

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Методичні вказівки  
до виконання курсового проекту

**ЕЛЕКТРИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ**

(для студентів 3-4 курсів усіх форм навчання спеціальності  
7.092202 – „Електричний транспорт”)

Харків – ХНАМГ – 2007

Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Електричне обладнання рухомого складу» (для студентів спеціальності 7.092202 – „Електричний транспорт”. Укл. Карпушин Е.І. Далека В.Х., Андрійченко В.П., Закурдай С.О. – Харків: ХНАМГ, 2007.- 71 с.

Укладачі: Е.І. Карпушин

В.Ф. Далека,

В.П. Андрійченко,

С.О. Закурдай

Рекомендовано кафедрою міського електричного транспорту,  
протокол № 8 від 06 березня 2007 р.

## ЗМІСТ

<b>1. ВИХІДНІ ДАНІ.....</b>	<b>6</b>
<b>2. РОЗРАХУНОК ПУСКОВИХ СТРУМІВ.....</b>	<b>8</b>
<b>3. РОЗРАХУНОК ОПОРІВ СТУПЕНІВ ПУСКОВИХ РЕОСТАТІВ.....</b>	<b>11</b>
<b>4. РОЗРОБКА СХЕМ ПУСКОВИХ РЕОСТАТІВ.....</b>	<b>16</b>
<b>5. РОЗРАХУНОК РЕОСТАТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....</b>	<b>19</b>
<b>6. РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТІВ АПРОКСИМАЦІЇ НАВАНТАЖУВАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....</b>	<b>20</b>
<b>7. РОЗРАХУНОК РЕЖИМУ ОСЛАБЛЕННЯ ПОЛЯ ТЕД.....</b>	<b>23</b>
<b>7.1. Розрахунок кількості ступенів ослаблення поля ТЕД.....</b>	<b>23</b>
<b>7.2. Розрахунок опорів ланцюгу ослаблення поля ТЕД.....</b>	<b>25</b>
<b>8. РОЗРАХУНОК ШВИДКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ОСЛАБЛЕНОМУ ПОЛІ.....</b>	<b>28</b>
<b>9. ПОБУДОВА ПУСКОВОЇ ДІАГРАМИ.....</b>	<b>30</b>
<b>10. РОЗРАХУНОК ГАЛЬМІВНОГО РЕЖИМУ.....</b>	<b>32</b>
<b>10.1. Вибір обмеження у режимі гальмування.....</b>	<b>32</b>
<b>10.2. Розрахунок максимальної гальмівної сили.....</b>	<b>34</b>
<b>10.3. Розрахунок гальмівного опору.....</b>	<b>35</b>
<b>10.4. Розрахунок швидкостей для побудови гальмівних характеристик.....</b>	<b>37</b>
<b>11. ПОБУДОВА ГАЛЬМІВНОЇ ДІАГРАМИ.....</b>	<b>41</b>
<b>12. ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ПУСКОГАЛЬМОВОГО РЕОСТАТА.....</b>	<b>42</b>
<b>12.1. Вибір елементів пускогальмівного реостата для двигунів змішаного збудження.....</b>	<b>42</b>
<b>12.2. Вибір елементів пускогальмівного реостата для двигунів послідовного збудження.....</b>	<b>50</b>

<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	54
<b>ДОДАТОК 1.</b> Завдання на курсовий проект і контрольні роботи з дисципліни „Електричне обладнання рухомого складу” ..	55
<b>ДОДАТОК 2.</b> Технічні дані тягових електричних двигунів рухомого складу міського електротранспорту.....	60
<b>ДОДАТОК 3.</b> Знаходження пускових струмів за електромеханічними характеристиками тягового електродвигуна.....	61
<b>ДОДАТОК 4.</b> Відношення опорів секцій до повного опору пускового реостата за вернійною схемою.....	62
<b>ДОДАТОК 5.</b> Побудова пускової діаграми (для ТЕД із ступінчастим реостатним пуском).....	63
<b>ДОДАТОК 6.</b> Побудова пускової діаграми (для ТЕД з плавним реостатним пуском).....	64
<b>ДОДАТОК 7.</b> Гальмівні характеристики (для ТЕД змішаного збудження).....	65
<b>ДОДАТОК 8.</b> Гальмівні характеристики (для ТЕД послідовного збудження).....	66
<b>ДОДАТОК 9.</b> Побудова гальмівної діаграми (для ТЕД змішаного збудження).....	67
<b>ДОДАТОК 10.</b> Побудова пускової діаграми (для ТЕД послідовного збудження).....	68
<b>ДОДАТОК 11.</b> Технічні характеристики резисторів.....	69

## ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Курсовий проект складається з:

- розрахунку пускогальмівних реостатів і реостатів регулювання струму в обмотках збудження,
- розробки електричних схем,
- опису електричних схем в усіх режимах роботи,
- опису роботи елементів захисту і приладів безпеки.

Зміст курсового проекту наступний:

1. Попередній розрахунок ступенів пускового реостату.
2. Розробка схем реостата.
3. Розрахунок опорів секцій пускового реостата.
4. Вибір кількості ступенів ослаблення поля. Розрахунок опорів.
5. Побудова реостатних характеристик і характеристик ослаблення поля.
6. Розрахунок опорів гальмівного реостата.
7. Розрахунок гальмівних характеристик.
8. Побудова пуско-гальмівної діаграми.
9. Вибір резисторів пускових і гальмівних реостатів, компоновання реостатів.
10. Розробка силової схеми і схеми керування.
11. Інструкція з експлуатації.

Графічна частина:

1. Схема електрична принципова – 1 арк.
2. Схема з'єднань – 1 арк.

## 1. ВИХІДНІ ДАНІ

Розрахунок електрообладнання рухомого складу виконують за наступними вихідними даними:

1. Тип рухомого складу:

- трамвай Т-3,
- тролейбус ЗіУ-9,
- тролейбус ЮМЗ-Т2

2. Тип тягового електродвигуна:

- ТЕ-022Е,
- ДК-210А-3,
- ДК-138А

3. Вага тари  $G_m$ , кН

4. Прискорення  $a$ , м/с<sup>2</sup>

5. Уповільнення  $v$ , м/с<sup>2</sup>

6. Наповнення  $M$ , люд.

Робота тягових двигунів характеризується залежностями частоти обертання якоря  $n$ , обертаючого моменту  $M_d$  і коефіцієнта корисної дії  $\eta_d$  від струму  $I$ , який протікає у ланцюгу обмотки якоря. Ці залежності називають електромеханічними характеристиками. Вони також складають вихідні дані для розрахунків.

У табл. 1.1 наведені електромеханічні характеристики тягових двигунів ТЕ-022Е (трамвайний вагон Т-3), ДК-210А-3 (тролейбус ЗіУ-9), ДК-138А (тролейбус ЮМЗ-Т2).

Таблиця 1.1 – Дані для побудови робочих характеристик

Тяговий електродвигун ТЕ-022Е (трамвайний вагон Т-3)					
$I_{д}, А$	$\alpha=1$		$\alpha=0,50$		$\eta_{д}$
	$V_{нн}, км/г$	$F_{нн}, кН$	$V_{он}, км/г$	$F_{он}, кН$	
50	51,0	0,80	-	0,25	0,85
75	44,0	1,75	90,0	0,80	0,90
100	38,0	2,75	73,5	1,45	0,91
150	31,5	4,75	53,0	2,80	0,90
200	28,0	7,0	45,0	4,65	0,88
250	25,5	9,30	40,0	6,10	0,86
300	23,5	12,0	36,5	7,75	0,85
350	22,0	-	33,0	9,70	0,84
Тяговий електродвигун ДК-210А-3 (тролейбус ЗіУ-9)					
$I_{д}, А$	$I_{ш}=2А, \alpha=1$		$I_{ш}=0,715А, \alpha=0,31$		$\eta_{д}$
	$V_{нн}, км/г$	$F_{нн}, кН$	$V_{он}, км/г$	$F_{он}, кН$	
100	27,0	7,5	60,0	3,0	0,88
200	22,5	16,0	43,5	7,5	0,90
300	19,0	28,0	37,5	15,0	0,87
400	18,0	40,0	32,0	22,0	0,86
450	17,0	-	30,0	27,0	0,85
Тяговий електродвигун ДК-138А (тролейбус ЮМЗ-Т2)					
$I_{д}, А$	$I_{ш}=2А, \alpha=1$		$I_{ш}=0,715А, \alpha=0,31$		$\eta_{д}$
	$V_{нн}, км/г$	$F_{нн}, кН$	$V_{он}, км/г$	$F_{он}, кН$	
100	27,0	8,5	65,0	3,0	0,89
200	23,0	18,0	45,5	9,5	0,91
300	21,0	30,0	39,5	17,0	0,90
400	19,0	42,0	35,0	24,0	0,89
500	18,0	54,0	33,0	30,0	0,87

## 2. РОЗРАХУНОК ПУСКОВИХ СТРУМІВ

Завданням розрахунку є визначення опорів пускових реостатів за позиціями регулювання ТЕД, складання схеми реостатів і знаходження опору резисторів.

Розрахунок опорів пускового реостату за позиціям виконується згідно зі значенням струму першої позиції і середнього пускового струму, який змінюється від  $I_{n \min}$  до  $I_{n \max}$ .

