху, кН,

$$W_{кр} = w_{кр} G = 9,81 \frac{700}{R} m \cdot 10^{-3}. \quad (1.4)$$

### 1.3 Розрахунок сили опору руху поїзда від ухилу

Коли поїзд знаходиться на похилій ділянці шляху, сила тяжіння  $G$  розкладається на дві складові (рисунок 1.2), під час руху поїзда на підйом на нього діє складова сили тяжіння, направлена назустріч руху.

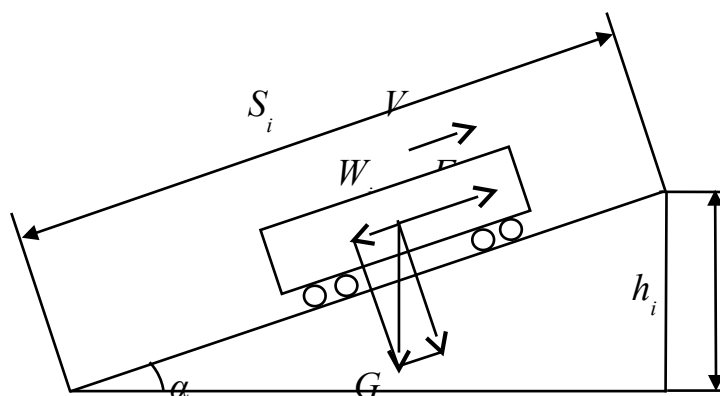


Рисунок 1.2 – Сили, що діють на поїзд під час руху на ухилі

Одна складова направлена перпендикулярно до площини рейок; величина її приблизно рівна вазі поїзда, оскільки кут нахилу шляху  $\alpha$  дуже малий (для залізниць – не більше ніж три градуси).  $G' = G \cos \alpha = 0,999G$ , помилка складає  $\delta G \leq 0,12\%$ . Для практичних розрахунків такою помилкою нехтують і основний опір руху розраховують для ваги, яка рівна силі тяжіння  $G$ .

Друга складова  $W_i$  направлена паралельно площині рейок до боку спуску, тобто вона направлена проти напрямку руху поїзда. Ця складова і є опором руху від підйому, її визначають як проекцію сили тяжіння  $G$  на площину рейок:

$$W_i = G \sin \alpha.$$

Для розрахунків використовують поняття крутості підйому, яку виражають в тисячних частках – проміле (‰). Крутістю

підйому називається відношення висоти  $h_i$  у метрах до довжини відрізка шляху  $S_i$  в кілометрах (рисунок 1.2).

З подібності трикутників отримуємо відношення

$$\frac{W_i 10^3}{G} = \frac{h_i}{S_i} = i.$$

Тоді повний опір від підйому, рівний складовій сили тяжіння, визначиться в кН

$$W_i = G i 10^{-3}.$$

Якщо сила опору руху від підйому вимірюється в кН, то відношення

$$\frac{W_i \cdot 10^3}{G} = w_i$$

визначає питомий опір руху від підйому, який вимірюється в Н/кН. Звідси видно, що крутість підйому, яка виражається в тисячних частках, чисельно дорівнює питомому опору руху від підйому

$$i(\text{‰}) = w_i(\text{Н/кН}),$$

а сила опору руху поїзда від підйому визначається за формулою, кН,

$$W_i = w_i G 10^{-3} = 9,81 i m \cdot 10^{-3}, \quad (1.5)$$

де  $m$  – маса поїзда, т.

## **2 Визначення сталих швидкостей руху поїзда та сил тяги електровоза**

Згідно з першим законом Ньютона будь-яке тіло намагається зберегти стан спокою або рівномірного прямолінійного руху. Такий стан можливий за умови, що тіло знаходиться в рівновазі, коли рівнодіюча всіх сил, що діють на тіло, дорівнює нулю. Для поїзда, що рухається, зрівноважений стан настає, коли сила тяги електровоза дорівнює сумі сил опору руху

$$F_k = \Sigma W. \quad (1.6)$$

З попередніх співвідношень видно, що сума сил опору руху на кожному елементі профілю зростає із збільшенням швидкості руху поїзда. Водночас сила тяги електровоза зменшується при зростанні швидкості, що пояснюється електромеханічними процесами, які відбуваються в тягових електричних двигунах.

Залежність сили тяги електровоза від швидкості руху  $F_k(V)$  називають тяговою характеристикою. Для виконання цього завдання тягова характеристика восьмивісного електровоза наведена в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Тягова характеристика заданого восьмивісного електровоза

$V$ , км/год	50	60	80	100
$F_k$ , кН	471	267	120	67

Отже, в процесі руху поїзда, по мірі збільшення швидкості, сили опору руху зростають, а сила тяги електровоза зменшується. Зрівноважений стан (1.6) настає при певному сталому значенні швидкості руху та зберігається до тих пір, поки не буде порушено рівність сили тяги і суми сил опору руху. При зміні профілю шляху рівність порушується і відновлюється при новому, відмінному від попереднього, значенні сталої швидкості. Очевидно, що на різних елементах профілю шляху поїзд буде рухатись з різними сталими швидкостями.

Сталі швидкості руху на заданих елементах профілю шляху можна визначити графічним методом. Для цього в прямокутній системі координат потрібно побудувати криві залежності суми

сил опору руху від швидкості на кожному заданому елементі профілю за розрахованими раніше точками, координати яких записано в таблицю 1.2. Приклад побудови наведений на рисунку 1.3. Побудову необхідно виконувати в масштабі: для швидкості –  $M_V = 0,5$  км/год/мм; для сили –  $M_F = 2$  кН/мм.

