

**МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра автоматизованих систем електричного транспорту**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до виконання контрольної роботи 2  
з дисципліни**

***«ЗАЛІЗНИЦІ ТА МЕТРОПОЛІТЕНИ»***

**Харків – 2015**

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри автоматизованих систем електричного транспорту 6 жовтня 2014 р., протокол № 3.

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

Укладачі:

доц. О.І. Семененко,  
асист. Ю.О. Семененко

Рецензент

доц. А.Ф. Агулов

## ЗАВДАННЯ НА КОНТРОЛЬНУ РОБОТУ

Перед виконанням контрольної роботи необхідно ознайомитись з будовою та принципом дії тягових електродвигунів (ТЕД) постійного струму, основами теорії електричної тяги [1 – 3]. В контрольній роботі належить виконати аналіз роботи системи керування восьмивісним вантажним електровозом постійного струму при розгоні поїзда.

Задачею аналізу є вивчення принципів керування роботою ТЕД постійного струму послідовного збудження і технічна реалізація цих принципів на електровозах. Номінальну потужність та інші параметри ТЕД електровоза при виконанні роботи слід вибрати за двома останніми цифрами навчального шифру (залікової книжки або студентського квитка).

Остання цифра навчального шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номінальна потужність на валу ТЕД $P_{\text{дн}}, \text{кВт}$	790	775	748	730	715	705	688	670	805	842
Передостання цифра навчального шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номінальна частота обертів вала двигуна $n_{\text{дн}}, \text{об/хв}$	840	912	770	850	738	680	702	880	640	820
Конструктивна стала ТЕД для розрахунку електрорушійної сили за частотою обертів $C_n$	14,3	15,2	17,8	19,4	12,7	16,5	20,3	19,7	16,2	17,1
Передаточне число зубчатої передачі $\mu$	4,18	4,55	3,83	4,22	3,64	3,37	3,49	4,40	3,18	4,09

### Вихідні дані, загальні для всіх варіантів:

$U_{\text{дн}} = 1500 \text{ В}$  – номінальна напруга живлення ТЕД;

$\eta_{\text{дн}} = 0,94$  – номінальний коефіцієнт корисної дії (ККД) ТЕД;

$\eta_F = 0,942$  – коефіцієнт, який враховує втрати сили тяги в процесі реалізації тягового зусилля;

$U_{км} = 3000$  В – номінальна напруга контактної мережі постійного струму;

$\beta_1 = 0,62$  – коефіцієнт 1-го ступеня регулювання збудження ТЕД;

$\beta_2 = 0,40$  – коефіцієнт 2-го ступеня регулювання збудження ТЕД;

$D_k = 1,25$  м – діаметр коліс колісних пар електровоза.

## **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 вищого навчального закладу та кафедри, тему контрольної роботи, ініціали і прізвище студента, що виконав роботу, та викладача, який буде перевіряти її, дату виконання.

Розрахунки та пояснення виконують на одному боці аркушів паперу, залишаючи інший бік для зауважень перевіряючого та виправлень у разі необхідності. Пояснювальна записка може виконуватись як вручну, так і за допомогою персонального комп'ютера. На першій сторінці роботи вказується номер варіанта і наводяться вихідні дані за варіантом, а також дані, загальні для всіх варіантів.

План послідовності виконання роботи складається студентом після вивчення наведеного пояснення принципів керування роботою ТЕД постійного струму послідовного збудження і технічної реалізації цих принципів на електричному рухомому складі (ЕРС) з реостатно-контакторною системою керування, усвідомлення поставлених нижче задач та рекомендацій. Складання плану (алгоритму) розв'язання допомагає при розрахунках, а особливо при використанні засобів обчислювальної техніки.

У роботі необхідно вказувати найменування розділу і найменування кожної розрахункової операції, далі записують розрахункову формулу у загальному вигляді, після чого через

знак рівняння її чисельний вираз і результат. Докладних пояснень, а особливо переписувань тексту із підручника, робити не слід. У разі потреби дати пояснення до виконаних розрахунків або побудов, сформулювати їх коротко і самостійно. 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 надати для одного значення, а в таблицю записати результати всіх інших розрахунків за цією формулою.

Усі таблиці та рисунки зі схемами і графіками нумерують за наскрізною нумерацією. 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.