Сила тяги при зрушенні визначається за формулою:

$$F_{\text{поч}} = \frac{[102 \cdot (1 + \gamma) \cdot a_1 + \omega_e(0)] \cdot G_m}{N}, \quad (2.1)$$

де  $a_1$  - пускове прискорення,  $a_1 = 0,4 \text{ м/с}^2$ ;

$(1 + \gamma)$  – коефіцієнт інерції обертаючих мас, приймається:

для двовісних тролейбусів:  $(1 + \gamma) = 1,15$ ;

для чотиривісних трамвайних вагонів:  $(1 + \gamma) = 1,12$ ;

$G_m$  – вага тари рухомого складу, кН

$N$  – кількість двигунів, що встановлено на рухомому складі;

$\omega_e(0)$  – питомий опір руху на еквівалентному перегоні при швидкості, рівній нулю, Н/кн.:

$$\text{для тролейбусів:} \quad \omega_e(0) = 0,9(12 + 0,004 \cdot V^2) + i_e, \quad (2.2)$$

$$\text{для трамвайних вагонів:} \quad \omega_e(0) = 0,9(5 + 0,0031 \cdot V^2) + i_e$$

величина еквівалентного схилу приймається  $i_e = 3 \text{ ‰}$



Виходячи з отриманого значення  $F_{пoc}$  за характеристикою сили тяги при повному полі одержуємо струм першої позиції пуску  $I_1$  (див. додаток 3). При цьому опір пускового реостата, Ом:

$$R_1^* = \frac{U_{\delta\epsilon}}{I_1} - R_{\delta\epsilon}, \quad (2.3)$$

де  $U_{\delta\epsilon}$  – напруга на тяговому електродвигуні, яка залежить від схеми підключення ТЕД і визначається як:  $U_{\delta\epsilon} = \frac{U_c}{m}$ , де  $U_m$  – напруга контактної мережі,  $U_m = 550-600$  В (для тролейбусів і трамвайних вагонів);  $m$  – кількість послідовно підключених двигунів;

$R_{\delta\epsilon}$  – сумарний опір двигуна, Ом:

$$R_{\delta\epsilon} = R_a + R_{zn} + R_{\partial n}, \quad (2.4)$$

де  $R_a$  – опір якоря, Ом;

$R_{zn}$  – опір головних полюсів, Ом;

$R_{\partial n}$  – опір додаткових полюсів, Ом.

Складові частини сумарного опору електродвигуна обираються згідно з визначеним типом рухомого складу (див. додаток 2).

Розрахункова вага рухомого складу визначається за формулою:

$$G_p = G_m + 9,81 \cdot M \cdot 75 \cdot 10^{-3}, \quad (2.5)$$

де  $M$  – наповнення салону;

$75 \cdot 10^{-3}$  – вага одного пасажера, кН.

Середня пускова сила тяги для забезпечення розрахункового прискорення визначається як

$$F_{cep} = \frac{[102 \cdot (1 + \gamma) \cdot a + \omega_e(V)] \cdot G_p}{N}, \quad (2.6)$$

За графіком сили тяги для повного поля (див. додаток 3) знаходимо величину струму  $I_{cep}$ , що забезпечує розрахункове прискорення при розгоні, та перевіряємо її за умовами:

$$\begin{aligned} I_{cep} &< I_{np}, \\ I_{np} &= (1,8...1,9) \cdot I_2, \end{aligned} \quad (2.7)$$

де  $I_{np}$  – припустимий за умовами комутації струм двигуна;

$I_2$  – струм часового режиму, який обирається згідно з визначеним рухомим складом (див. додаток 2).

Знаходимо мінімальне і максимальне значення сили тяги:

$$F_{n.max} = F_{cep} \cdot (1 + K_F), \quad (2.8)$$

$$F_{n.min} = F_{cep} \cdot (1 - K_F). \quad (2.9)$$

де  $K_F$  – коефіцієнт нерівномірності під час пуску, приймаємо  $K_F = 0,12...0,15$ ;

$F_{cep}$  – середня пускова сила тяги, Н.

За цими даними за графіком сили тяги для повного поля (див. додаток 3) знаходимо мінімальне  $I_{n.min}$  й максимальне  $I_{n.max}$  значення пускового струму.

Максимальний пусковий струм не повинен перевищувати припустимий по комутації струм тягового електродвигуна, який приймається рівним  $I_{np} = (1,8...1,9) \cdot I_2$ . Якщо ці умови не виконуються, максимальний струм необхідно зменшити до припустимої величини й скоректувати межі коливання струму, а також уточнити значення пускового прискорення.

### 3. РОЗРАХУНОК ОПОРІВ СТУПЕНІВ ПУСКОВИХ РЕОСТАТІВ

Вихідним рівнянням для розрахунку опорів за позиціями пуску  $R_{ni}$  для двигунів змішаного збудження є:

$$V_i = \frac{U_{\partial\partial} - I_i (R_{ni} + R_{\partial\partial})}{c\Phi_i}, \quad (3.1)$$

де  $I_i$  – діапазон зміни струму для даного рухомого складу,  $A$ ;

$R_{ni}$  – значення пускового опору на відповідній реостатній характеристиці  $\Omega m$ ;

$R_{\partial\partial}$  – сумарний опір двигуна,  $\Omega m$ ;

$c\Phi_i$  – значення намагнічуючої сили для даного розрахункового струму,  $B \cdot c/m$

Вихід на автоматичну характеристику виконується за умовами  $I_n = I_{n \max}$ , при цьому  $R_n = 0$ .

Опір на попередній позиції при струмі  $I_{min}$  визначаємо за формулою:

$$R_{i+1} = \frac{U_{\partial\partial} \left( 1 - \frac{c\Phi_2}{c\Phi_1} \right)}{I_{n \min}} + \frac{c\Phi_2}{c\Phi_1} \cdot \frac{I_{n \max}}{I_{n \min}} (R_i + R_{\partial\partial}) - R_{\partial\partial}, \quad (3.2)$$

де  $c\Phi_{1,2}$  обчислюються за даними швидкісної характеристики повного поля (див. додаток 2),  $B \cdot c/m$ :

$$c\Phi_1 = \frac{U_{\partial\partial} - I_{n \max} \cdot R_{\partial\partial}}{V_{(I_{n \max})}}, \quad (3.3)$$

$$c\Phi_2 = \frac{U_{\partial\partial} - I_{n \min} \cdot R_{\partial\partial}}{V_{(I_{n \min})}}$$

Опір на попередній позиції при струмі  $I_{min}$  визначаємо за спрощеною формулою, *Ом*:

$$R_{i+1} = A + B \cdot R_i, \quad (3.4)$$

де

$$A = \frac{U_{\partial\epsilon} \left( 1 - \frac{c\Phi_2}{c\Phi_1} \right)}{I_{n \min}} + \left( \frac{c\Phi_2 \cdot I_{n \max}}{c\Phi_1 \cdot I_{n \min}} - 1 \right) \cdot R_{\partial\epsilon}, \quad (3.5)$$

$$B = \frac{c\Phi_2 \cdot I_{n \max}}{c\Phi_1 \cdot I_{n \min}}. \quad (3.6)$$

Прийнявши спочатку  $i = 0$ ,  $R_i = 0$ , знайдемо  $R_{i+1} = R_1$ , яке підставимо в праву частину формули  $R_{i+1} = A + B \cdot R_i$ , далі обчислимо  $R_{i+1} = R_2$ , і т.д. Розрахунок припиняємо на кроці  $i + 1 = n$ , для якого:

$$\frac{U_{\partial\epsilon}}{I_{n \min}} - R_{\partial\epsilon} \geq R_n \geq \frac{U_{\partial\epsilon}}{I_{n \max}} - R_{\partial\epsilon}, \quad (3.7)$$

при  $R_i = 0$ :  $R_1 = R_{i+1} = A$ , *Ом*,

Далі розраховуємо:

$$R_2 = A + B \cdot R_1,$$

$$R_3 = A + B \cdot R_2, \quad \text{і т.д.}$$

Початковий струм установленого пуску, який є також кінцевим струмом маневрових ступенів, знаходимо за формулою:

$$I_n = \frac{U_{\partial\epsilon}}{R_n + R_{\partial\epsilon}}, \quad (3.8)$$

Кількість маневрових позицій  $K_1$  визначаємо з умови, що збільшення прискорення при переході з позиції на позицію не повинне перевищувати  $(1,5 - 2,0) \text{ м/с}^2$ :

$$K_1 = \frac{a_{\text{cee}} - a_1 \frac{G_T}{G_p}}{(1,5 \div 2) \cdot \Delta t_{pk}}, \quad (3.9)$$

де  $\Delta t_{pk} = 0,15 \div 0,25 \text{ с}$  – час переходу з позиції на позицію групового реостатного контролера.

Кількість маневрових позицій  $K_1$  повинна бути цілим числом.

Струми маневрових позицій:

$$I_{M_i} = I_1 + (i-1) \frac{I_n - I_1}{K_1}, \quad (3.10)$$

Опір на маневрових позиціях визначаємо за формулою:

$$R_{M_i} = \frac{U_{\text{дв}}}{I_{M_i}} - R_{\text{дв}}, \quad (3.11)$$

Результати розрахунків позицій пуску та величин пускових опорів доцільно звести до таблиці.

