



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Кафедра «Електрорухомий склад залізниць»

До друку
Перший проректор _____ Б. Є. БОДНАР
" ____ " _____ 2013

ЕЛЕКТРОРУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ

Методичні вказівки
до виконання контрольного завдання

«Визначення ступенів пускового реостата та розрахунок швидкісних
реостатних характеристик тягового двигуна»

Укладачі: Ю.Б. Напара
С.Л. Марікуца

*Для студентів I курсу усіх форм навчання
спеціальності 7.05070203 «Електричний
транспорт»*

Дніпропетровськ – 2013

УДК 629.423:621.3.024(078)

Укладачі:

Напара Юрій Борисович
Марікуца Сергій Леонідович

Рецензенти:

професор кафедри електропривода
канд. техн. наук, доц. *М. М. Казачковський*
(Національний гірничий університет)
канд. техн. наук, ас. *С. В. Артуль* (ДІПТ)

Електрорухомий склад залізниць [Текст] : методичні вказівки до виконання контрольного завдання. Визначення ступенів пускового реостата та розрахунок швидкісних реостатних характеристик тягового двигуна / уклад. : Ю. Б. Напара, С. Л. Марікуца ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2013. – 15 с.

В методичних вказівках з дисципліни "Електрорухомий склад залізниць" наводиться порядок виконання контрольного завдання по визначенню необхідного опору пускового реостата, кількості ступенів та величини опору кожної ступені. Дано приклад розрахунку реостатних характеристик двигуна

Приведено завдання на роботу, методику розрахунків, а також необхідні інформаційні матеріали.

Іл. 2. Табл. 8. Бібліогр.: 2 назв.

© Напара Ю. Б. та ін., укладання, 2013

© Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, редагування, оригінал-макет, 2013

ВСТУП

Метою роботи є знайомство зі структурою силового кола електрорухомого складу (ЕРС) з двигунами постійного струму, графічним методом визначення кількості ступенів пускового реостата та значень їх опору, а також аналітичним методом розрахунку швидкісних реостатних характеристик двигуна.

Призначення реостатного пуску – підтримання в процесі розгону необхідних пускового струму та сили тяги до виходу ЕРС на ходову швидкісну характеристику.

Вихідні дані для виконання контрольного завдання включають 120 варіантів. Методичні вказівки мають приклади, для пояснення методики розрахунків та побудови необхідних графіків.

Пояснювальну записку до контрольного завдання необхідно оформляти на стандартних листах формату А4. Графіки та графічні побудови виконувати на міліметровому папері.

1 ВИХІДНІ ДАНІ

1.1 Загальні вихідні дані:

- а) напруга джерела живлення..... $U_{\text{дз}} = 1500 \text{ В}$;
- б) номінальна напруга двигуна..... $U_{\text{д}} = 1500 \text{ В}$;
- в) опір обмоток двигуна..... $R_{\text{д}} = 0,1 \text{ Ом}$;
- г) кількість тягових електричних двигунів (ТЕД)..... 1.

1.2 Індивідуальні вихідні дані:

- а) номінальний струм двигуна $I_{\text{д}}$ обрати згідно таблиці 1.1;
- б) коефіцієнт нерівномірності пуску за струмом $\hat{E}_{\text{п}}$ обрати згідно таблиці 1.2;
- в) тип тягового двигуна обрати згідно таблиці 1.3.

Таблиця 1.1

Вибір номінального струму двигуна

Перша цифра суми трьох останніх цифр учбового шифру	Величина номінального струму $I_{\text{д}}$, А
1, 2	600
3, 4	550
5, 6	500
7, 8	450
9	400

Примітка. Числові значення номінального струму ТЕД задано довільно, тому вони можуть бути відмінними від дійсних значень струмів для двигунів наведених в [1].

Таблиця 1.2

Визначення коефіцієнту $\hat{E}_{\text{п}}$

Остання цифра суми двох останніх цифр учбового шифру	Коефіцієнт нерівномірності пуску за струмом, $\hat{E}_{\text{п}}$
0, 1, 2	0,10
3, 4, 5	0,11
6, 7	0,12
8, 9	0,13

Таблиця 1.3

Вибір типу тягового двигуна

Остання цифра учбового шифру	Тип двигуна
0	ЕД 141У
1	НБ-407
2, 3	НБ-418К

4, 5	НБ-412К
6, 7	ДТК-820
8, 9	ТЛ-2К

1.3 Приклад вибору індивідуальних вихідних даних для учбового шифру 02-ЕМ-123.