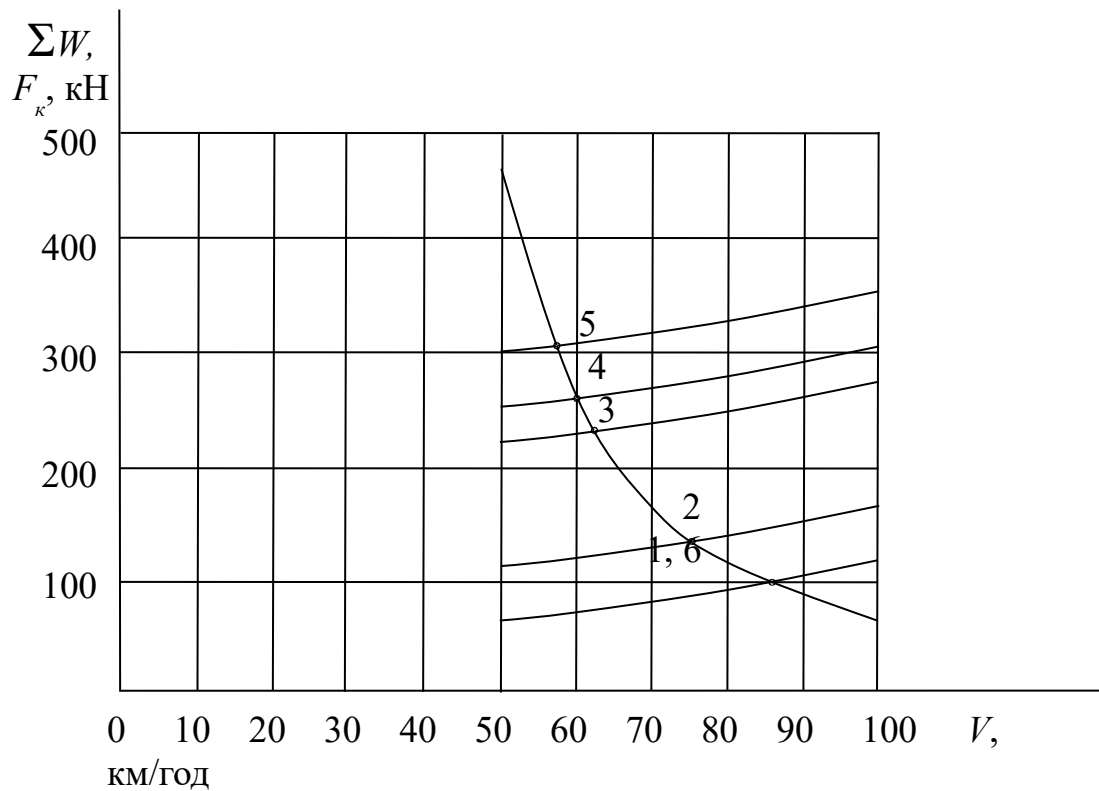


Рисунок 1.3 – Криві суми сил опору руху від швидкості та тягова характеристика електровоза

На цьому ж рисунку необхідно побудувати тягову характеристику електровоза за точками, координати яких наведені вище.

Значення сталих швидкостей руху –  $V_n$  та відповідних їм сил тяги електровоза –  $F_{\kappa n}$  визначають за координатами точок перетину тягової характеристики електровоза з кривими сил опору для кожного елемента профілю шляху. На рисунку ці точки пронумеровані відповідно до номерів елементів профілю.

### 3 Потужність, яку реалізував електровоз для руху поїзда



Потужністю прийнято називати роботу, яка виконується за одиницю часу, зазвичай за секунду.

Відомо, що механічна робота визначається добутком сили на шлях, протягом якого діє ця сила. У нашому випадку робота здійснювалась силою тяги  $F_k$  на відрізку шляху довжиною  $S$  за час  $t$ . Отже, механічна потужність  $P_m$ , яку реалізував електровоз, буде визначатися за такою формулою:

$$P_m = F_k \frac{S}{t}.$$

Шлях, пройдений поїздом за одиницю часу, є швидкість його руху  $V=S/t$ , тоді потужність

$$P_m = F_k V.$$

Якщо сила вимірюється в ньютонах (Н), а швидкість у метрах за секунду (м/с), тоді потужність вимірюється у ватах (Вт).

На залізничному транспорті швидкість прийнято вимірювати в кілометрах за годину, тоді

$$V \text{ (м/с)} = V \text{ (км/год)} \cdot \frac{1000}{3600} = \frac{1}{3,6} V \text{ (км/год)},$$

а механічна потужність, кВт,

$$P_{mn} = \frac{F_{kn} V_n}{3,6}, \quad (1.7)$$

де  $F_{kn}$  – сила тяги електровоза на  $n$ -му елементі профілю шляху, кН;

$V_n$  – відповідна швидкість руху, км/год.

Як видно із формули (1.7), потужність, яку реалізував електровоз, різна при різних швидкостях руху по одному й тому ж відрізку шляху або на різних елементах профілю шляху при однакових швидкостях руху.

В роботі потрібно розрахувати реалізовану електровозом механічну потужність на кожному елементі профілю шляху при сталій швидкості руху, величина якої визначена на попередньому етапі.

#### 4 Кількість механічної енергії, яку віддав електровоз на тягу поїзда

Якщо кількість енергії, яку віддав електровоз за одиницю часу, тобто потужність на виході електровоза, помножити на час роботи, отримаємо кількість енергії, потрібної для руху поїзда.

Потужність ми уже визначили, а час можна розрахувати за відомою швидкістю та довжиною пройденого шляху.

Час руху по кожному відрізку шляху, в год,

$$t_n = \frac{S_n}{V_n},$$

де  $S_n$  – довжина  $n$ -го елемента профілю шляху, км;

$V_n$  – стала швидкість руху на  $n$ -му елементі шляху, км/год.