## **1 СПОСОБИ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМИ ДВИГУНАМИ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Силове електричне коло будь-якого виду ЕРС складається з ТЕД і електричних апаратів, які необхідні для керування їх роботою. Можна сказати, що в силовому колі реалізуються фізичні принципи керування ЕРС, а тим самим і принципи керування рухом всього поїзда. Мета керування рухом поїзда полягає в реалізації бажаної швидкості його руху.

Проаналізуємо вираз (2.55) із [2] для визначення швидкості руху поїзда:

$$V = \frac{U_{\partial} - I_{я} (r_{\partial} + R')}{C_v \Phi}, \quad (1)$$

де  $U_{\partial}$  – напруга живлення силового кола ТЕД (рисунок 1);  
 $I_{я}$  – струм якірної обмотки (струм двигуна);  
 $r_{\partial}$  – сумарний опір обмоток двигуна;  
 $R'$  – приведений опір пускового реостата;  
 $C_v$  – конструктивна стала ТЕД для визначення електрорушійної сили за швидкістю руху,  $C_v = 5,3 C_n \mu / D_k$ ;  
 $\Phi$  – магнітний потік одного полюса ТЕД.

Вираз (1) лежить в основі теорії керування електровозом, оскільки він зв'язує струм якоря, а отже, і тягове зусилля зі швидкістю руху поїзда. Слід звернути увагу на те, що від струму якоря залежить не лише чисельник виразу, а і його знаменник, оскільки зміна струму якоря приводить до зміни струму збудження, що означає одночасну зміну магнітного потоку.

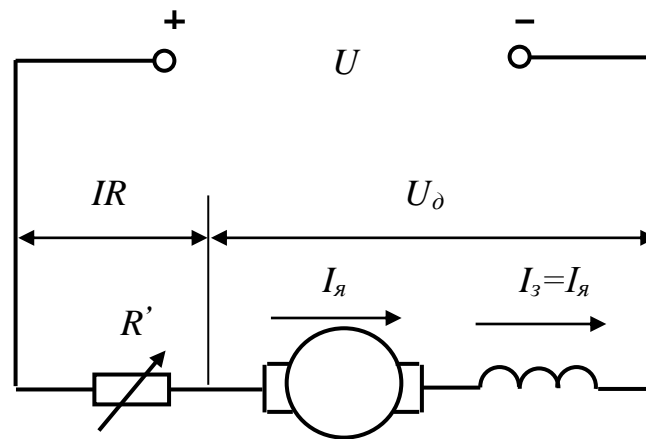


Рисунок 1 – Схема силового кола живлення ТЕД

З аналізу виразу (1) випливає, що для змінювання залежності  $V(I_{\text{я}})$ , яка називається швидкісною характеристикою електровоза, тобто для одержання родини швидкісних характеристик, розташованих у всьому діапазоні швидкостей руху від нульової до максимальної, можна використовувати три способи:

- 1) регулювання напруги живлення силового кола двигуна  $U_{\text{д}}$ ;
- 2) регулювання опору пускового резистора  $R_i$ ;
- 3) регулювання збудження (магнітного потоку  $\Phi$ ) зміною співвідношення між струмом збудження та струмом якоря.

Всі перелічені вище способи реалізовані на ЕРС постійного струму з реостатно-контакторною системою керування. Напругу живлення ТЕД на ЕРС постійного струму змінюють шляхом перемикання кількості послідовно з'єднаних двигунів. У розрахунках використовується поняття напруги контактної мережі, віднесеної до одного двигуна, яка вище названа

напругою живлення силового кола ТЕД,

$$U_{\partial} = \frac{U_{км}}{n},$$

(2)

де  $n$  – кількість послідовно увімкнених двигунів.

Номинальна напруга при живленні від контактної мережі постійного струму на струмоприймачі ЕРС дорівнює 3000 В. З урахуванням того, що ТЕД може надійно працювати при напрузі на колекторі, яка не перевищує 1500 В, для схеми автономної секції електровоза постійного струму з чотирма ТЕД можливі лише два варіанти їх увімкнення:  $n = 4$  та  $n=2$ . Кожній схемі вмикання двигунів відповідає своя швидкісна характеристика  $V(I_{я})$  при напрузі контактної мережі, віднесеної до одного двигуна,  $U_{\partial} = 750$  В та  $U_{\partial} = 1500$  В.