Таблиця 3.1 – Розрахункові значення пускових опорів

Позиція	1	2		$n$
Величина пускового опору на відповідній позиції, $\text{Ом}$				

Для трамвайних вагонів, що мають замість реостатного контролера прискорювач, який виконує аналогічні функції, розраховуємо опір прискорювача при середньому пусковому струмі,  $\text{Ом}$ :

$$R_{\text{приск}} = \frac{U_{\text{дв}}}{I_{\text{сеп}}} - R_{\text{дв}} , \quad (3.12)$$

Опір прискорювача при номінальному струмі ТЕД, Ом:

$$R' = \frac{U_{\text{дв}}}{I_2} . \quad (3.13)$$

Опори демпферних резисторів  $R_1$  і  $R_2$ , як і елементи прискорювача, виконують функції обмеження пускового струму тягових електродвигунів і забезпечують плавний пуск, визначаємо за формулами, Ом:

$$R_1 = R_1^* - R_{\text{приск}} . \quad (3.14)$$

$$R_2 = R' - R_{\text{приск}} . \quad (3.15)$$

Далі знаходимо опір одного елемента прискорювача за умовою того, що при перемиканні пальців не буде з'являтися електрична дуга:

$$r_{\text{ел}} = \frac{U_{\text{ел}}}{2 \cdot I_{\text{сеп}}} , \quad (3.16)$$

де  $U_{\text{ел}} = 7B$  – напруга на одному елементі прискорювача.

Кількість елементів прискорювача при пуску визначається, *шт.*:

$$n_n = \frac{R_{\text{приск}}}{r_{\text{ел}}} . \quad (3.17)$$

Кількість елементів прискорювача повинна бути цілим числом.

Розрахунок пускових опорів по позиціям виконуємо наступним чином:

- визначаємо початковий пусковий опір прискорювача:

$$R_{n1} = R_{\text{приск}} + R_1 + R_2 ; \quad (3.18)$$

- визначаємо наступний пусковий опір при виведеному з ланцюга ТЕД демпферного опорі  $R_1$ :

$$R_{n2} = R_{\text{приск}} + R_2 ; \quad (3.19)$$

- визначаємо наступний пусковий опір при виведених з ланцюга ТЕД демпферних опорах  $R_1$  і  $R_2$ :

$$R_{n3} = R_{\text{приск}} ; \quad (3.20)$$

- визначаються пускові опори на 50-й, 30-й та 15й позиціях прискорювача:

$$\begin{aligned} R_{n4} &= 50 \cdot r_{el}, \\ R_{n5} &= 30 \cdot r_{el}, \\ R_{n6} &= 15 \cdot r_{el}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Результати розрахунків позицій пуску і величин пускових опорів зводимо до таблиці.

Таблиця 3.2 – Розрахункові значення пускових опорів

Позиція	$R_{n1}$	$R_{n2}$	$R_{n3}$	$R_{n4}$	$R_{n5}$	$R_{n6}$
Величина пускового опору на відповідній позиції, Ом						

#### 4. РОЗРОБКА СХЕМ ПУСКОВИХ РЕОСТАТІВ

Для рухомого складу, що має реостатний контролер, для виведення опорів з ланцюгу ТЕД необхідно застосовувати верн'єрні схеми.

Розробку верн'єрної схеми починаємо визначення кількості пускових контакторів реостатного контролера:

$$j = \frac{n+3}{2}, \quad (4.1)$$

де  $n$  – кількість позицій контролера при реостатному пуску.

Значення  $j$  повинно бути цілим числом.

Кількість секцій верн'єрної схеми залежить від кількості позицій і може бути визначена за формулою:

$$\text{при непарній кількості позицій:} \quad n_c = \frac{n+1}{2}, \quad (4.2)$$

$$\text{при парній кількості позицій:} \quad n_c = \frac{n}{2} + 1.$$

Величину опору секцій визначаємо шляхом перемноження опору пускового реостата на першій маневровій позиції на відповідний коефіцієнт  $K_{3i}$ . Цей коефіцієнт обираємо згідно з визначеною кількістю позицій реостатного контролера і відповідної секції реостата (див. додаток 4):

$$X_i = R_{.m1} \cdot K_{3i}, \quad (4.3)$$



Далі складаємо верн'єрну схему, схему включення секцій і таблицю замкнення контакторів.

**Приклад.**

При 12 позиціях, опори на яких було розраховано в п.4, верн'єрна схема матиме вигляд:

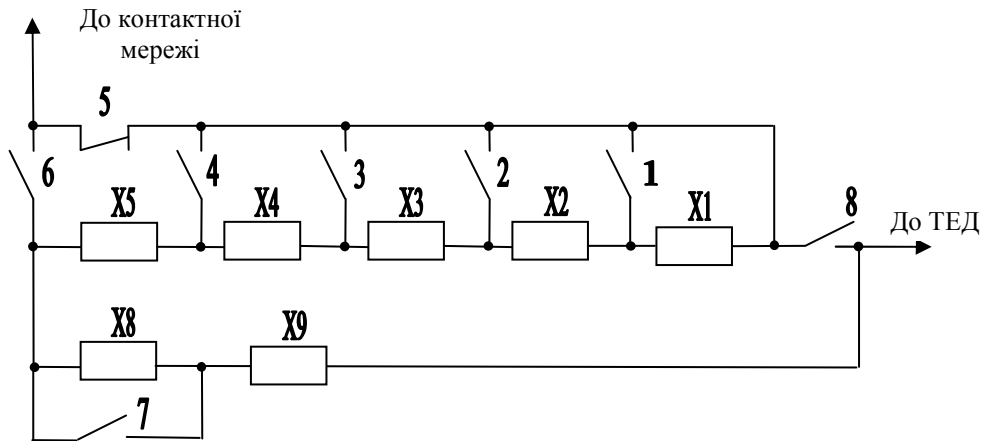


Рис. 4.1 - Верн'єрна схема пускового реостата

Таблиця 4.1 – Порядок включення секцій

Позиції	Включення секцій	Опір по позиціях	
		розрахунковий	фактичний
1	$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_8 + X_9$	4,427	4,66
2	$X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_8 + X_9$	2,997	2,847
3	$X_3 + X_4 + X_5 + X_8 + X_9$	2,237	2,012
4	$X_4 + X_5 + X_8 + X_9$	1,777	1,617
5	$X_5 + X_8 + X_9$	1,4	1,375
6	$X_8 + X_9$	1,1	1,1
7	$\frac{(X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5) \cdot (X_8 + X_9)}{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_8 + X_9}$	0,84	0,84
8	$\frac{(X_2 + X_3 + X_4 + X_5) \cdot (X_8 + X_9)}{X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_8 + X_9}$	0,64	0,647
9	$\frac{(X_3 + X_4 + X_5) \cdot (X_8 + X_9)}{X_3 + X_4 + X_5 + X_8 + X_9}$	0,46	0,5

10	$\frac{(X_4 + X_5) \cdot (X_8 + X_9)}{X_4 + X_5 + X_8 + X_9}$	0,32	0,35
11	$\frac{X_5 \cdot (X_8 + X_9)}{X_5 + X_8 + X_9}$	0,185	0,22
12	$\frac{X_5 \cdot X_9}{X_5 + X_9}$	0,08	0,1

Розрахункові опори по позиціях обираємо з табл. 3.1, фактичні опори по позиціях визначаємо за формулами, що наведені у табл. 4.1. Значення фактичних опорів не повинні відрізнятися від значень розрахункових опорів більше 15%. При необхідності виконуємо коректування верн'єрної схеми.

Таблиця 4.2 – Таблиця замикання контакторів

Позиції реостатного контролера	Контактори							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1					■			
2	■				■			
3	■	■			■			
4		■	■		■			
5			■	■	■			
6				■	■	■		
7						■		■
8	■					■		■
9	■	■				■		■
10		■	■			■		■
11			■	■		■		■
12				■		■	■	■

## 5. РОЗРАХУНОК РЕОСТАТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Розрахунок виконуємо графоаналітичним методом, використовуючи електромеханічні характеристики двигуна.

Швидкість рухомого складу при заданому значенні пускового реостату розраховуємо за допомогою формули:

$$V_i = \frac{U_{\partial\partial} - I_i(R_{ni} + R_{\partial\partial})}{c\Phi_i}, \quad (5.1)$$

де  $I_i$  – діапазон зміни струму для даного рухомого складу,  $A$ ;

$R_{ni}$  – значення пускового опору на відповідній реостатній характеристиці  $\Omega m$ ;

$R_{\partial\partial}$  – сумарний опір двигуна,  $\Omega m$ ;

$c\Phi_i$  – значення намагнічуючої сили для даного розрахункового струму, розраховується за формулою,  $B\delta$ :

$$c\Phi_i = \frac{U_{\partial\partial} - I_i \cdot R_{\partial\partial}}{V_i}, \quad (5.2)$$

де  $V_i$  – швидкість за електромеханічною характеристикою для повного поля (див. додаток 1) згідно з відповідним струмом,  $км/год$ .

Результати розрахунків реостатних характеристик зводимо до таблиці.