Номинальний струм двигуна $I_1 = 500 \text{ A}$ (тому що $1+2+3=6$, див. табл. 1.1);

Коефіцієнт нерівномірності пуску за струмом $\hat{E}_{I_2} = 0,11$ ($2+3=5$, див. табл. 1.2);

Тип тягового двигуна НБ-418К (оскільки остання цифра шифру 3, див. табл. 1.3).

2 ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОГО ЗАВДАННЯ

Загальні вихідні дані обрано відповідно пункту 1.1.

Індивідуальні дані для прикладу розрахунку взято відмінними від даних таблиць 1.1, 1.2, 1.3.

- а) напруга джерела живлення..... $U_{\text{АЕ}} = 1500 \text{ В};$
- б) номінальна напруга двигуна..... $U_{\text{І}} = 1500 \text{ В};$
- в) опір обмоток двигуна..... $R_{\text{АА}} = 0,1 \text{ Ом};$
- г) номінальний струм двигуна..... $I_{\text{І}} = 650 \text{ А};$
- д) коефіцієнт нерівномірності пуску за струмом..... $\hat{E}_{\text{І}2} = 0,14.$

2.1 Природна швидкісна характеристика

Природна швидкісна характеристика – це залежність швидкості від струму двигуна $v_{\text{ІД}} = f(I)$ при номінальній нарузі живлення, відсутності додаткових опорів (пускових реостатів) в колі двигуна та повному магнітному полі [2].

Знаючи тип двигуна, студенту за таблицею 2.1 необхідно обрати числові значення координат природної швидкісної характеристики та занести їх до таблиці 2.2. Для прикладу розрахунку координати обрано відмінними від значень наведених в таблиці 2.1, їх занесено до таблиці 2.2.

Таблиця 2.1

Координати природних швидкісних характеристик ТЕД

ЕД 141У		НБ-407		НБ-418К6		НБ-412К		ДТК-820		ТЛ-2К	
$I, \text{ А}$	$v_{\text{ІД}}, \text{ км/год}$	$I, \text{ А}$	$v_{\text{ІД}}, \text{ км/год}$	$I, \text{ А}$	$v_{\text{ІД}}, \text{ км/год}$	$I, \text{ А}$	$v_{\text{ІД}}, \text{ км/год}$	$I, \text{ А}$	$v_{\text{ІД}}, \text{ км/год}$	$I, \text{ А}$	$v_{\text{ІД}}, \text{ км/год}$
200	89	200	86,4	300	96,5	200	86,8	300	89,1	150	87,5
300	70,4	300	69,7	350	85,5	250	76,6	375	77	200	70,6
400	57,8	400	61,2	400	78,2	300	69,3	450	68,1	300	58,0
500	53,1	450	57,2	450	72,5	400	59,8	525	61,4	400	52,2
550	51,6	500	54,3	500	68,5	500	53,0	600	57,3	470	49,1
600	50,4	600	50,3	600	62,4	600	48,0	675	54,2	600	45,4
700	48,8	700	47,1	700	57,8	700	44,6	750	51,9	700	43,6
800	47,4	800	44	800	54,1	800	41,1	825	50,5	800	41,8
900	46	900	41	900	51,4	900	39,2	900	49,3	900	40,4

Таблиця 2.2

Координати характеристики $v_{\text{ІД}} = f(I)$

$I, \text{ А}$	325	400	487,5	575	650	725	812,5	900	975
$v_{\text{ІД}}, \text{ км/год}$	65,8	60,0	55,5	52,4	50,4	48,8	47,3	46,1	45,3

Примітка. В подальшому ці координати будуть використовуватися для

побудови природної швидкісної характеристики.