Опір пускового резистора  $R_i$  змінюється ступенями. Кількість характеристик дорівнює кількості ступенів, оскільки кожна характеристика  $V(I_{я})$  розраховується при незмінному опорі пускового резистора  $R_i$  на даній позиції регулювання ( $i$ -позиції контролера). Реостатне регулювання через великі втрати електричної енергії в пусковому резисторі використовується на ЕРС постійного струму тільки в пускових режимах.

Крім перелічених способів, на всіх видах ЕРС застосовується регулювання збудження. Під збудженням двигуна розуміється процес створення магнітного потоку, який виникає при протіканні струму обмоткою збудження. Слід звернути увагу на те, що магнітний потік безпосередньо залежить лише від струму збудження. Цей спосіб регулювання базується на зміні співвідношення між струмом якоря та струмом збудження.

При повному збудженні (рисунок 1) струм якоря є одночасно і струмом збудження  $I_{я} = I_{з}$ . Якщо необхідно регулюванням збудження одержати характеристику  $V(I_{я})$ , яка відповідає більшим швидкостям руху, то в силовому колі двигуна вносяться зміни. Найбільшого поширення одержав спосіб шунтування обмоток збудження ТЕД (рисунок 2), коли

паралельно обмотці збудження вмикається резистор  $R_{ш}$ , опір якого може регулюватися (на рисунку 2 це позначено стрілкою).

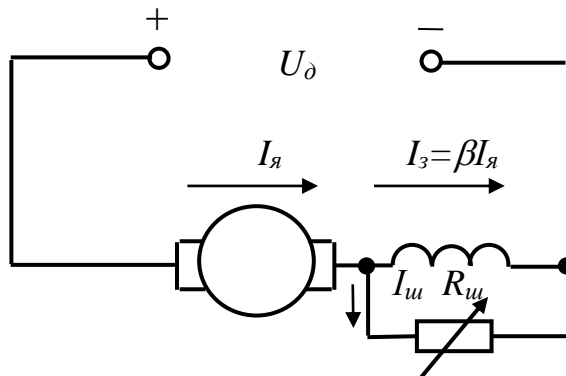


Рисунок 2 – Схема силового кола ТЕД при регулюванні збудження

Струм  $I_я$  після якірної обмотки розгалужується на два напрямки: частина струму  $I_з$  протікає в обмотці збудження, а частина відгалужується в шунтувальне коло  $I_ш$ . За першим законом Кірхгофа

$$I_я = I_з + I_ш.$$

Відношення струму збудження до струму якоря прийнято називати коефіцієнтом регулювання збудження:

$$\beta = \frac{I_з}{I_я}, \quad \text{звідси} \quad I_з = \beta I_я. \quad (3)$$

При шунтуванні обмоток збудження струм збудження зменшується відносно струму якоря, тому такий спосіб регулювання збудження називають послабленням збудження. Коефіцієнт регулювання збудження називають ще коефіцієнтом послаблення збудження.

Величина  $\beta$  залежить від співвідношення опорів обмотки збудження  $r_з$  та шунтувального резистора  $R_{ш}$ . За законом Ома  $I_з r_з = I_ш R_{ш}$ , а струм шунтувального кола  $I_ш = I_я - I_з$ . Таким чином,



$$I_3 r_3 = (I_a - I_3) R_u.$$

Підставляючи співвідношення (3) в попередню умову, після перетворень одержимо:

$$R_u = \frac{\beta \cdot r_3}{1 - \beta}, \quad (4)$$

$$\beta = \frac{R_u}{r_3 + R_u}. \quad (5)$$

При ступеневому зменшенні  $R_u$  одержимо ступеневе зменшення  $\beta$ . При  $\beta = 1$  будемо мати повне збудження, а на різних ступенях регулювання, коли  $\beta < 1$ , одержимо для  $\beta_1$  – перший,  $\beta_2$  – другий і т. д. ступені послаблення збудження.

Підводячи підсумок розглянутим положенням, слід зазначити, що керування роботою ТЕД у тяговому режимі досягається через регулювання параметрів:  $U_d$ ,  $R_i$ , та  $\beta$ . Параметром прийнято називати величину, що характеризує будь-яку основну властивість процесу, в даному випадку – залежність швидкості від струму якоря. Можна сказати, що зміна будь-якого з перелічених параметрів впливає на положення швидкісної характеристики в системі координат  $I_a$  та  $V$ .