Таблиця 5.1 – Розрахунок реостатних характеристик

$I_i, A$	$c\Phi_i, B\delta$	$V_i, км/г$					
		$R_1, \Omega m$	$R_2, \Omega m$	$R_3, \Omega m$	$R_4, \Omega m$	...	$R_n, \Omega m$

За даними розрахунків будемо реостатні характеристики  $V_i=f(I_i)$

## 6. РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТІВ АПРОКСИМАЦІЇ НАВАНТАЖУВАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для тягових двигунів характеристика  $c\Phi_i = f(I)$  не має точного аналітичного виразу, тому за основу нелінійної математичної моделі приймаємо функцію, що легко диференціюється і забезпечує точну апроксимацію:

$$c\Phi_{ij} = \frac{F_{ij}}{a_0 + a_1 \cdot I_i + a_2 \cdot I_i^2 + F_{ij}(b_0 + b_1 \cdot I_i + b_2 \cdot I_i^2)}; \quad (6.1)$$

де  $F$  – намагнічуюча сила головних полюсів, *A·вит.*;

$a$  і  $b$  – коефіцієнти апроксимації, які знаходять за електромеханічними характеристиками. Для цього за двома відомими електромеханічними характеристиками (як правило, для повного і ослабленого поля) знаходимо 6 значень  $c\Phi$  для обраних струмів:

$$I_1 = 100 \text{ A}, \quad I_2 = 200 \text{ A}, \quad I_3 = 300 \text{ A}.$$

Далі знаходимо швидкості за електромеханічними характеристиками для заданих струмів:

$$V_{11} = 38 \text{ км/год}, \quad V_{12} = 28 \text{ км/год}, \quad V_{13} = 23,5 \text{ км/год} - \text{ для повного поля}$$

$$V_{21} = 73,5 \text{ км/год}, \quad V_{22} = 45 \text{ км/год}, \quad V_{23} = 36,5 \text{ км/год} - \text{ для ослабленого поля}$$

Магнітні потоки для даних швидкостей відповідно до обраного струму, знаходимо за формулами, *Вб*:

$$c\Phi_{11} = \frac{U_{\partial\sigma} - I_1 \cdot R_{\partial\sigma}}{V_{11}}, \quad (6.2)$$

$$c\Phi_{12} = \frac{U_{\partial\sigma} - I_2 \cdot R_{\partial\sigma}}{V_{12}}, \quad (6.3)$$

$$c\Phi_{13} = \frac{U_{\partial\sigma} - I_3 \cdot R_{\partial\sigma}}{V_{13}}, \quad (6.4)$$

$$c\Phi_{21} = \frac{U_{\partial\sigma} - I_1 \cdot R_{\partial\sigma}}{V_{21}}, \quad (6.5)$$

$$c\Phi_{22} = \frac{U_{\partial\sigma} - I_2 \cdot R_{\partial\sigma}}{V_{22}}, \quad (6.6)$$

$$c\Phi_{23} = \frac{U_{\text{о\textsubscript{6}}} - I_3 \cdot R_{\text{о\textsubscript{6}}}}{V_{23}} \quad (6.7)$$

Намагнічуючи сили для відповідних струмів знаходимо, *A-вим* :

$$F_{m,on} = I_u \cdot W_u + I_i \cdot W_c \cdot \alpha, \quad (6.8)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт ослаблення поля;

$W_c$  – кількість витків серієсної обмотки (див. додаток 2);

$W_u$  – кількість витків шунтової обмотки (див. додаток 2);

$I_u$  – струм шунтової обмотки (для рухомого складу, що має ТЕД змішаного збудження: для повного поля  $I_u = 2 \text{ A}$ ; для ослабленого поля  $I_u = 0,715 \text{ A}$ ).

За визначеними параметрами знаходимо коефіцієнти апроксимації:

$$A_1 = \frac{F_{11} \cdot c\Phi_{21} - F_{21} \cdot c\Phi_{11}}{c\Phi_{11} \cdot c\Phi_{21} \cdot (F_{11} - F_{21})}, \quad (6.9)$$

$$A_2 = \frac{F_{12} \cdot c\Phi_{22} - F_{22} \cdot c\Phi_{12}}{c\Phi_{12} \cdot c\Phi_{22} \cdot (F_{12} - F_{22})}, \quad (6.10)$$

$$A_3 = \frac{F_{13} \cdot c\Phi_{23} - F_{23} \cdot c\Phi_{13}}{c\Phi_{13} \cdot c\Phi_{23} \cdot (F_{13} - F_{23})}, \quad (6.11)$$

$$B_1 = \frac{F_{11} \cdot F_{21} \cdot (c\Phi_{11} - c\Phi_{21})}{c\Phi_{11} \cdot c\Phi_{21} \cdot (F_{11} - F_{21})}, \quad (6.12)$$

$$B_2 = \frac{F_{12} \cdot F_{22} \cdot (c\Phi_{12} - c\Phi_{22})}{c\Phi_{12} \cdot c\Phi_{22} \cdot (F_{12} - F_{22})}, \quad (6.13)$$

$$B_3 = \frac{F_{13} \cdot F_{23} \cdot (c\Phi_{13} - c\Phi_{23})}{c\Phi_{13} \cdot c\Phi_{23} \cdot (F_{13} - F_{23})}, \quad (6.14)$$

де перший індекс у  $F$ ,  $c\Phi$  означає номер електромеханічної характеристики, а другий співпадає з індексом струму.

У результаті розв'язання системи рівнянь отримується:

$$b_0 = A_1 - b_1 I_1 - b_2 I_1^2, \quad (6.15)$$

$$b_1 = \frac{(A_2 - A_1) - b_2 \cdot (I_2^2 - I_1^2)}{I_2 - I_1}, \quad (6.16)$$

$$b_2 = \frac{A_3 - 2 \cdot A_2 + A_1}{-2I_2^2 + I_3^2 + I_1^2}, \quad (6.17)$$

$$a_0 = B_1 - a_1 I_1 - a_2 I_1^2, \quad (6.18)$$

$$a_1 = \frac{(B_2 - B_1) - a_2 (I_2^2 - I_1^2)}{I_2 - I_1}, \quad (6.19)$$

$$a_2 = \frac{B_3 - 2B_2 + B_1}{-2I_2^2 + I_3^2 + I_1^2}, \quad (6.20)$$

Отримані значення підставляємо до формули (6.1).

Розрахунки порівнюємо зі значеннями  $c\Phi_i$ , розрахованими за формулами (6.2)-(6.7). При відсутності похибки ці значення повинні співпадати.

## 7. РОЗРАХУНОК РЕЖИМУ ОСЛАБЛЕННЯ ПОЛЯ ТЕД

### 7.1. Розрахунок кількості ступенів ослаблення поля ТЕД

Розрахунок мінімального коефіцієнта ослаблення поля виконуємо з урахуванням того, що максимальна межламельна напруга не повинна перевищувати  $35B$ .

$EPC$  міжламельної напруги:

$$[e] = \frac{e_{cp}}{\tau} \cdot \left( 1 + 0,45 \cdot \frac{F_{ря}}{F_{zn}} \right), \quad (7.1)$$

де  $\tau$  – коефіцієнт полюсного покриття,  $\tau = 0,62$ ;

$e_{cp}$  – середня межламельна напруга:  $e_{cp} = \frac{2p \cdot U_{\partial\partial}}{K}$  ;

де  $K$  – кількість колекторних пластин (див. додаток 2);

$p$  – кількість пар полюсів (див. додаток 2);

$F_{ря}$  – намагнічувальна сила реакції якоря,  $A \cdot вит$  :

$$F_{ря} = \frac{N_a \cdot I_{np}}{8 \cdot m \cdot p} ;$$

де  $N_a$  – кількість провідників якірної обмотки (див. додаток 2)

$I_{np}$  – максимальний припустимий струм ТЕД при пуску;

$m$  – кількість пар паралельних віток обмотки якоря (див. додаток 2)

$F_{zn}$  – намагнічуюча сила головних полюсів:

$$F_{zn} = \frac{0,45 \cdot F_{ря}}{\left( \left[ \frac{35 \cdot \tau}{e_{cp}} \right] - 1 \right)} \quad (7.2)$$

Припустимий коефіцієнт ослаблення поля розраховуємо за формулами:

- для двигунів змішаного збудження:

$$[\alpha] = \frac{0,45 \cdot I_{np} \cdot N_a}{8 \cdot m \cdot p \cdot \left( \left[ \frac{35 \cdot \tau}{e_{cp}} \right] - 1 \right) \cdot (I_{np} \cdot W_c + I_{uu} \cdot W_{uu})}, \quad (7.3)$$

де  $I_{uu}$  – струм шунтової обмотки, приймається  $I_{uu} = 2$  А

- для двигунів послідовного збудження:

$$[\alpha] = \frac{0,45 \cdot N_a}{8 \cdot m \cdot p \cdot \left( \left[ \frac{35 \cdot \tau}{e_{cp}} \right] - 1 \right) \cdot W_c} \quad (7.4)$$

де  $\omega_c$  – кількість витків обмотки послідовного збудження та  $\omega_{uu}$  – кількість витків обмотки паралельного збудження обирають за даними, наведеними у таблиці в додатку 2.

Кількість ступенів ослаблення поля  $n_{оп}$  розраховуємо за формулами:

1) розраховуємо коефіцієнт регулювання першої ступені ослаблення поля:

- для двигунів змішаного збудження: 
$$\alpha_1 = \frac{I_{np} W_c}{I_{np} \cdot W_c + I_{uu} \cdot W_{uu}} \quad (7.5)$$

- для двигунів послідовного збудження: 
$$\alpha_1 = \frac{1 - K_{I_{on}}}{1 + K_{I_{on}}} \quad (7.6)$$

де  $K_I$  – коефіцієнт нерівномірності пуску по струму при ослабленні поля,  $K_I = (1,5 \div 1,8) K_F$

2) Послідовно возводячи коефіцієнт регулювання першої ступені ослаблення поля  $\alpha_1$  в квадрат, куб, і т.д., отримуємо ряд  $\alpha_i$ , в якому останнє



значення  $\alpha_n$  буде найбільш близьким до  $[\alpha]$ . Таким чином, визначаємо кількість ступенів ослаблення поля:

$$\alpha_2 = \alpha_1^2; \alpha_3 = \alpha_1^3; \alpha_4 = \alpha_1^4 \quad \text{і т.д. , поки } \alpha_n \leq [\alpha] \quad (7.7)$$

Коефіцієнт регулювання намагнічуючої сили серієсної обмотки визначаємо, враховуючи, що кількість ступенів шунтування послідовної обмотки менше кількості ступенів ослаблення поля на одиницю:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \sqrt[n_{оп1}]{[\alpha]} \\ \beta_2 &= \beta_1^2 \\ \beta_n &= \beta_1^{n_{оп1}} \end{aligned} \quad (7.8)$$

## 7.2. Розрахунок опорів ланцюга ослаблення поля ТЕД

При двигунах послідовного збудження ослаблення поля виконується підключенням паралельно серієсним обмоткам ланцюга, що містить послідовно з'єднані секції, які вмикаються контакторами (див. рис. 7.1).