2.2 Розрахунок величини максимального пускового струму виконуємо за формулою

$$I_{\dot{i} \max} = 1,5^2 \dot{i}, \quad (1)$$

де \dot{i} – номінальний струм двигуна, А

$$I_{\dot{i} \max} = 1,5 \cdot 650 = 975 \text{ А.}$$

2.3 Розрахунок величини мінімального пускового струму виконуємо за формулою

$$I_{\dot{i} \min} = \dot{i}_{\max} \frac{1 - K_{HI}}{1 + K_{HI}}, \quad (2)$$

де K_{HI} – коефіцієнт нерівномірності пуску за струмом ($\hat{E}_{\dot{i} 2} = 0,14$).

$$I_{\dot{i} \min} = 975 \cdot \frac{1 - 0,14}{1 + 0,14} = 736 \text{ А.}$$

Для пуску та регулювання швидкості колекторного тягового двигуна електровозів постійного струму звичайно застосовується ступеневий резисторний пуск. На першій позиції в коло двигуна включається пусковий реостат повністю. По мірі розгону поїзда частина резисторів пускового реостата виводиться з кола двигуна за допомогою контакторів. При цьому відбувається поступове підвищення напруги та електрорушійної сили двигуна, пусковий струм змінюється від \dot{i}_{\max} до \dot{i}_{\min} . Межа коливання пускового струму визначається коефіцієнтом нерівномірності пуску за струмом.

2.4 Розрахунок опорів пускових резисторів при максимальному та мінімальному пускових струмах

Визначення опору пускового реостата при максимальному пусковому струмі виконуємо за формулою

$$R_{\dot{i}} = \frac{U_{\dot{A}E} - E}{\dot{i}_{\max}} - R_{\dot{A}\dot{A}} = \frac{U_{\dot{A}E} - \tilde{N}\hat{O}v}{\dot{i}_{\max}} - R_{\dot{A}\dot{A}}, \quad (3)$$

де \dot{A} – електрорушійна сила, В;

\tilde{N} – постійна, залежить від параметрів двигуна;

\hat{O} – магнітний потік, Вб;

v – швидкість, км/год.

В початковий момент пуску $v = 0$, $\tilde{N}\hat{O}v = 0$

$$R_{\dot{I}} = \frac{1500 - 0}{975} - 0,1 = 1,44 \hat{I} \text{ .}$$

Визначення опору пускового реостата при мінімальному пусковому струмі виконуємо за формулою

$$R'_{\dot{I}} = \frac{U_{\ddot{A}E} - E}{I_{\min}^2} - R_{\ddot{A}\hat{A}} = \frac{U_{\ddot{A}E} - \tilde{N}\hat{O}v}{I_{\min}^2} - R_{\ddot{A}\hat{A}}, \quad (4)$$

При $v = 0, \tilde{N}\hat{O}v = 0$

$$R'_{\dot{I}} = \frac{1500 - 0}{736} - 0,1 = 1,94 \hat{I} \text{ .}$$

2.5 Побудова пускової діаграми

Масштаби для побудови пускової діаграми на листі формату А4 наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Масштаби для побудови пускової діаграми

Параметр	Значення, см	
Швидкість, км/год	5	1
Струм, А	50 або 100	1
Опір, Ом	0,2	1

Примітка. Масштаб 1 см – 50 А обирати при значеннях номінального струму 400 і 450 А, а 1 см – 100 А при 500, 550 та 600 А.

Визначившись з масштабами на міліметровому папері зображуємо вісі координат (рис. 2.1). У правому квадранті будуємо природну швидкісну характеристику $v_{\dot{I}D} = f(I)$, використовуючи дані таблиці 2.2. У цьому ж квадранті проводимо дві вертикалі (від осі струмів), які відповідають значенням I_{\max}^2 та I_{\min}^2 . З точок перетину цих прямих з природною характеристикою (точки a, b) проводимо горизонталі до перетину з віссю ординат (вісь швидкості). Отримані точки позначаємо літерами a' та b' .

В лівому квадранті на вісі абсцис відкладаємо значення опорів $R_{\dot{I}}$ та $R'_{\dot{I}}$. Далі з'єднуємо прямими відрізками точки a' з $R_{\dot{I}}$ та b' з $R'_{\dot{I}}$.

Наступним етапом буде побудова ступенів. Із точки $R_{\dot{I}}$ проводимо вертикаль до перетину з прямою $b'R'_{\dot{I}}$ (точка v'). З цієї точки проводимо горизонталь до точки z' . Далі вертикаль $z'd'$ і т. д.

Горизонтальні лінії кожного ступеня дозволяють визначити в масштабі величину опору пускового реостата для даної ступені. Вертикальні лінії дозволяють визначити зміну швидкості для кожного ступеня при струмі I_{\min}^2 .