## **2 СХЕМА СИЛОВОГО КОЛА ЕЛЕКТРОВОЗА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Схемою силового кола електровоза називають графічне зображення електричного кола ввімкнення ТЕД, електричних апаратів та електрообладнання, необхідних для керування роботою двигунів. Усі пристрої, що входять до схеми рисунка 3, зображують умовними графічними позначками за стандартом. На схемі не показані контакти реверсора, якими змінюється напрямок струму в обмотках збудження ТЕД для зміни напрямку руху. Не показані апарати захисту від аварійних режимів, а

також зроблені інші спрощення, які не заважають розумінню основних процесів, що відбуваються в силовому колі електровоза постійного струму.

Всі зміни, що відбуваються в силовому колі живлення ТЕД у процесі керування, здійснюються апаратами, які називають контакторами. На електровозах застосовується непряме керування, при якому апарати силового кола високої напруги мають електричний або пневматичний привод, керування ними здійснює машиніст дистанційно за допомогою електричних кіл низької напруги (50...110 В) за допомогою так званого "контролера машиніста".

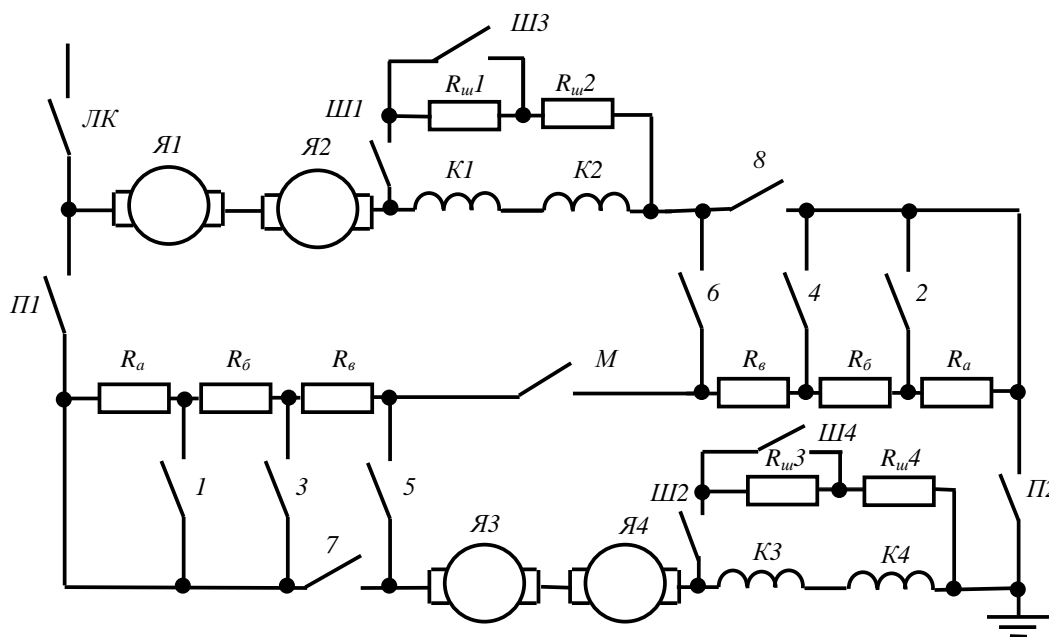


Рисунок 3 – Спрощена схема вмикання чотирьох ТЕД автономної секції восьмивісного електровоза постійного струму

Послідовність змін у схемі відображає таблиця замикання контакторів (таблиця 1). Кожен фіксований стан схеми називають позицією (рядок у таблиці). В кожному рядку вказують номери замкнених контакторів та значення регульованих параметрів.

Пусковий резистор з контакторами для перемикання його секцій (контактори 1 – 8) називають пусковим реостатом. Силова схема (рисунок 3) забезпечує ступеневе регулювання опору пускового реостата і перемикання двигунів з послідовного на послідовно-паралельне з'єднання, яке прийнято називати

паралельним. Така назва пояснюється тим, що перемикаються групи ТЕД, по два послідовно з'єднаних двигуна в кожній, а групи з'єднуються паралельно. У схемі передбачено два ступеня регулювання збудження ТЕД шунтуванням обмоток головних полюсів (два ступеня послаблення збудження).