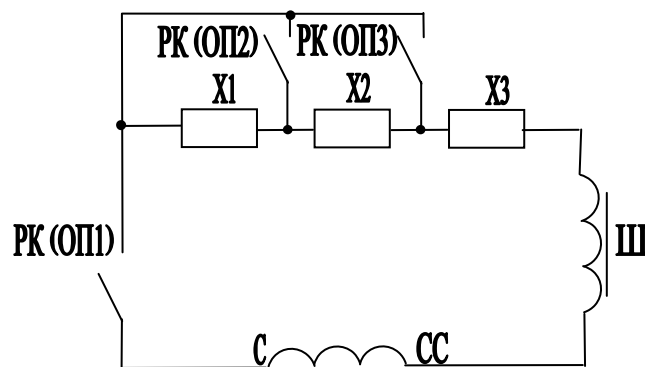


Рис. 7.1 - Схема ослаблення поля серієсного двигуна

Якщо двигуни з'єднані в групи – шунтуються пари послідовно з'єднаних серієсним обмоток. При двосторонньому обертанні контролера замість контактора  $PK(OII)$  передбачається індивідуальний контактор  $KIII$ .

Опори ланцюга, що шунтують серієсну обмотку, по позиціях ослаблення поля розраховуємо за формулою:

$$R_{ci} = m \cdot R_a \cdot \frac{\alpha_i}{1 - \alpha_i}, \quad (7.9)$$

де  $R_a$  – опір серієсної обмотки, Ом;

$m$  – кількість паралельних гілок серієсної обмотки;

$\alpha_i$  – коефіцієнт паралельних гілок серієсної обмотки (згідно з розрахунками).

Значення опорів для шунтування серієсної обмотки знаходимо за допомогою виразу

$$X_i = R_{ci} - R_{ci+1} \quad (7.10)$$

При цьому слід мати на увазі, що опір останньої секції містить у собі опір обмотки індуктивного шунта.

У двигунах змішаного збудження з перевагою н.с. серієсної обмотки (наприклад, ДК-210А, ДК-138А) перша ступень ослаблення поля починається з відключення шунтової обмотки.

Друга і наступні позиції ослаблення поля створюються шунтуванням серієсної обмотки. Опори шунтуючих ланцюгів розраховують за формулою (7.8), в якій  $\alpha_i$  замінюється  $\beta_i$ . Тобто

$$R_{ci} = m \cdot R_a \cdot \frac{\beta_i}{1 - \beta_i}. \quad (7.11)$$

Опори секцій визначають аналогічно двигунам послідовного збудження.

Ланцюг шунтової обмотки рекомендується виконувати наступним чином (див. рис. 7.2):

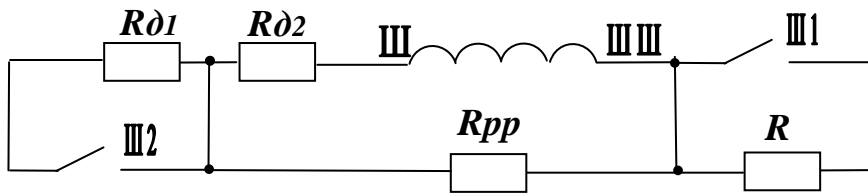


Рис 7.2 - Схема включення шунтової обмотки

Резистор  $R_{pp}$  необхідний для зменшення перенапруги при вимиканні контактора  $III$ :  $R_{pp} = 4 \cdot R_{ш}$ .

$R$  – призначено для полегшення умов дугогасіння при відключенні контактора  $III$ :  $R \geq 1500 \text{ Ом}$  (щоб можна було знехтувати н.с. паралельної обмотки при розмиканні контактора  $III$ );

$R_{\delta 1}$  і  $R_{\delta 2}$  – необхідні для регулювання намагнічуючої сили при русі на повному полі і режимі гальмування. Вони вибираються при умові, що при номінальному струмі по шунтовій обмотці протікатиме  $I_{ном}$ :  $R_{\delta 1} = R_{\delta 2}$  (значення опорів визначають, виходячи із значення струму паралельної обмотки при повному полі й при підгальмуванні).

## 8. РОЗРАХУНОК ШВИДКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ОСЛАБЛЕНОМУ ПОЛІ

Розрахунок виконуємо з урахуванням коефіцієнтів апроксимації навантажувальної характеристики і вибраної кількості ступенів ослаблення поля за допомогою формули

$$V_{ij} = \frac{U_{\partial\partial} - I_i \cdot R_{\partial\partial}''}{c\Phi_{ij}}, \quad (8.1)$$

де  $j$  – індекс позиції ослаблення поля

$R_{\partial\partial}''$  – активний опір ТЕД в режимі ослаблення поля:

$$R_{\partial\partial}'' = R_a + R_{\partial n} + \frac{R_{\partial n} \cdot R_{\partial u}}{R_{\partial n} + R_{\partial u}}. \quad (8.2)$$

Магнітний потік головних полюсів  $c\Phi_{ij}$  розраховуємо за допомогою виразу (6.1). Необхідні для розрахунку  $c\Phi_{ij}$  значення н.с. головних полюсів визначаємо за позиціями ослаблення поля залежно від системи збудження.

Для ТЕД послідовного збудження:

$$F_{ij} = I_i \cdot W_c \cdot \alpha_i, \quad (8.3)$$

Для ТЕД змішаного збудження з перевагою паралельної обмотки:

$$F_{ij} = I_{\partial\partial} \cdot W_{\partial\partial} + I_i \cdot W_c \cdot \alpha_i, \quad (8.4)$$

Для ТЕД змішаного збудження з перевагою послідовної обмотки на першій позиції ослаблення поля:

$$F_{i1} = I_i \cdot W_c, \quad (8.5)$$

Для другої і наступних позицій:

$$F_{ij} = I_i \cdot \beta_i \cdot \omega_c. \quad (8.6)$$

Розрахунок виконуємо за допомогою табл. 8.1

Таблиця 8.1 – Дані для розрахунку характеристик режиму ослаблення поля

$I_i, A$	$\alpha_1(\beta_1)$		$\alpha_2(\beta_2)$		...		$\alpha_n(\beta_n)$	
	$c\Phi_{ij}, Bб$	$V, км/г$	$c\Phi_{ij}, Bб$	$V, км/г$	$c\Phi_{ij}, Bб$	$V, км/г$	$c\Phi_{ij}, Bб$	$V, км/г$

За даними таблиці виконуємо побудову швидкісних характеристик на ослабленому полі.

## 9. ПОБУДОВА ПУСКОВОЇ ДІАГРАМИ

Пускова діаграма являє собою сімейство характеристик при пуску для усіх позицій реостатного контролера (прискорювача) з побудовою діаграми зміни струму.

За даними розрахунків, що зведені до табл. 5.1 і 8.1, будують реостатні характеристики  $V_i=f(I)$ . Побудова пускової діаграми заснована на визначенні прирощування швидкостей за позиціями контролера.

Час повороту вала реостатного контролера з позиції на позицію  $\Delta t_{pk}$  приймається 0,12...0,25 с.

Для початкового струму першої позиції  $I_1$  за характеристикою сили тяги для повного поля (див. додаток 3) визначаємо  $F_1$ , розраховуємо прискорення  $a_1$  і прирощування швидкості  $\Delta V_i$ .

Значення прискорення на відповідній характеристиці знаходимо по формулі,  $m/c^2$ :

$$a_i = \frac{N \cdot F_i - \omega_0 \cdot G_p}{102 \cdot (1 + \gamma) \cdot G_p}, \quad (9.1)$$

де  $N$  – кількість двигунів на рухомому складі;

$F_i$  – сила тяги, що визначається для струму відповідної позиції за характеристикою  $F=f(I)$

Приріст швидкості визначаємо,  $км/г$  :

$$\Delta V_i = a_i \cdot \Delta t_{pk} \cdot 3,6 \quad (9.2)$$

Значення приріст швидкості  $\Delta V_i$  відкладаємо на реостатних характеристиках (див. Додатки 5,6).

Розрахунок приросту швидкості виконуємо поки струм не почне перевищувати струм спрацювання реле прискорення  $I_{спр.}$ , який визначаємо за формулою

$$I_{спр} = \frac{I_{уст}}{K_g}, \quad (9.3)$$

де  $I_{уст}$  – струм уставки реле, приймається  $I_{уст} = I_{min}$

$K_g$  – коефіцієнт звороту реле, приймається  $K_g = 0,85 \dots 0,92$

Якщо стрибок струмудорівнюватиме або буде більше  $I_{спр}$ , вважаємо, що контролер загальмовується. Відпадання реле прискорення відбувається при струмі уставки  $I_{уст}$ , і контролер знову почне обертатися. При цьому витримки часу на позиціях визначають прийнятим методом регулювання і власним часом переключення реостатного контролера на одну позицію.