Витрати енергії на  $n$ -му елементі шляху будуть, кВт·год:

$$A_{mn} = P_{mn} t_n = \frac{P_{mn} S_n}{V_n}. \quad (1.8)$$

Сумарні витрати енергії на всіх ділянках шляху складуть, кВт·год:

$$A_m = \sum_{n=1}^{n=6} P_{mn} t_n = \sum_{n=1}^{n=6} A_{mn}. \quad (1.9)$$

#### 5 Кількість електричної енергії, яку споживав електровоз із тягової мережі

Електровоз є перетворювачем електричної енергії, яку він споживає із тягової мережі, в механічну енергію, потрібну для руху поїзда.

Перетворення енергії завжди супроводжується деякими втратами її в перетворювачі. Тому енергія або потужність на виході перетворювача завжди менше енергії або потужності на

вході. Якщо позначити через  $P_{ex}$  потужність на вході, то потужність на виході буде

$$P_{вих} = P_{ex} - \Delta P,$$

де  $\Delta P$  – втрати потужності перетворювача, які переходять у тепло.

Відношення енергії або потужності на виході перетворювача до енергії або потужності на вході називається коефіцієнтом корисної дії перетворювача і скорочено позначається ККД, який завжди менше одиниці. Для електровоза

$$\eta_e = \frac{P_{ex} - \Delta P}{P_{ex}} = \frac{P_{вих}}{P_{ex}} = \frac{P_m}{P_e} < 1,$$

де  $P_e$  – потужність електричної енергії, яку споживав електровоз із тягової мережі для руху поїзда.

Величина ККД існуючих електровозів знаходиться приблизно в межах  $\eta_e = 0,84 \div 0,90$ . Приймаємо  $\eta_e = 0,87$ , тоді енергія, яку споживав електровоз із тягової мережі, кВт·год,

$$A_e = \frac{A_m}{\eta_e} = 1,15 A_m. \quad (1.10)$$

## **6 Розрахунок струмів, які споживав електровоз із тягової мережі**

Коли відомі споживана електровозом потужність та напруга на струмоприймачі, легко визначається величина струму. Потужність, що споживає електровоз із мережі, визначається, кВт,

$$P_e = \frac{P_m}{\eta_e} = I_e U_{mm} 10^{-3}.$$

Звідси струм, який споживав електровоз на  $n$ -му елементі ділянки шляху, А,

$$I_{en} = \frac{P_{mn} 10^3}{\eta_e U_{mm}}. \quad (1.11)$$

Для системи тяги постійного струму

$$I_{en}^n = 1,15 \frac{P_{mn} 10^3}{3000}, \quad (1.12)$$

де  $U_{mm} = 3000$  В.

Для системи тяги на змінному струмі  $U_{mm} = 25000$  В. Також в цьому випадку величина споживаного струму повинна визначатися з урахуванням особливостей електровозів змінного струму, які вивчатимуться пізніше. З урахуванням цих особливостей струм, який споживав електровоз змінного струму, буде приблизно на 15 % більшим, ніж за формулою (1.11), і його розраховують із умови

$$I_{en}^{zm} = 1,32 \frac{P_{mn} 10^3}{25000}. \quad (1.13)$$

## **7 Кількість електричної енергії, яка споживалась системою електричної тяги із зовнішньої енергетичної системи**

Електровоз отримує електричну енергію із контактної мережі через струмоприймач, який встановлено на даху. При протіканні струму по проводах контактної мережі та рейках в них втрачається від 4 до 18 % енергії. Якщо усереднено прийняти ККД тягової мережі рівним  $\eta_{mm} = 0,89$ , то енергія, що віддається тяговими підстанціями в контактну мережу, складе, кВт·год

$$A_{mm} = \frac{A_e}{\eta_{mm}} = \frac{1,15}{0,89} A_m = 1,29 A_m. \quad (1.14)$$

Тягові підстанції отримують електроенергію через лінії електро-передачі від зовнішньої енергетичної системи. Ця електрична енергія враховується лічильниками, установленими на вході (вводі) підстанції. Залізниця сплачує за отриману енергію в кількості, яка врахована лічильниками, або, як кажуть, за показаннями лічильників.

На тяговій підстанції відбувається перетворення отриманої електроенергії. В системі електричної тяги постійного струму це відбувається шляхом зниження напруги приблизно до 3300 В та перетворенням енергії змінного струму в енергію постійного струму (випрямленням). У системі змінного струму відбувається тільки зниження напруги до 27500 В. У процесі перетворення на тяговій підстанції втрачається від 2 до 6 % отриманої енергії. В цій роботі ККД тягової підстанції приймаємо рівним  $\eta_{mn} = 0,96$ , тоді кількість електричної енергії, отриманої залізницею для руху поїзда на заданій ділянці шляху, складе, кВт·год:

$$A_{mn} = \frac{A_{mm}}{\eta_{mn}} = \frac{1,29}{0,96} A_m = 1,345 A_m. \quad (1.15)$$

Знаючи кількість електроенергії, отриманої від енергосистеми для руху поїзда по заданій ділянці, та середню відпускну ціну електроенергії, яка складає 0,28 грн/кВт·год, можна підрахувати її вартість, грн:

$$B = 0,28 A_{mn}. \quad (1.16)$$

Питомими витратами електричної енергії називають кількість електроенергії у Вт·год, яку необхідно затратити на умовну одиницю перевізної роботи, а саме на 1 т·км. Іншими словами, роботу з переміщення маси поїзда в 1 т на відстань в 1 км. Розрахунок питомих витрат електричної енергії для руху поїзда по заданій ділянці шляху виконаємо за формулою, Вт·год/(т·км),

$$a = \frac{A_{mn} 10^3}{m \sum S}. \quad (1.17)$$

Реальні норми питомих витрат електричної енергії на тягу вантаж-них поїздів складають від 10 до 20 Вт·год/(т·км).