Таблиця 1 – Таблиця замикання контакторів

№ поз.	Контактори																Регул. параметр		
	ЛК	М	П1	П2	1	2	3	4	5	6	7	8	Ш1	Ш2	Ш3	Ш4	$U_{\delta}$	$R_i$	$\beta$
1	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-			
2	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-			
3	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-			
4	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-			
5	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-			
6	+	+	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-			
7	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-			
8	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-			
9	+	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-			
10	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-			
11	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-			
12	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-			
13	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			

## 2.1 Розрахунок опору секцій пускового реостата і шунтувальних резисторів

Попередньо розрахункове значення повного опору пускового реостата можна визначити за умовою рушання при струмі в силовому контурі, який дорівнює номінальному струмові двигуна  $I_{ян}$ ,

$$R_p = \frac{U_{км}}{I_{ян}} - 4r_{\delta}. \quad (6)$$

Але до цього спочатку визначають величину номінального струму двигуна (за номінальною потужністю і напругою з урахуванням ККД двигуна) та опір обмоток ТЕД  $r_{\delta}$ . Відомо, що для двигуна постійного струму при  $\eta_{\delta n} = 0,94$  орієнтовно падіння

напруги в номінальному режимі [4]

$$I_{ян}r_{\partial} = 0,04U_{\partial н},$$

звідки й можна розрахувати опір обмоток ТЕД. Опір реостата, визначений за формулою (6), розподіляють між секціями згідно з такими співвідношеннями:

$$R_a = 0,18R_p; \quad R_b = 0,17R_p; \quad R_c = 0,15R_p.$$

Опір шунтувальних резисторів розраховують із умови (4) при  $\beta_1=0,62$  та  $\beta_2=0,40$  і  $r_3 = 0,3r_{\partial}$  за формулами:

$$R_{u2} = R_{u4} = \frac{\beta_2 \cdot 2r_3}{1 - \beta_2}, \quad (7)$$

$$R_{u1} = R_{u3}, \quad R_{u1} + R_{u2} = \frac{\beta_1 \cdot 2r_3}{1 - \beta_1}. \quad (8)$$

## 2.2 Таблиця замикання контакторів

Як видно з таблиці замикання контакторів (таблиця 1), пуск електровоза починається після вмикання лінійного контактора ЛК при повністю ввімкнутому пусковому реостаті (див. позицію 1 у таблиці 1), коли його опір  $R_l = 2(R_a + R_b + R_c)$ .

Після початку руху машиніст переводить рукоятку контролера в позицію 2, в результаті чого буде закорочена секція  $R_a$  пускового реостата (див. таблицю 1 і рисунок 3) і сумарний опір ввімкнених секцій реостата зменшиться на величину опору цієї секції. По мірі збільшення швидкості руху машиніст здійснює переведення рукоятки на наступні позиції контролера, чим далі зменшує опір пускового реостата.

На позиції 7 усі секції закорочені, тобто опір реостата дорівнює нулю. Ця позиція називається ходовою, оскільки вся енергія, що споживається силовою ланкою електровоза, йде на тягу поїзда. Час роботи на цій позиції не обмежується. Однак тривала робота відбувається лише за особливих умов, коли необхідно рухатись при знижених швидкостях.

Після переходу на позицію 8 вмикаються контактори П1 та П2, причому реостат на короткий проміжок часу вмикається паралельно тяговим двигунам. Далі розмикаються контакти контактора М і дві пари ТЕД з послідовно ввімкнутими групами секцій ( $R_a + R_b + R_c$ ) кожна стають ввімкненими у дві паралельні гілки на повну напругу контактної мережі. Відбувається зростання напруги живлення, віднесеної до одного двигуна, з 750 В до 1500 В. При переході на наступні позиції опір реостата знову зменшується до нуля, що досягається на 11-й позиції. Ця позиція – ходова при паралельному з'єднанні двох груп двигунів.

На позиціях 12 і 13 регулюється збудження ТЕД. На позиції 12 реалізується перший ступінь послаблення збудження при  $\beta_1 = 0,62$ , а на позиції 13 – другий при  $\beta_2 = 0,40$ . Після виходу схеми на позицію 13 подальший розгін поїзда відбувається при роботі на 13-й характеристиці і буде залежати від зовнішніх умов, а саме від співвідношення сили тяги електровоза та суми сил опору рухові поїзда.

### **3 РОДИНА ШВИДКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОВОЗА. ТЯГОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОВОЗА. ПУСКОВА ДІАГРАМА**

Кожному стану силового кола (позиції), який характеризується визначеним набором регульованих параметрів ( $U_d, R_i, \beta$ ), відповідає своя швидкісна характеристика  $V(I_a)$ . В контрольній роботі треба розрахувати та побудувати швидкісні характеристики для всіх ступенів регулювання.