При розрахунках час від включення ланцюгу керування приводом контролера до виведення чергової секції пускового реостата приймається  $(0,5 \dots 0,8) \Delta t_{рк}$ , тоді додатковий приріст швидкості визначається як

$$\Delta V_\partial = a_{min} \cdot (0,5 \dots 0,8) \Delta t_{рк} \cdot 3,6, \quad (9.4)$$

де  $a_{min}$  – прискорення при струмі  $I_{min}$

Коефіцієнт  $0,5 \dots 0,8$  враховує, що час від моменту включення ланцюгу керування приводом реостатного контролера до замкнення силових контакторів контролера менше часу звороту його вала на одну позицію.

Додатковий приріст швидкості  $\Delta V_\partial$  відкладаємо на пусковій діаграмі при  $I_{уст}$  на всіх позиціях, де відбулося спрацювання реле прискорення.

Побудову пускової діаграми в зоні ослаблення поля ТЕД виконуємо з урахуванням перехідних процесів.

У результаті побудови пускової діаграми визначають середні струми по позиціям пуску і час знаходження на цих позиціях, який необхідний для розрахунків ефективних струмів.

## 10. РОЗРАХУНОК ГАЛЬМІВНОГО РЕЖИМУ

### 10.1. Вибір обмеження у режимі гальмування

При розрахунку режимів гальмування, повинні бути внесені обмеження за швидкістю, максимальною напругою та струмом якоря. Криві обмеження реостатного гальмування надані на рис. 10.1.

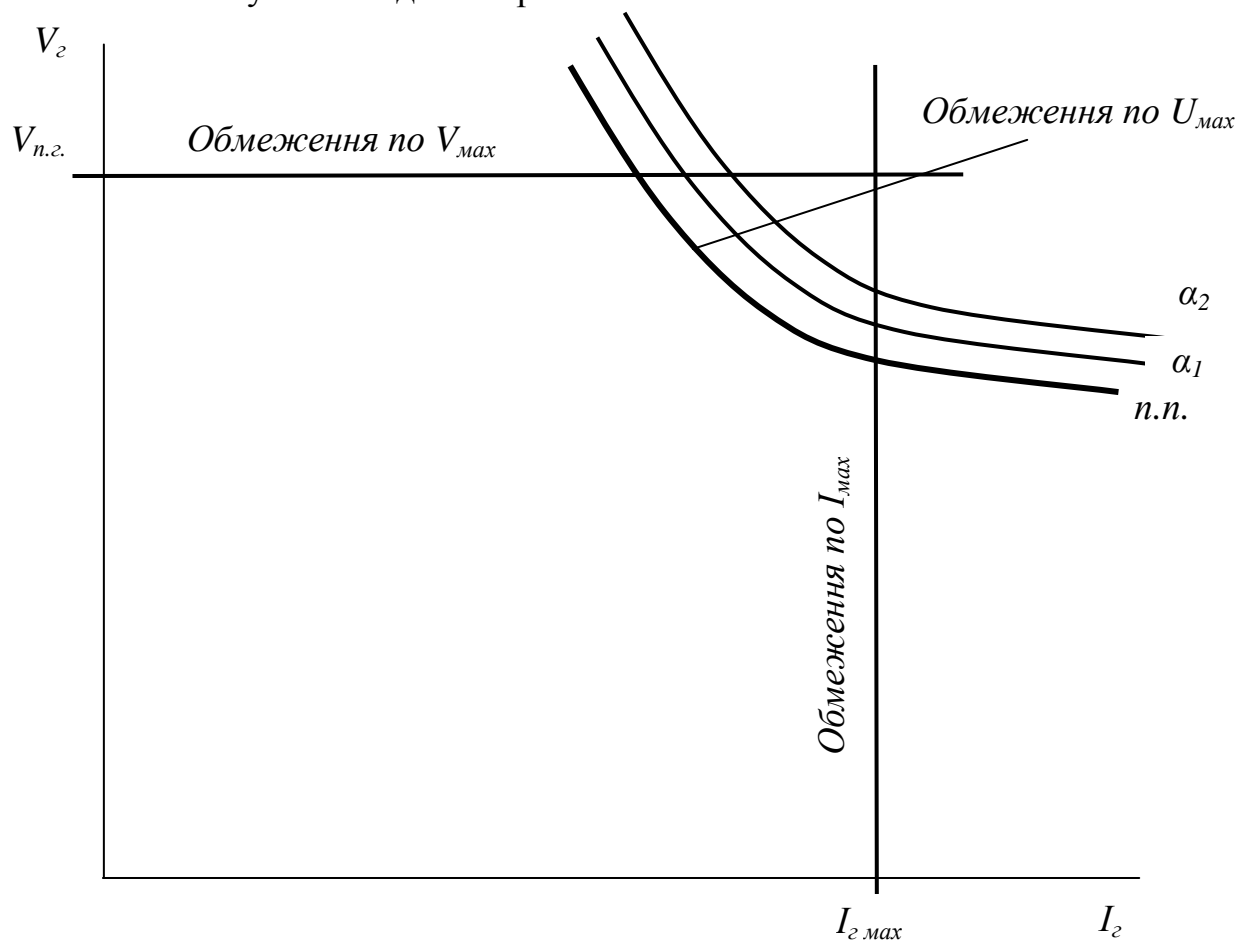


Рис. 10.1- Обмеження реостатного гальмування

Обмеження за швидкістю (максимальна швидкість початку гальмування) для тролейбусів і трамвайних вагонів складає 16,6 м/с.

Обмеження за струмом якоря визначаємо зчепленням коліс з рейками (для трамвайних вагонів) і комутацією тягових двигунів (для тролейбусів). Обмеження за струмом якоря визначаємо комутацією тягових двигунів,



величина  $B_{max}$  не повинна перевищувати межу за зчепленням, а струм  $I_{zmax}$  не повинен перевищувати межу за комутацією:

$$B_{max} \leq 1000 \psi \frac{G_p}{N} \cdot \eta, \quad (10.1)$$

де  $\psi$  – коефіцієнт зчеплення коліс з рейками (дорогою),  $\psi=0,2$ ;

$\eta$  – коефіцієнт використання зчіпної ваги,  $\eta=0,85\dots0,9$

$$I_{zmax} \leq (1,8\dots1,9) \cdot I_{\psi} \quad (10.2)$$

Криву обмеження за швидкістю розраховуємо за формулою, км/г:

$$V_{zmax} = V_i \cdot \frac{U_{max} + I_i \cdot R'_{\partial\partial}}{U_{\partial\partial} - I_i \cdot R'_{\partial\partial}}, \quad (10.3)$$

де:  $I_i$  - діапазон зміни струму, А;

$V_i$  – швидкість у двигунному режимі відповідно до визначених струмів, км/г;

$R_{\partial\partial}$  – сумарний опір двигуна,  $R'_{\partial\partial} = R_a + R_{\partial n} + R_{zn} \cdot \alpha_i$

$U_{max}$  - максимальна напруга в режимі гальмування, В:

$$U_{max} = \frac{[e] \cdot K \cdot \tau}{2p \cdot \left( 1 + \frac{0.45 \cdot N_a}{8 \cdot m \cdot p \cdot W_c \cdot \alpha_i} \right)}, \quad (10.4)$$

Для тролейбусів приймається  $(2\dots2,5)U_{max}$ .

Криву обмеження за напрузі розраховуємо при повному й ослабленому полі.

Результати розрахунку заносимо до табл. 10.1.

Таблиця 10.1 – Дані для побудови обмеження з напругою

$\alpha(\beta)$	$I_b, A$	$V_{zmax}, км/год$	$U_{max}, B$

## 10.2. Розрахунок максимальної гальмівної сили

Розраховуємо максимальну гальмівну силу  $B_{zmax}$ :

$$B_{zmax} = \frac{[102 \cdot (1 + \gamma) \cdot b - \omega_e(V)] \cdot G_p \cdot (1 + k_B)}{N}, \quad (10.5)$$

де  $b$  – розрахункове уповільнення;

$\omega_e(V)$  – питомий опір рухові на еквівалентному перегоні при середній швидкості гальмування  $V_{cp} = 6 \text{ м/с} = 21,6 \text{ км/год}$ ;

$k_B$  – коефіцієнт нерівномірності під час гальмування, приймається

$$k_B = 0,12 \dots 0,15$$

Отриманні значення порівнюють з розрахунковими обмеженнями.

## 10.3. Розрахунок гальмівного опору

Для реостатного гальмування для двигунів змішаного збудження з перевагою намагнічувальної сили послідовної обмотки використовується окремий нерегульований гальмівний опір, який використовують також при початку пуску для зниження моменту ТЕД при виборі люфтів у механічній передачі.

Величину максимального стабілізуючого опору визначаємо за формулою, Ом:

$$R_{cm} = \frac{U_m}{9,55 \cdot B_{zmax} \cdot b_0}, \quad (10.6)$$

де  $U_c$  – напруга контактної мережі.

Максимальний гальмівний струм розраховуємо, А:

$$I_{zmax} = \frac{d - \sqrt{a_0 \cdot R_{ui} \cdot d}}{b_0 \cdot W_{ui} \cdot R_{cm}}, \quad (10.7)$$

де  $d = a_0 \cdot R_{ui} + b_0 \cdot W_{ui} \cdot U_m$ ;

$a_0, b_0$  - коефіцієнти апроксимації.