### **Контрольні запитання**

- 1 Як впливає швидкість руху на розглянуті складові опору руху поїзда?
- 2 Як впливають радіус кривої та крутість підйому на складові опору руху?
- 3 Поясніть вплив профілю шляху на потужність, що реалізує електровоз, і сталу швидкість руху.
- 4 Як можна зменшити електричний струм, що споживає електровоз із контактної мережі на тягу?
- 5 Назвіть основну перевагу системи електричної тяги на змінному струмі в порівнянні з системою тяги постійного струму.
- 6 Як зміниться кількість електричної енергії, отриманої від енерго-системи для руху поїзда по заданій ділянці, при зміні (збільшенні або зменшенні) його маси?
- 7 Як визначити загальний ККД електричної тяги?

## ЗАВДАННЯ 2

Метою цього завдання є вивчення принципу роботи та основних характеристик тягового електродвигуна (ТЕД) як основного перетворювача електричної енергії в механічну, необхідну для руху поїзда.

Завдання полягає в розрахунку та побудові тягової характеристики електровоза згідно з заданими вихідними даними ТЕД (таблиця 2.1) [6]. Вибір номера варіанта наведено вище в завданні 1. Кожний тип ТЕД характеризується основними розрахунковими (паспортними) номінальними даними, до яких належать задані за варіантами:

$P_{дн}$  – номінальна потужність (на валу), кВт;

$U_{дн}$  – номінальна напруга, В;

$n_{дн}$  – номінальна частота обертання, об/хв;

а також конструктивними даними:

$2p$  – кількість полюсів двигуна;

$2a$  – кількість паралельних гілок обмотки якоря;

$N$  – кількість провідників обмотки якоря;

$\mu$  – передаточне число зубчатої передачі.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані тягового електродвигуна

Остання цифра учбового шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{дн}$ , кВт	620	660	775	690	730	790	760	810	715	750
$n_{дн}$ , об/хв	890	1030	1100	840	790	930	820	710	1060	780
$\mu$	3,83	4,10	4,40	4,19	3,76	3,90	3,43	2,73	4,63	2,64
Перед- остання цифра учбового шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{дн}$ , В	1500	1050	1600	950	1500	750	900	1600	1250	1100
$2p$	4	6	6	4	6	4	4	6	4	6
$2a$	4	6	6	4	6	4	4	6	4	6
$N$	824	792	864	696	1050	928	1216	1008	896	912

Загальні дані для всіх варіантів:

$D_k = 1,25$  м – діаметр коліс колісної пари;

$K = 8$  – число осей електровоза;

$\eta_{\text{дн}} = 0,94$  – номінальний ККД тягового електродвигуна.

## Методичні вказівки до виконання завдання 2

Виконання поставленого завдання базується на знанні ряду законів та явищ, які вивчаються в курсі фізики. В поясненнях ми користуємося термінами та позначеннями, прийнятими в інженерній практиці, які не завжди збігаються з позначеннями та термінами в підручниках з фізики. Наприклад, замість „сила струму” ми говоримо „величина струму” або просто „струм”.

Опис принципу роботи та будова ТЕД міститься в підручниках [1-3], які рекомендуються для отримання початкового уявлення. Для виконання роботи потрібно вивчити наведені нижче пояснення, усвідомити поставлене завдання та самостійно скласти план послідовності виконання необхідних розрахунків.

### 1 Сила тяги колісної пари

Сила тяги, яка необхідна для руху поїзда з електричним приводом, формується в результаті перетворення електричної енергії в механічну [1]. Це перетворення здійснюється ТЕД, які на електрорухомому складі отримують енергію із системи електропостачання через тягову мережу.

На електрифікованих залізницях і в метрополітенах України застосовується індивідуальний привод, тобто кожна рушійна колісна пара обертається своїм ТЕД через зубчасту передачу. Величина моменту  $M_k$ , який обертає колісну пару, залежить від моменту  $M_o$ , що розвиває ТЕД, і визначається формулою [2]

$$M_k = M_o \mu \eta_z,$$

де  $\mu = z_2/z_1$  – передаточне число зубчатої передачі, зазвичай визначається через відношення числа зубців великого зубчатого колеса  $z_2$  до числа зубців малого колеса  $z_1$ ;



$\eta_z = 0,975$  – коефіцієнт, який враховує втрати моменту на подолання тертя в зубчатій передачі.

Під дією сили тяжіння, тобто ваги  $G_k$  електровоза чи електропоїзда, яка припадає на одну колісну пару в точках дотику коліс з рейками  $K$  (рисунок 2.1), виникають сили зчеплення, що перешкоджають проковзуванню коліс відносно рейок. При обертанні колісної пари двигуном колеса відштовхуються від рейок у точці  $K$  (миттєвий центр обертання), в результаті – обертальний момент  $M_k$  перетворюється в пару сил  $F_{k\delta}$  з плечем, рівним радіусу колеса  $\rho_k$ .

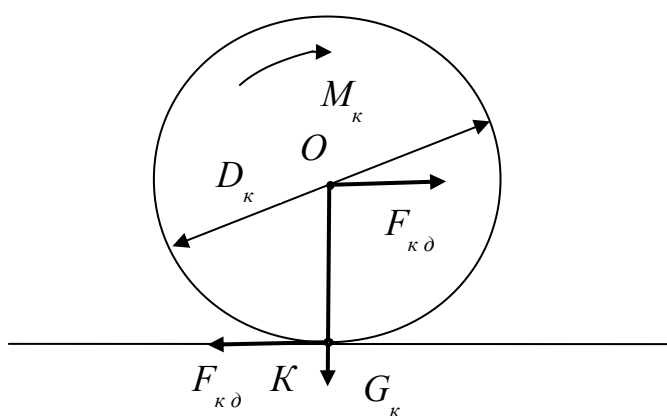


Рисунок 2.1 – Схема сил, які діють на колесо при реалізації сили тяги

Одна із складових сил цієї пари  $F_{k\delta}$  діє від колісної пари на рейки в точці  $K$ , а друга через букси від осі колісної пари передається на раму і використовується для тяги поїзда. Силу  $F_{k\delta}$  прийнято називати дотичною силою тяги рушійної колісної пари або одного двигуна.