#### **3.1 Побудова кривої намагнічування**

Для того щоб розрахувати швидкісні характеристики, необхідно знати залежність магнітного потоку від струму збудження. Графік цієї залежності називають кривою намагнічування. В даній роботі задається приблизний вид кривої намагнічування, виражений у відносних до номінальних значеннях струму  $I_{zn}$  та магнітного потоку  $\Phi_n$  (таблиця 2).

Таблиця 2 – Крива намагнічування у відносних одиницях

$I_z / I_{zn}$	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
$\Phi / \Phi_n$	0,502	0,759	0,900	1,000	1,059	1,112

За номінальне значення струму збудження приймають величину номінального струму двигуна, визначену раніше,  $I_{zn} = I_{ян}$ . Номінальний магнітний потік можна знайти із рівняння електричного стану двигуна для номінального режиму:

$$U_{\text{дн}} = C_n \Phi_n n_{\text{дн}} + I_{ян} r_{\text{д}}. \quad (9)$$

Далі за формою таблиці 2 складається таблиця з перерахованими через відносні абсолютними значеннями струму та магнітного потоку і будується крива намагнічування.

### 3.2 Розрахунок та побудова швидкісних та тягових характеристик електровоза постійного струму при реостатному регулюванні (позиції 1 – 11)

Розрахунок координат точок швидкісних і тягових характеристик виконують за формою таблиці 3. В таблицю записують значення струмів двигуна та магнітного потоку з таблиці координат кривої намагнічування (таблиця 2). Розрахунок сили тяги двигуна виконують за формулою

$$F_{\text{кд}j} = C_F \Phi_j I_{яj} \eta_F, \quad (10)$$

де  $C_F = 19,1 C_n \mu / D_k$  – конструктивна стала для визначення сили тяги одного двигуна;

$j$  – порядковий номер значення струму.

Сила тяги електровоза  $F_k$  визначається перемноженням сили тяги одного двигуна на кількість двигунів електровоза ( $K=8$ ):

$$F_k = F_{\text{кд}} K. \quad (11)$$

Таблиця 3 – Розрахунок швидкісних характеристик електровоза постійного струму при реостатному регулюванні

Струм двигуна $I_{я}$ , А							
Магнітний потік $\Phi$ , Вб							
Сила тяги електровоза $F_k$ , кН							
Позиція	Напруга $U_{\delta}$ , В	Швидкість руху поїзда $V$ , км/год					
1	750						
2	750						
3	750						
4	750						
5	750						
6	750						
7	750						
8	1500						
9	1500						
10	1500						
11	1500						

Порядкові номери позицій та напруг живлення мають відповідати таблиці замикання контакторів (таблиця 1). Розрахунок швидкості руху виконати за формулою швидкісної характеристики, км/год,

$$V_{ij} = \frac{U_{\delta} - I_{яj} (r_{\delta} + R_i')}{C_v \Phi_j}, \quad (12)$$

де  $i$  – порядковий номер позиції.

$R_i'$  – опір пускового резистора на  $i$ -позиції, приведений до одного двигуна  $R_i' = R_i / n$ , де  $n$  – кількість послідовно

з'єднаних ТЕД.

За даними таблиці 3 можна побудувати родину швидкісних характеристик  $V(I_{я})$  (позиції 1 – 11), а також тягові характеристики  $F_{к}(V)$  для безреостатних позицій (зразок на рисунку 4).



### 3.3 Розрахунок та побудова швидкісних і тягових характеристик електровоза при регулюванні збудження (позиції 12 і 13)

Розрахунок координат точок характеристик виконати за формою таблиці 4. В таблицю записати всі струми двигуна з таблиці 2, починаючи зі струму  $0,5I_{ян}$ .

Розрахувати струм в обмотках збудження ТЕД при ввімкнутих контакторах Ш1 та Ш2 (див. рисунок 3) для кожного значення струму двигуна за формулою (3) при  $\beta_1 = 0,62$  (позиція 12). Аналогічний розрахунок виконати при другому ступені регулювання послаблення збудження  $\beta_2$ , коли на позиції 13 замкнені контактори Ш3, Ш4.