Отриманні значення порівнюють з розрахунковими обмеженнями.

Сумарний опір гальмівного кола визначається як, Ом:

$$R_{\Sigma} = \frac{C\Phi_{IzMAX} \cdot V_{nz}}{I_{zmax}}, \quad (10.8)$$

де  $V_{nz}$  – швидкість початку гальмування;

$C\Phi_{IzMAX}$  – магнітний потік при гальмуванні при максимальному гальмівному струмі:

$$C\Phi_{IzMAX} = \frac{B_{I_{Tmax}}}{a_0 + b_0 \cdot B_{I_{Tmax}}}, \quad (10.9)$$

де

$$B_{I_{Tmax}} = \frac{U_m - I_{zmax} \cdot R_{cm}}{R_{ui}} \cdot W_{ui}. \quad (10.10)$$

При цьому гальмівний опір дорівнює:

$$R_z = R_{\Sigma} - R_{cm} - (R_a + R_{\delta,n}). \quad (10.11)$$

Розрахунок гальмівного опору прискорювача для двигунів послідовного збудження на початку гальмування визначаємо за формулою:

$$R_z = \frac{C\Phi_z \cdot v_{nz} - I_z \cdot R_{\text{об}}}{I_z}, \quad (10.12)$$

де  $v_{nz}$  – швидкість початку гальмування, км/год (приймається 60 км/год);

$I_z$  – гальмовий струм початку гальмування, А (приймається  $I_{\text{сер}}=275$  А);

$C\Phi_z$  – магнітний потік при гальмуванні, В·г/км.

Магнітний потік при гальмуванні знаходимо за формулою

$$C\Phi_z = \frac{U_{\text{м}} - I_z \cdot R_{\text{об}}}{v_{nz}}. \quad (10.13)$$

Загальну кількість елементів прискорювача знаходимо за формулою

$$n_{\text{ел}} = \frac{R_z}{r_{\text{ел}}}. \quad (10.14)$$

Кількість елементів прискорювача на ослабленому полі визначаємо знаючи, що для пуску потрібно  $n$  елементів прискорювача (згідно з формулою (3.17):

$$n_{\text{ОП}} = n_{\text{ел}} - n_n \quad (10.15)$$

Кількість елементів на кожній позиції ОП визначаємо як

$$n_{\text{ОП}i} = \frac{n_{\text{ОП}}}{K_{\alpha}}. \quad (10.16)$$

Розподіл елементів за ступенями ослаблення поля розраховуємо як

$$\begin{aligned}
n_{\alpha_1} &= n_n + n_{опi} , \\
n_{\alpha_2} &= n_{\alpha_1} + n_{опi} , \\
&\dots
\end{aligned}
\tag{10.17}$$

Гальмові опори по позиціях ослаблення поля визначаються формулою

$$R_z = n_{\alpha_i} \cdot r_{ел} + R'_{\delta\epsilon} , \tag{10.18}$$

де  $R'_{\delta\epsilon}$  – сумарний опір двигуна,  $R'_{\delta\epsilon} = R_a + R_{\delta n} + R_{zn} \cdot \alpha_i$

$n_{\alpha i}$  – кількість елементів на відповідній позиції прискорювача, для розрахунків приймається:  $n_{\alpha i} = n_{\alpha=1}, n_{\alpha i} = n_{\alpha 1}, n_{\alpha i} = n_{\alpha 2}, n_{\alpha i} = \dots, n_{\alpha i} = 50 \text{ ел.}, n_{\alpha i} = 30 \text{ ел.}, n_{\alpha i} = 15 \text{ ел.}, n_{\alpha i} = 0 \text{ ел.}$  (для 50-ї, 30-ї, 15-ї, 0 ел.  $\alpha=1$ )

#### 10.4. Розрахунок швидкостей для побудови гальмівних характеристик

Розрахунок швидкостей для побудови гальмівних характеристик визначаємо за формулами:

- для двигунів змішаного збудження: 
$$V_{zi} = \frac{I_{zi} \cdot R_{\Sigma}}{C\Phi_{2i}} , \tag{10.19}$$

- для двигунів послідовного збудження: 
$$V_{zi} = \frac{I_{zi} \cdot (R_z + R'_{\delta\epsilon})}{C\Phi_{2i}}$$

де  $I_{zi}$  – діапазон зміни струму при гальмуванні для даного рухомого складу,  $A$ ;

$$C\Phi_{2i} = \frac{B_{zi}}{a_0 + b_0 \cdot B_{zi}} , \tag{10.20}$$

де  $B_{zi}$  – діапазон зміни гальмівної сили при відповідному струмі:

- для двигунів змішаного збудження: 
$$B_{z_i} = \frac{U_m - I_{z_i} \cdot R_{cm}}{R_{ui}} \cdot W_{ui},$$
 (10.21)

- для двигунів послідовного збудження: 
$$B_{z_i} = I_{z_i} \cdot W_c \cdot \alpha_i$$

Магнітні й електричні втрати визначають із сумарних витрат у двигуні й редукторі через ККД, Дж:

$$\Sigma P = U_{\text{об}} \cdot I_{z_i} \cdot (1 - \eta),$$
 (10.22)

де  $\eta$  - ККД при повному полі (обирається за вихідними даними).

Магнітні втрати визначають за формулою, Дж

$$P_m = \Sigma P - I_{z_i}^2 \cdot R_{\text{об}},$$
 (10.23)

Наступним етапом розрахунків є побудова гальмівної характеристики  $B=f(I_i)$ . Її будують на основі формули, Н:

$$B = \Delta B + B_{em},$$
 (10.24)

де  $B_{em}$  - електромагнітна сила, Н:

$$B_{em} = C\Phi_{2i} \cdot I_{z_i},$$
 (10.25)

$\Delta B$ -сила гальмування від втрат, Н:

$$\Delta B = \frac{P_m}{V_{\text{об}}},$$
 (10.26)

де  $V_{\text{об}}$  – швидкість у двигунному режимі при  $I=I_z$

Розрахунок доцільно вести у вигляді таблиці.

Таблиця 10.2 – Дані для побудови гальмівних характеристик

$I_i, A$	$C\Phi_{2i}, B \cdot c/m$	$\eta, в.о$	$\Sigma P, Джс$	$P_m, Джс$	$B_{em}, H$	$\Delta B, H$	$B, H$	$V_z, км/год$

За таблицею будемо гальмівні характеристики.

### Розрахунок підгальмування для двигунів змішаного збудження

Гальмування виконується при незмінному опорі в гальмівному контурі, тому забезпечується електродинамічне гальмування до швидкості 15 км/год. За досягненням цієї швидкості водій вводить у дію механічне гальмо.

Розрахунок характеристик підгальмування виконуємо з умови, що струм паралельної обмотки зменшений удвічі за рахунок введення у ланцюг додаткового опору за наступними формулами:

$$B_{nzi} = \frac{U_M - I_{zi} \cdot R_{cm}}{2 \cdot R_{uz}} \cdot W_{uz}; \quad (10.27)$$

$$i_{unz} = \frac{U_M - I_{zi} \cdot R_{cm}}{2 \cdot R_{uz}}; \quad (10.28)$$

$$C\Phi_{2i} = \frac{B_{nzi}}{a_0 + b_0 \cdot B_{nzi}}; \quad (10.29)$$

$$V_{nzi} = \frac{I_{zi} \cdot R_{\Sigma}}{C\Phi_{2i}}; \quad (10.30)$$

$$B_{emi} = C\Phi_{2i} \cdot I_{zi}; \quad (10.31)$$

$$B_i = B_{emi} + \Delta B_i. \quad (10.32)$$

Результати розрахунку зводимо до табл. 10.3

Таблиця 10.3 – Дані для побудови характеристик підгальмування

$I_i, A$	$C\Phi_{2i}, B \cdot c/m$	$\eta, в.о$	$\Sigma P, Джс$	$P_{мм}, Джс$	$B_{em}, H$	$\Delta B, H$	$B, H$	$V_z, км/год$

На підставі отриманих даних будемо характеристики підгальмування.

Гальмівні характеристики наведені у Додатках 7, 8.



## 11. ПОБУДОВА ГАЛЬМІВНОЇ ДІАГРАМИ

Гальмівна діаграма уявляє собою сімейство характеристик при гальмуванні для усіх позицій реостатного контролера (прискорювача) з побудовою діаграми зміни струму.

За даними розрахунків, що зведені до таблиць 10.1, 10.2 і 10.3, будуються реостатні характеристики  $V_i=f(I)$ . Побудова гальмівної діаграми заснована на визначенні прирощування швидкостей по позиціям контролера (прискорювача).

Час повороту вала реостатного контролера (прискорювача) з позиції на позицію  $\Delta t_{pk}$  приймається 0,12...0,25 с.

Значення уповільнення на відповідній характеристиці знаходимо за формулою,  $m/c^2$ :

$$\epsilon_i = \frac{N \cdot B_i - \omega_0 \cdot G_p}{102 \cdot (1 + \gamma) \cdot G_p}, \quad (11.1)$$

де  $N$  – кількість двигунів на рухомому складі;

$B_i$  – сила тяги, що визначається для струму відповідної позиції за характеристикою  $B=f(I)$

Приріст швидкості визначаємо,  $км/г$  як

$$\Delta V_i = \epsilon_i \cdot \Delta t_{pk} \cdot 3,6. \quad (11.2)$$

Значення приросту швидкості  $\Delta V_i$  відкладається на реостатних характеристиках. Гальмування починається зі швидкості 60 км/год.