На основі побудови ступенів підраховується кількість реостатних швидкісних характеристик, тобто позицій контролера мишиніста. Окрім цього визначається опір пускового реостата на кожній позиції та опори секцій цього реостата, які потрібно вивести з кола двигуна, щоб перейти на наступну позицію. Виведення пускового реостата з кола двигуна здійснюється шляхом закорочування секцій реостата за допомогою електропневматичних контакторів. Кількість контакторів дорівнює кількості ступенів. Для нашого прикладу, величини вищезазначених опорів занесено до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Значення опорів пускового реостата

Номер позиції	Величина опору пускового реостата на кожній позиції $R_{\dot{I} k}$, Ом	Опір секції, яка виводиться з кола двигуна при переході на наступну позицію ΔR_k , Ом
1	1,44	0,40
2	1,04	0,32
3	0,72	0,25
4	0,47	0,20
5	0,27	0,16
6	0,11	0,11
7	0	–

Примітка. $\Delta R_1 = R_{\dot{I} 1} - R_{\dot{I} 2}$, $\Delta R_2 = R_{\dot{I} 2} - R_{\dot{I} 3}$ і т.д.

В момент пуску в силове коло двигуна необхідно включити пусковий реостат опором $R_{\dot{I} 1} = 1,44 \hat{I} \hat{i}$ (див. табл. 2.4), оскільки пуск двигуна починається при максимальному пусковому струмі $^2_{\dot{I} \max}$, коли швидкість $v = 0$ і, як наслідок, електрорушійна сила $E = 0$. Оскільки струм протікає через якір та обмотку збудження, то виникає магнітний потік Φ , який приводить до виникнення моменту $\hat{I} = C\hat{O}^2_{\dot{I} \max}$. Починається прискорення двигуна. Із збільшенням швидкості двигуна пусковий струм буде зменшуватися за рахунок появи та зростання електрорушійної сили. В точці v' маємо швидкість v_1 . При даній швидкості струм в колі двигуна буде рівним $^2_{\dot{I} \min}$ (дивись перетин продовження лінії $v'z'$ з вертикаллю від $^2_{\dot{I} \min}$ в точці 4). А оскільки, пуск і розгін двигуна повинен відбуватися при струмах від $^2_{\dot{I} \max}$ до $^2_{\dot{I} \min}$, то для подальшого збільшення швидкості необхідно перейти на другу позицію шляхом вимкнення частини пускового реостата ΔR_1 , рівного в масштабі довжині відрізка $v'z'$. При цьому у колі двигуна залишається частина пускового реостата, величиною $R_{\dot{I} 2} = 1,04 \hat{I} \hat{i}$. Аналогічно приведеному вище відбувається перехід з другої на третю позицію (при швидкості v_2), шляхом виведення секції пускового резистора ΔR_2 (відрізок $d'e'$). При цьому в силовому колі залишається пусковий

резистор величиною $R_{\dot{I}3} = 0,72 \hat{I} \dot{I}$ і т. д. Розгін відбувається до повного виведення пускового реостата та виходу на природну швидкісну характеристику.

2.6 Розрахунок реостатних характеристик

Реостатна швидкісна характеристика – це залежність швидкості від струму двигуна $v = f(I)$ при постійному значенні напруги живлення та наявності в колі двигуна певної величини опору.

Кількість реостатних швидкісних характеристик визначається кількістю ступенів (див. рис. 2.1). Відповідно для нашого прикладу маємо шість ступенів, а отже шість реостатних характеристик. Для побудови кожної характеристики будемо розраховувати по п'ять точок. Координати кожної точки будуть визначатись за двома параметрами: величиною струму двигуна I та величиною швидкості v при цьому струмі.

Для розрахунку координат реостатної характеристики, необхідно обрати з таблиці 2.1 декілька довільних значень струму та відповідних їм значень швидкості природної характеристики. В нашому прикладі обрано наступні струми $0,5I_1$, $0,75I_1$, I_1 , $I_{1 \min}$, $I_{1 \max}$, величини яких занесено до таблиці 2.5. Відповідні їм величини швидкості природної характеристики $v_{1 \text{Д}}$ визначено з графіка (рисунок 2.1) або таблиці 2.2.