З графіка  $\Phi(I_3)$  визначити значення  $\Phi$  для розрахованих струмів збудження і записати їх у відповідні рядки таблиці 4. Розрахунок сили тяги електровоза виконати за формулами (10) і (11).

Таблиця 4 – Розрахунок швидкісних та тягових характеристик електровоза при регулюванні збудження ТЕД

Позиція	Струм двигуна $I_я$ , А					
12 ( $\beta_1=0,62$ )	Струм збудження $I_3$ , А					
	Магнітний потік $\Phi$ , Вб					
	Сила тяги електровоза $F_k$ , кН					
	Швидкість руху поїзда $V$ , км/год					
	Струм збудження $I_3$ , А					
	Магнітний потік $\Phi$ , Вб					

13 ( $\beta_2=0,40$ )	Сила тяги електровоза $F_k$ , кН					
	Швидкість руху поїзда $V$ , км/год					

Тут треба врахувати, що з магнітним потоком у двигуні взаємодіє струм в обмотці якоря (струм двигуна), тому саме його значення треба підставити у формулу (10) для розрахунку сили тяги двигуна  $F_{kd}$ .

Для розрахунку швидкості руху треба скористатися рівнянням швидкісної характеристики (12). В останньому розрахунку можна знехтувати незначною зміною опору  $r_d$  при шунтуванні обмоток збудження ТЕД. За даними таблиці 4 треба побудувати швидкісні характеристики  $V(I_a)$  (позиції 12 – 13), а також тягові характеристики  $F_k(V)$  для цих позицій (рисунок 4).

### 3.4 Побудова пускової діаграми електровоза постійного струму

Пусковою діаграмою називають графічне зображення струму ТЕД і швидкості в процесі розгону електровоза. Цю діаграму на родині швидкісних характеристик  $V(I_a)$  необхідно показати лінією іншого кольору. При побудові пускової діаграми необхідно враховувати, що робоча область характеристик обмежена максимальним допустимим струмом, який дорівнює  $1,75I_{ан}$ , та конструктивною швидкістю руху електровоза – 110 км/год.

Розглянемо, як відбувається розгін електровоза з поїздом. При рушанні ( $V = 0$ ), коли всі ТЕД з'єднані послідовно і ввімкнута повний опір пускового реостата, струм визначається лише напругою контактної мережі та опором силової ланки. Якщо сила тяги електровоза більша за сили опору рухові поїзда, то почнеться збільшення швидкості та протиелектрорушійної сили двигуна.

З розгляду рівняння електричної рівноваги випливає, що збільшення протиелектрорушійної сили супроводжується зменшенням струму. Однак не можна забувати про те, що

зменшення струму у свою чергу викликає зменшення напруги на пусковому резисторі.

За рахунок впливу обох розглянутих факторів швидкісні характеристики при більших значеннях  $R_i$  ідуть круто, тобто із збільшенням швидкості струм змінюється мало. Поки опір пускового реостата  $R_i$  та напруга живлення  $U_d$  не будуть змінені, ТЕД будуть працювати за першою характеристикою, прискорення поїзда буде малим, розгін затягнеться. Тривала робота з увімкненим пусковим реостатом не допускається. Тому після початку руху треба зменшити опір реостата, тобто перейти на другу характеристику. При зменшенні опору реостата зростає струм двигунів і збільшується струм електровоза.

Як правило, машиніст розганяє поїзд до найбільш можливої швидкості, а тому затримується на другій характеристиці тільки до переходу на наступну, третю характеристику і т. д., поки не добереться до тринадцятої характеристики. При переході з сьомої на восьму характеристику змінюється схема з'єднань ТЕД з послідовного на паралельне з'єднання. Всі переходи в процесі розгону треба показати зигзагоподібною ламаною лінією, яку прийнято називати пусковою діаграмою (рисунок 4). Після виходу на характеристику позиції 13 швидкість руху встановлюється відповідно силам опору рухові.

Кожен перехід з позиції на позицію є результатом замикання певних контактів силового кола. Замикання реостатного контактора призводить до зменшення опору електричного кола двигунів і викликає зростання (кидок) струму  $I_a$  і відповідно сили тяги  $F_k$ . Зростання струму відбувається за короткий проміжок часу, протягом якого швидкість руху поїзда не встигає змінитися. Тому на пусковій діаграмі зростання струму при переході треба показувати при незмінній швидкості. Однак із збільшенням сили тяги зростає прискорення, поїзд продовжує рухатись прискорено і швидкість руху при роботі на фіксованій позиції зростає за черговою характеристикою до моменту зміни в силовому колі і переходу до наступної характеристики.