Сили тяги всіх колісних пар електровоза або моторних вагонів електропоїзда сумуються та реалізуються для поступального руху поїзда. Величина дотичної сили тяги, яку розвиває одна колісна пара,

$$F_{k\delta} = \frac{M_k}{\rho_k} = \frac{2\mu M_\delta}{D_k} \eta_z. \quad (2.1)$$

Величина максимальної дотичної сили тяги не може бути більше сили зчеплення коліс з рейками, яка залежить від стану поверхні коліс і рейок, швидкості руху та інших факторів [1-3]. Якщо двигун створює силу тяги, величина якої буде більше величини сил зчеплення коліс з рейками, то колеса будуть проковзувати (буксувати), зчеплення переходить у тертя і сила тяги зменшиться.

На рисунку 2.2 показана принципова схема будови електричного двигуна постійного струму. Обертальний момент  $M_d$  на валу ТЕД створюється силами  $F'_e$  взаємодії струму в провідниках 2 обмотки якоря 1 з магнітним полем, яке створюється при протіканні струму в обмотках 4 головних полюсів 3. Цей струм прийнято називати струмом збудження.

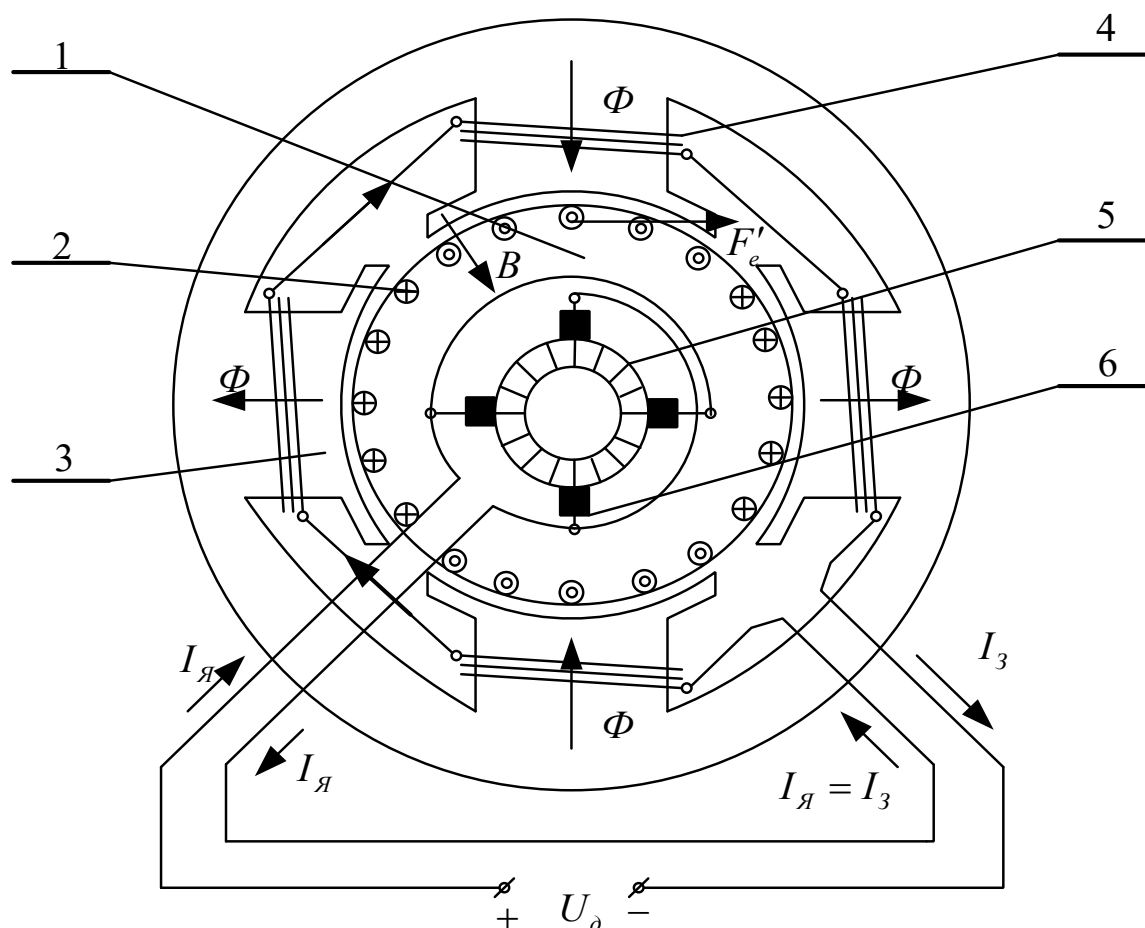


Рисунок 2.2 – Схема будови електричного двигуна постійного струму

Згідно з законом Ампера електромагнітна сила  $F_e'$ , яка діє на кожен провідник обмотки якоря довжиною  $l_a$  зі струмом  $I'$  в магнітному полі з індукцією  $B$ , визначається із умови

$$F_e' = BI'l_a \sin \alpha, \quad (2.2)$$

де  $\alpha$  – кут між напрямком струму в провіднику та вектором магнітної індукції.

Провідники обмотки вкладаються в пази на поверхні осердя якоря 1 з діаметром  $D_j$  (рисунок 2.2). Наконечникам головних полюсів двигуна надається така форма, щоб вектор магнітної індукції  $B$  був направлений по радіусу відносно осі обертання якоря. Тоді  $\sin \alpha = 1$ , а кожен провідник якірної обмотки буде створювати обертальний момент

$$M_e' = F_e' \frac{D_j}{2} = BI'l_a \frac{D_j}{2}. \quad (2.3)$$

Момент  $M_e'$  прийнято називати електромагнітним, оскільки він створюється електромагнітною силою взаємодії  $F_e'$ .