Розрахунок величини швидкості реостатної характеристики виконуємо за формулою

$$v_k = v_{1 \text{Д}} \frac{U_{\dot{A}E} - I^2(R_{\dot{A}\dot{A}} + R_{\dot{I}k})}{U_{\dot{A}E} - I^2 R_{\dot{A}\dot{A}}} \quad (5)$$

де v_k – величина швидкості k -ї реостатної позиції при струмі I та опорі $R_{\dot{I}k}$, км/год;

$v_{1 \text{Д}}$ – значення швидкості природної характеристики, км/год;

$U_{\dot{A}E}$ – напруга джерела живлення, В;

I – струм двигуна, А;

$R_{\dot{A}\dot{A}}$ – опір двигуна, Ом;

$R_{\dot{I}k}$ – опір пускового реостата, Ом.

Примітка. Індекс k відповідає номеру позиції.

Величина швидкості $v_{1 \text{Д}}$ у формулі (5) при $I_1 = 325 \text{ А}$ буде однаковою для усіх реостатних характеристик, при $I_2 = 487,5 \text{ А}$ ця величина буде іншою, але однаковою для усіх характеристик, і т.д.

Величину опору пускового реостата при підстановці в формулу (5) необхідно обрати за таблицею 2.4 (друга колонка). Ця величина буде різною для різних позицій, але однією і тією ж для усіх точок даної позиції.

Для кращого розуміння методики розрахунку реостатних швидкісних

характеристик нижче наведено приклад розрахунків для першої та другої реостатних позицій.

Розрахунок значень швидкості для першої реостатної позиції

$$v_1^I = 65,8 \cdot \frac{1500 - 325 \cdot (0,1 + 1,44)}{1500 - 325 \cdot 0,1} = 44,8 \text{ км/год},$$

Примітка. Нижній індекс v_1^I відповідає номеру позиції, верхній – номеру точки, для якої виконується розрахунок.

$$v_1^{II} = 55,5 \cdot \frac{1500 - 487,5 \cdot (0,1 + 1,44)}{1500 - 487,5 \cdot 0,1} = 28,7 \text{ км/год}, \text{ і т. д.}$$

Для другої реостатної позиції

$$v_2^I = 65,8 \cdot \frac{1500 - 325 \cdot (0,1 + 1,04)}{1500 - 325 \cdot 0,1} = 50,6 \text{ км/год},$$

$$v_2^{II} = 55,5 \cdot \frac{1500 - 487,5 \cdot (0,1 + 1,04)}{1500 - 487,5 \cdot 0,1} = 36,1 \text{ км/год}, \text{ і т. д.}$$

Результати розрахунку зводимо до таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

Результати розрахунків реостатних характеристик

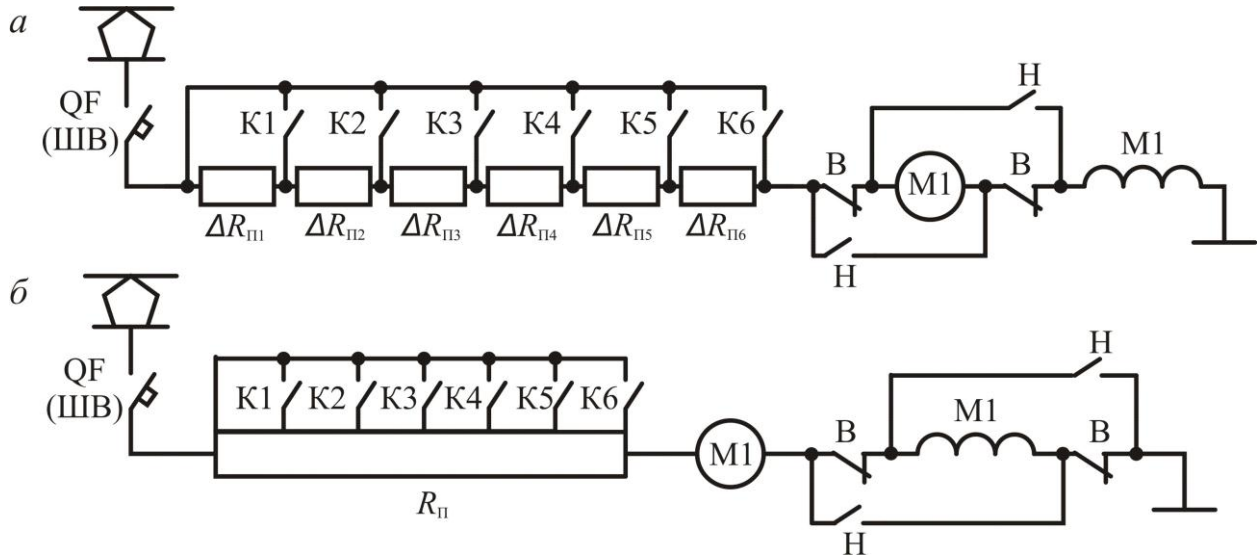
Струм I , А	325	487,5	650	736	935
№ позиції	Швидкість v , км/год				
1	44,8	28,7	17,6	12,6	0
2	50,6	36,1	26,7	22,5	12,6
3	55,3	42,1	33,9	30,5	22,5
4	58,9	46,8	39,7	36,9	30,5
5	61,9	50,5	44,3	41,9	36,9
6	64,2	53,5	48,0	45,9	41,9