Після початку руху машиніст витримує рукоятку контролера на кожній позиції до тих пір, поки струм не

знизиться до певного вибраного машиністом значення. Струм, при якому відбувається перехід на наступну позицію, називається струмом переключення  $I_{пер}$ . При виконанні контрольної роботи струм переключення приймається таким, що дорівнює номінальному струму ТЕД.

Побудована для прийнятого пускового струму пускова діаграма відрізняється від діаграми реального електровоза. Відмінність обумовлена тим, що для зменшення обчислювальної роботи, яку виконують студенти, на силовій схемі (рисунок 3) суттєво зменшено кількість секцій пускового реостата, а отже, і кількість розрахункових позицій регулювання (швидкісних характеристик). За рахунок цього кидки струму при переході з позиції на позицію вийшли значними і різними для послідовного та паралельного з'єднання ТЕД; при паралельну з'єднанні кількість позицій регулювання у два рази менша, ніж при послідовному.

Цілком очевидно, що зі збільшенням кількості швидкісних характеристик кидки струму та сили тяги зменшуються. На реальних електровозах кількість позицій та характеристик при ступеневому регулюванні більше сорока, чим досягається більш плавне регулювання, сприятливе для роботи ТЕД і реалізації сили тяги.

## **ПЕРЕЛІК ЗАВДАНЬ ПРИ ВИКОНАННІ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ**

- 1 Розрахувати опір секцій пускового реостата.
- 2 Розрахувати опір шунтувальних резисторів.
- 3 Надати рисунок схеми силового кола електровоза, накресленого з додержанням прийнятих позначень. Значення опору кожної секції та шунтувальних резисторів записати над прямокутниками, що позначають резистори в схемі (рисунок 3).
- 4 Надати таблицю замикання контакторів. Записати в колонки  $U_0$ ,  $R_i$ ,  $\beta$  таблиці значення напруги, приведеної до одного ТЕД, В, опору пускового реостата, Ом, та коефіцієнта послаблення поля на кожній позиції. Для визначення опору

пускового реостата потрібно скласти опори секцій, ввімкнутих на кожній позиції. На позиціях 8, 9 і 10 записати опір секцій реостата в одній гілці.

5 Розрахувати і заповнити таблиці за формою таблиць 3 і 4.

6 Зобразити родину швидкісних характеристик з 1-ї до 13-ї позиції і тягові характеристики на безреостатних позиціях на аркуші формату А3 міліметрового паперу розміром 297 x 420. Струм відкласти по осі абсцис вправо, швидкість – по осі ординат, силу тяги електровоза – по осі абсцис вліво.

7 Побудувати пускову діаграму електровоза і показати на графіку струм перемикавання  $I_{пер}$ .

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1 У чому полягає головна задача керування рухом поїзда?

2 Які параметри регулюють у процесі керування рухом поїзда в силовій ланці електровоза постійного струму?

3 Як змінюється тягова характеристика електровоза при збільшенні або зменшенні напруги живлення ТЕД?

4 Як змінюється тягова характеристика електровоза при вмиканні резистора в електричне коло ТЕД, і який вплив на характеристику надає опір резистора?

5 Що називають збудженням ТЕД, і як змінюється тягова характеристика електровоза при різних значеннях коефіцієнта регулювання збудження?

6 Як можна пояснити, що при заданому, наприклад, номінальному струмі при переході на послаблене збудження зменшується розрахункова сила тяги, а збільшується розрахункова швидкість?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Розенфельд, В.Е. Теория электрической тяги [Текст] / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1995. – 294 с.

2 Электрические железные дороги [Текст]: 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. – 280 с.

3 Электрические железные дороги [Текст]: учебник / под ред. проф. В.П. Феоктистова, проф. Ю.Е. Просвинова; Моск. ун-т путей сообщения; Самарская гос. акад. путей сообщения. – Самара: СамГАПС, 2006. – 312 с.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до виконання контрольної роботи 2  
з дисципліни  
*«ЗАЛІЗНИЦІ ТА МЕТРОПОЛІТЕНИ»*

Відповідальний за випуск Семененко О.І.

Редактор Буранова Н.В.

---

Підписано до друку 16. 02. 15 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,0. Тираж 150. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.