У всіх провідниках обмотки якоря протікає струм  $I'$  такого напрямку, який забезпечує однаковий напрям їх обертальних моментів (рисунок 2.2). Це означає, що сумарний електромагнітний обертальний момент на валу двигуна, створений  $N$  провідниками обмотки якоря, буде дорівнювати:

$$M_{\partial e} = \sum_i^N BI'l_a \frac{D_j}{2} = \frac{ND_j l_a}{2} B_c I', \quad (2.4)$$

де  $B_c$  – середнє значення магнітної індукції в повітряному зазорі по дузі кола поверхні якоря, що припадає на один полюс  $\tau = \frac{\pi D_j}{2p}$  ( $2p$  – число головних полюсів двигуна).

Провідники обмотки якоря у визначеному порядку з'єднуються між собою в декілька паралельних гілок; число паралельних гілок обмотки якоря позначається  $2a$ . Струм у кожному провіднику обмотки

$$I' = \frac{I_{\text{я}}}{2a},$$

де  $I_{\text{я}}$  – струм, що поступає в обмотку якоря від зовнішнього джерела живлення через колектор 5 та щітки 6.

Величина магнітного потоку  $\Phi$  кожного головного полюса двигуна дорівнює:

$$\Phi = B_c \tau l_a = \frac{\pi D_{\text{я}} l_a B_c}{2p}.$$

Підставляючи вираз струму та магнітного потоку в рівняння (2.4), отримаємо:

$$M_{\text{oe}} = \frac{pN\Phi I_{\text{я}}}{2a\pi} = C_M \Phi I_{\text{я}}, \quad (1.5)$$

де  $C_M = \frac{pN}{2a\pi}$  – конструктивна стала двигуна для розрахунку обертового моменту.

Електромагнітний момент не повністю передається на вал двигуна, частина його втрачається на подолання моменту, обумовленого власними втратами всередині двигуна. В курсі «Електричні машини» вивчаються ці втрати. В нашому випадку ми можемо задатися коефіцієнтом втрат  $\eta_m = 0,97$ . Розрахунковий вираз моменту на валу двигуна

$$M_{\text{д}} = C_M \Phi I_{\text{я}} \eta_m \quad (2.6)$$

можна підставити в рівняння (2.1). Тоді отримаємо розрахунковий вираз для сили тяги, що розвиває двигун, який зв'язаний з колісною парою:

$$F_{\text{кд}} = C_M \Phi I_{\text{я}} \eta_m \frac{\mu}{\rho_{\text{к}}} \eta_z = C_F \Phi I_{\text{я}} \eta_F, \quad (2.7)$$

де  $C_F = C_M \frac{\mu}{\rho_{\text{к}}}$  – конструктивна стала для розрахунку сили тяги одного двигуна;

$\eta_F = \eta_m \eta_z$  – коефіцієнт, що враховує втрату сили тяги в процесі перетворення енергії в механічну, необхідну для руху поїзда.

## 2 Швидкісні характеристики двигуна

При обертанні якоря провідники його обмотки пересікають магнітне поле зі швидкістю  $V_{я}$  і в них наводиться електрорушійна сила (ЕРС). Згідно з законом електромагнітної індукції Фарадея ця ЕРС визначається як

$$E' = Bl_a V_{я} \sin \beta. \quad (2.8)$$

В електричних машинах кут  $\beta$  між вектором індукції  $B$  та вектором швидкості  $V_{я}$  роблять рівним  $90^\circ$ , тому  $\sin \beta = 1$ .

Величина колової швидкості провідників обмотки якоря залежить від частоти його обертання  $n$  і визначається співвідношенням, об/хв

$$V_{я} = \frac{\pi D_{я} n}{60}.$$

Як ми уже згадували раніше, всі  $N$  провідників обмотки якоря з'єднуються в  $2a$  паралельних гілок. Електрична схема обмотки така, що ЕРС  $\frac{N}{2a}$  провідників одного паралельного кола додаються; тоді між щітками протилежної полярності буде діяти ЕРС двигуна

$$E = \frac{N}{2a} E' = \sum_1^{\frac{N}{2a}} Bl_a \frac{\pi D_{я} n}{60}. \quad (2.9)$$

Цей вираз може бути перетворено з урахуванням раніше викладених думок про величину магнітної індукції  $B_c = \frac{2p\Phi}{\pi D_{я} l_a}$ , тоді наведена на обмотку якоря ЕРС буде дорівнювати:

$$E = \frac{pN}{60a} \Phi n = C_n \Phi n, \quad (2.10)$$

де  $C_n = \frac{pN}{60a}$  – конструктивна стала двигуна для розрахунку ЕРС за частотою обертання якоря.

Оскільки двигун обертає колісну пару через редуктор, між частотою обертання  $n$  та поступальною швидкістю руху  $V$  колісної пари, а отже, швидкістю електровоза і поїзда, існує пряма залежність. Колова швидкість колеса, тобто поступальна швидкість колісної пари, може бути виражена через частоту обертання вала двигуна таким співвідношенням:

$$V = \frac{\pi D_{\kappa}}{60\mu} n.$$

Швидкість руху поїзда прийнято виражати в кілометрах за годину, тоді очевидно:

$$V = \frac{\pi D_{\kappa}}{60\mu} \frac{3600}{1000} n = 0,188 \frac{D_{\kappa}}{\mu} n. \quad (2.11)$$

Цей вираз використовується в різних розрахунках, пов'язаних з електричною тягою. Вираз ЕРС (2.10), наведеної на обмотці якоря, також зручно записувати залежно від швидкості руху

$$E = \frac{1}{0,188} \frac{pN}{a60} \frac{\mu}{D_{\kappa}} \Phi V = C_V \Phi V, \quad (2.12)$$

де  $C_V = 5,3 \frac{pN\mu}{a60D_{\kappa}}$  - конструктивна стала двигуна для обчислення ЕРС за швидкістю руху.