Відповідно до даних таблиці 2.5 будуюмо реостатні характеристики $v = f(I)$ (рисунок 2.1), на яких стрілками показуємо зміну струму двигуна при розгоні, в межах від I_{\max} до I_{\min} та від I_{\min} до I_{\max} . Розгін завершується, коли момент двигуна буде рівним статичному моменту опору руху поїзда, а це може бути в будь-якій точці природної характеристики, зліва від точки b .

Довготривала робота на реостатних характеристиках не економічна, тому що це призводить до втрат енергії на активних опорах – $I^2 R_k$.

3 ПРИНЦИПОВА СИЛОВА СХЕМА ВКЛЮЧЕННЯ ДВИГУНА

На рисунку 3.1 зображено спрощені схеми підключення двигуна до джерела живлення (електричної мережі) через пусковий реостат, причому в схемі варіант *a* зображено реверсування (зміну напрямку протікання струму) обмотки якоря, а в схемі *б* – обмотки збудження.



QF(ШВ) – швидкодіючий вимикач;

K1 ... K6 – контакти контакторів;

В, Н – контакти реверсора (В – вперед, Н - назад);

M1 – обмотка якоря та обмотка збудження двигуна.

Примітка. На схемах приведено різні варіанти графічного зображення пускового реостата

Рис. 3.1. Спрощені принципові силові схеми включення двигуна.

Питання для самоперевірки

- 1) Що таке природна швидкісна характеристика?
- 2) Що визначає коефіцієнт нерівномірності пуску за струмом?
- 3) Із збільшенням коефіцієнту нерівномірності пуску за струмом, кількість ступеней збільшуються чи зменшується?
- 4) З якою метою при пуску в коло двигуна необхідно вводити пусковий реостат?
- 5) Як визначити опір пускового реостата для кожної позиції?
- 6) Від чого залежить кількість контакторів, котрими шунтують ступені опорів пускового реостата?
- 7) Яку інформацію можуть дати вертикальні лінії кожної ступені зображеної в лівому квадранті (див. рис. 2.1)?
- 8) Яку інформацію можуть дати горизонтальні лінії кожної ступені?
- 9) Якщо припустити, що пусковий реостат має безкінечно велике число виводів (і контактів), а значить опір можна змінювати неперервно та плавно, який вигляд буде мати зображення в лівому квадранті?
- 10) Яку функцію в силовому колі виконує швидкодіючий вимикач QF(ШВ)?
- 11) Який недолік використання реостатів для регулювання частоти обертання двигуна?
- 12) Приведена схема включення двигуна забезпечує плавне чи ступінчате регулювання?
- 13) Розрахувати величину електрорушійної сили та напруги двигуна на першій пусковій позиції при мінімальному пусковому струмі.
- 14) Які функції в схемі рис. 3.1 виконують контакти В та Н?
- 15) Чому ходовою позицією називається природна характеристика, а не реостатна?

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст] / М.: Транспорт, 1985. 287 с.
2. Тихменев Б. Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог [Текст] : Учебник для вузов ж-д трансп – 4-е изд., перераб. и доп. / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.

Навчальне видання

Напара Юрій Борисович
Марікуца Сергій Леонідович

ЕЛЕКТРОРУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ

Методичні вказівки
для виконання контрольного завдання

«Визначення ступенів пускового реостата та розрахунок швидкісних
реостатних характеристик тягового двигуна»

Редактор *Т. В. Мацкевич*
Комп'ютерна верстка *Т. В. Шевченко*

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 1,04. Обл.-вид. арк. 1,13.
Тираж ____ пр. Зам. № ____.

Видавництво Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності ДК № 1315 від 31.03.2003
Адреса видавництва та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2; Дніпропетровськ, 49010