Знаючи ЕРС двигуна, можна знайти залежність між струмом  $I_{\gamma}$  та швидкістю руху  $V$  із рівняння електричного стану електричного кола двигуна (рисунок 2.3).

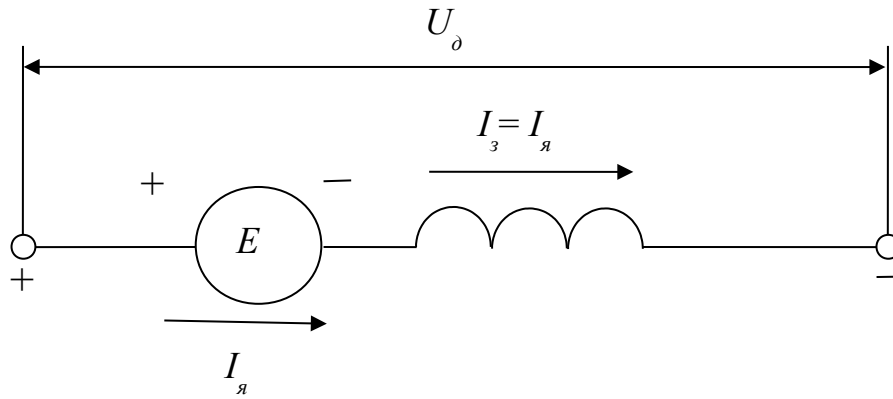


Рисунок 2.3 – Електричне коло двигуна постійного струму послідовного збудження

На основі II закону Кірхгофа напруга  $U_{\delta}$ , яка підведена до двигуна, урівноважується його ЕРС  $E$  та падінням напруги на опорі його обмоток  $r_{\delta}$ . З урахуванням виразів (2.10) та (2.12) маємо

$$U_{\delta} = E + I_{\text{я}} r_{\delta} = C_n \Phi n + I_{\text{я}} r_{\delta} = C_V \Phi V + I_{\text{я}} r_{\delta}. \quad (2.13)$$

Із виразу (2.13) легко отримати залежність частоти обертання вала двигуна або швидкості руху поїзда від струму двигуна, яку прийнято називати швидкісною характеристикою ТЕД. В останньому випадку додають, що ця характеристика віднесена до обода колеса. Аналітичний вираз швидкісної характеристики має вигляд:

$$n = \frac{U_{\delta} - I_{\text{я}} r_{\delta}}{C_n \Phi}, \quad (2.14)$$

на ободі колеса

$$V = \frac{U_{\delta} - I_{\text{я}} r_{\delta}}{C_V \Phi}. \quad (2.15)$$

### 3 Крива намагнічування і тягова характеристика

Поставлена в контрольній роботі задача розрахунку тягової характеристики розв'язується, якщо визначити функції  $F_{\kappa \delta}(I_{\text{я}})$  та  $V(I_{\text{я}})$  для різних значень  $I_{\text{я}}$ .

Як видно із виразів (2.7) та (2.15), ці функції можуть бути обчислені, якщо для кожного значення струму  $I_я$  відомий магнітний потік  $\Phi$ .

Вище згадувалось, що магнітний потік створюється струмом збудження  $I_3$ , який протікає в обмотках 4 головних полюсів 3 двигуна (рисунок 2.2). Отже, магнітний потік є функцією струму збудження  $I_3$ , і величина його визначається за кривою намагнічування двигуна  $\Phi(I_3)$  (рисунок 2.4).

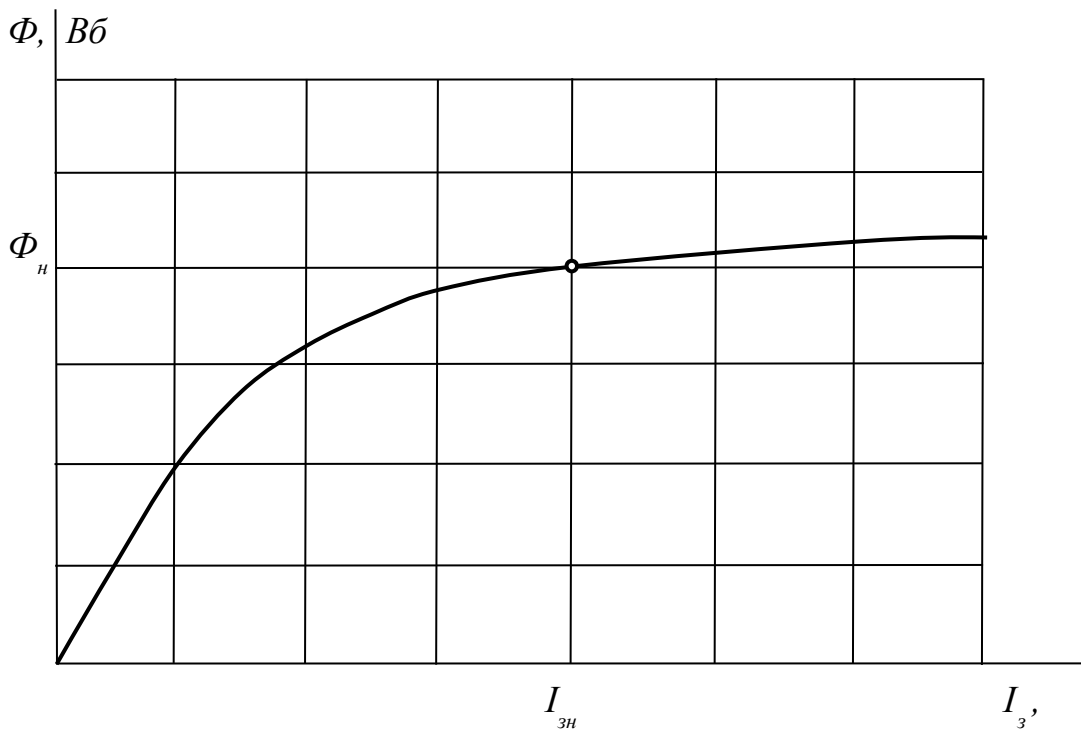


Рисунок 2.4 – Крива намагнічування

Для виконання даної контрольної роботи задається приблизний вид кривої намагнічування у вигляді залежності магнітного потоку ТЕД від струму збудження, вираженої відносно номінальних значень  $I_{3н}$  та  $\Phi_n$  (таблиця 2.2). Щоб отримати криву намагнічування для заданого варіанта, необхідно перерахувати дані таблиці 2.2 в абсолютні значення. Кожне значення розраховується із умови:

$$I_3 = \left( \frac{I_3}{I_{3н}} \right) I_{3н}, \text{ А}; \quad \Phi = \left( \frac{\Phi}{\Phi_n} \right) \Phi_n, \text{ Вб.}$$

Таблиця 2.2 – Крива намагнічування у відносних одиницях



Струм збудження	$I_z / I_{zn}$	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50
Магнітний потік	$\Phi / \Phi_n$	0,50	0,76	0,90	1,00	1,11

Результати розрахунку записати в таблицю, яку необхідно виконати за формою таблиці 2.2.

У ТЕД прийнято всі обмотки головних полюсів включати послідовно з обмоткою якоря, звідси і назва «послідовне збудження». Отже, при послідовному збудженні  $I_z = I_a$ .

Очевидно, що номінальне значення струму  $I_{ян}$  знаходиться через номінальну потужність з урахуванням ККД. Розрахункову формулу потрібно скласти самостійно.

Номінальним магнітним потоком  $\Phi_n$  є потік, створений номінальним струмом збудження  $I_{zn} = I_{ян}$ .

Номінальне значення магнітного потоку знаходиться з рівняння електричного стану двигуна (2.13) для номінального режиму. Очевидно, що

$$U_{дн} = C_n \Phi_n n_n + I_{ян} r_d. \quad (2.16)$$

Величина опору обмоток двигуна звичайно вказується заводом-виготовлювачем. У даному випадку вона нам невідома і для виконання роботи визначається орієнтовно за падінням напруги в номінальному режимі, а саме  $I_{ян} r_d = 0,04 U_{дн}$ .

Якщо задатися декількома значеннями струму, користуючись кривою намагнічування, легко розрахувати точки всіх характеристик ТЕД, за якими можна виконати відповідну побудову.

В цій роботі необхідно розрахувати точки електро-механічних (швидкісних) характеристик ТЕД для значень струмів із таблиці 2.2. Також для побудови тягової характеристики електровоза необхідно визначити  $F_k$  – силу тяги електровоза, яка розраховується відповідно до числа його двигунів. Тобто

$$F_k = F_{k \partial K}, \quad (2.17)$$

де  $k$  – кількість ТЕД на електровозі.

Результати розрахунків заносять до таблиці, виконаної за формою таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати розрахунків

Номери точок	1	2	3	4	5
$I_{я}, А$					
$\Phi, Вб$					
$n_0, об/хв$					
$V, км/год$					
$F_{к0}, кН$					
$F_k, кН$					

За даними таблиці на міліметровому папері побудувати:

- 1 Криву намагнічування –  $\Phi(I_3)$ ;
- 2 Швидкісну характеристику двигуна –  $V(I_{я})$ ;
- 3 Електротягову характеристику двигуна –  $F_{к0}(I_{я})$ ;
- 4 Тягову характеристику електровоза –  $F_k(V)$ .

### Контрольні запитання

1 Які умови мають бути забезпечені для формування дотичної сили тяги рухомої колісної пари?

2 Як розрахувати величину дотичної сили тяги рухомої колісної пари?

3 Чим створюється обертальний момент ТЕД постійного струму?

4 Чим створюється магнітний потік у ТЕД у від чого залежить його величина?

5 На основі яких фізичних законів і як розрахувати величину моменту на валу ТЕД?

6 Як розрахувати дотичну силу тяги рухомої колісної пари за струмом двигуна?

7 Що таке ЕРС обертання ТЕД і як визначити її величину?

8 Які фактори впливають на частоту обертання якоря ТЕД?

9 Що таке швидкісна характеристика ТЕД, віднесена до обода колеса?

10 Що таке тягова характеристика електровоза і як її розрахувати?

### Список літератури

1 Плакс А.В., Привалов В.В. Введение в теорию движения поезда и принципы управления электроподвижным составом. – М.: ВЗИИТ, 1981.

2 Электрические железные дороги: Учебн. для вузов ж.-д. трансп./ В.А.Кисляков, А.В.Плакс, В.Н.Пупынин и др.; Под ред. А.В.Плакса и В.Н.Пупынина. – М.: Транспорт, 1993.

3 Сидоров Н.И., Сидорова Н.Н. Как устроен и работает электровоз. – М.: Транспорт, 1988.

4 Розенфельд В.Е. и др. Теория электрической тяги. – М.: Транспорт, 1983.

5 Электрические железные дороги. Задание на контрольную работу №1 с методическими указаниями для студ. I курса спец. "Электрификация ж.д. трансп.". – М.: ВЗИИТ, 1985.

6 Электрические железные дороги. Задание на контрольную работу №2 с методическими указаниями для студ. I курса спец. "Электрификация ж.д. трансп.". – М.: ВЗИИТ, 1985.