У результаті гальмівної діаграми визначаються середні струми по позиціях пуску і час знаходження на цих позиціях, який необхідний для розрахунків ефективних струмів (для двигунів змішаного збудження та використанням гальмівного реостата).

Приклад побудови гальмівних діаграм наведено в Додатках 9, 10.

## 12. ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ПУСКОГАЛЬМОВОГО РЕОСТАТА

### 12.1. Вибір елементів пускового (гальмівного) реостата для двигунів змішаного збудження

Для вибору елементів пускового (гальмівного) реостата необхідно знати ефективний струм кожної секції, що визначається за формулою

$$I_{\text{еф}} = \sqrt{\frac{\sum I_{\text{сер}}^2 \cdot \Delta t \cdot N_{\text{ц}}}{3600}}, \quad (12.1)$$

де  $N_{\text{ц}}$  – число циклів пусків і гальмувань за годину. Для трамвая і тролейбуса приймається  $N_{\text{ц}} = 100 \dots 120$ , для вагонів метрополітену  $N_{\text{ц}} = 40 \dots 60$ .

Для визначення  $\sum I_{\text{сер}}^2 \cdot \Delta t$  використовують дані попередніх розрахунків і складають таблицю. Середній струм на позиції  $I_{\text{сер}}$  визначаємо за пусковою або гальмівною діаграмою і вносимо до таблиці для секцій, що задіяні на даній позиції. Час протікання струму через секцію визначаємо за пусковою або гальмівною діаграмою за формулою

$$\Delta t_i = \frac{\Delta V_i}{a_i \cdot 3,6}, \quad (12.2)$$

де  $\Delta V_i$  – приріст швидкості на ділянці  $i$ , км/г

$$\Delta V_i = V_n - V_{n-1}, \quad (12.3)$$

$a_i$  – прискорення на  $i$  ділянці, м/с<sup>2</sup>

$$a_i = \frac{F_i - \omega_{(v_{cep})} \cdot G_p}{102 \cdot (1 + \gamma) \cdot G_p}, \quad (12.4)$$

де  $F_i$  – сила тяги на  $i$  ділянці, яка визначається на підставі залежності  $F(I), H$ .

Дані розрахунку заносимо в таблицю.

Таблиця 12.1 – Дані для розрахунку ефективних струмів

Позиція	1	2	3	4	...
$\Delta V,$ <i>км/год</i>					
$a, м/с^2$					
$F, кН$					

Використовуючи дані табл. 11.1 визначаємо ефективні струми для секцій реостата.

Таблиця 12.2 – Визначення ефективних струмів для секцій реостата.

Секція	P1-P2	P2-P3	P3-P4	P4-P5	..
$I_{ef}, A$					

Таблиця 12.3 – Дані для теплового розрахунку

Режим	Позиція	$\Delta t, c$	Секція							
			P1-P2		P2-P3		P3-P4		...	
			$I_{cep}, A$	$I_{cep}^2 \cdot \Delta t$	$I_{cep}, A$	$I_{cep}^2 \cdot \Delta t$	$I_{cep}, A$	$I_{cep}^2 \cdot \Delta t$		
Пуск	1	$\Delta t_1$								
	2	$\Delta t_2$								
	3	$\Delta t_3$								
	...	...	$\sum(I_{cep}^2 \cdot \Delta t)_{II}$		$\sum(I_{cep}^2 \cdot \Delta t)_{II}$		$\sum(I_{cep}^2 \cdot \Delta t)_{II}$		$\sum(I_{cep}^2 \cdot \Delta t)_{II}$	
Гальмування	1	$\Delta t_1$								
	2	$\Delta t_2$								
	3	$\Delta t_3$								
	...	...	$\sum(I_{cep}^2 \cdot \Delta t)_{I}$		$\sum(I_{cep}^2 \cdot \Delta t)_{I}$		$\sum(I_{cep}^2 \cdot \Delta t)_{I}$		$\sum(I_{cep}^2 \cdot \Delta t)_{I}$	
$\sum I_{cep}^2 \cdot \Delta t$			$\sum(I_{cep}^2 \cdot \Delta t)_{II} + \sum(I_{cep}^2 \cdot \Delta t)_{I}$		$\sum(I_{cep}^2 \cdot \Delta t)_{II} + \sum(I_{cep}^2 \cdot \Delta t)_{I}$		$\sum(I_{cep}^2 \cdot \Delta t)_{II} + \sum(I_{cep}^2 \cdot \Delta t)_{I}$		$\sum(I_{cep}^2 \cdot \Delta t)_{II} + \sum(I_{cep}^2 \cdot \Delta t)_{I}$	

Знаючи значення ефективних струмів, виконуємо вибір елементів реостатів за умовою  $I_{ef} \leq I_{\infty}$ . Технічні характеристики резисторів наведені в Додатку 11.

Елементи повинні обиратися одного розміру кріплення. Крім того, треба щоб номенклатура елементів була мінімальна. При необхідності припускається застосування відпаювань від елементів, але їх кількість має бути мінімальна. У цьому випадку необхідно вказати на якому витку спіралі резистора робиться відпаювання.

Після визначення кількості елементів виконується компоновання ящиків опорів. При виборі варіанта компоновання пускових і гальмівних реостатів

віддається перевага варіанту з мінімальною вагою і розмірами. Найбільш навантажені секції необхідно влаштовувати в нижньому ряду.

Таблиця 12.4 – Вибір реостатів

Позначення елемента	Секції	Опір, Ом	Кількість витків	$I_{\infty}, A$

Керуючись величиною опорів резисторів, струмів  $I_{\infty}$  і  $I_{ef}$  викреслюємо ланцюг опорів:

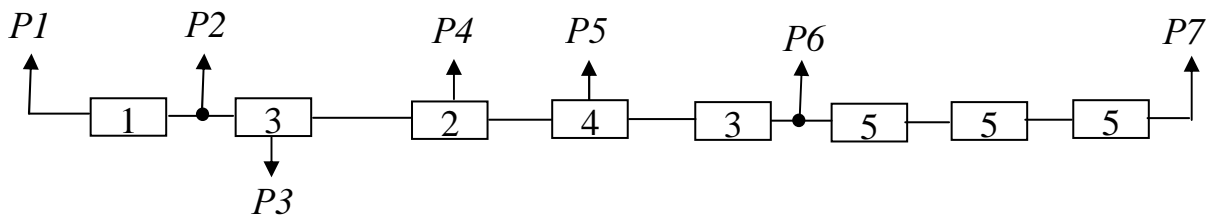


Рис.12.1 - Перший етап компоновання ящика опорів

Приймається дворядковий розподіл елементів. Елементи розташовують таким чином, щоб виводи від резисторів до клемної рейки мали мінімальну довжину. Забороняється прохід виводів через усю довжину ящика. Кінці з'єднань елементів повинні розташуватися на одній і тій же стороні.

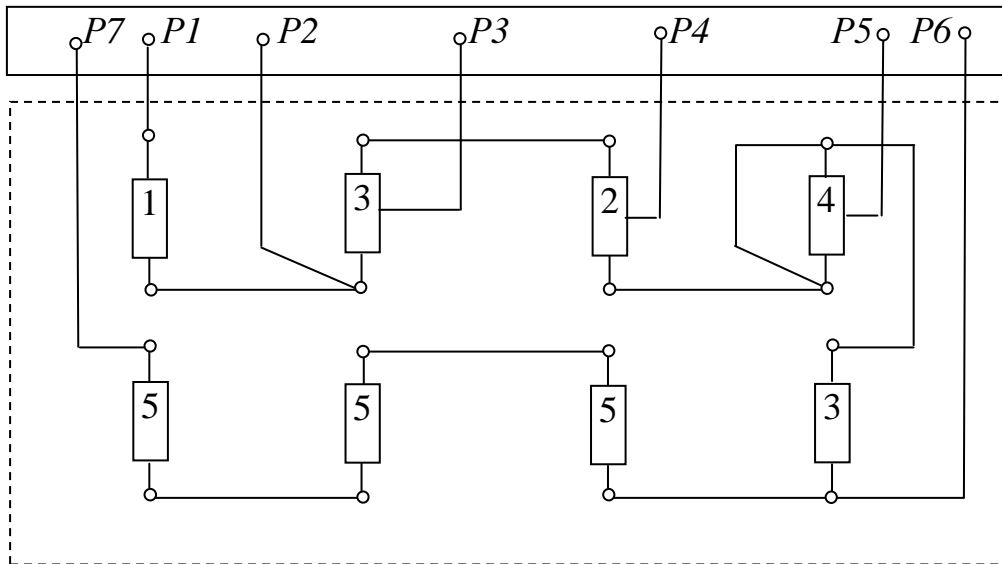


Рис.12.2 - Компонування резисторів у реостатному ящику

В одному ящику не повинно бути більше 16 резисторів, при більшій їх кількості проектують два ящика.

Вибрані резистори перевіряють на нагрів при маневровій роботі в депо після приходу рухомого складу з лінії. При цьому передбачається, що рух відбувається тільки на першій маневровій позиції із середньою швидкістю 5 км/год за час 5 хвилин.

Ефективний струм на першій маневровій позиції визначається як

$$I_{\text{еф.м}} = I_1 \sqrt{\frac{\varpi_0 \cdot G_T}{\Sigma F_1}}, \quad (12.5)$$

де  $I_1$  – струм на першій позиції при  $V_1=1,4$  м/с;

$\varpi_0$  – основний питомий опір руху при  $V_1=1,4$  м/с;

$\Sigma F_1$  – сила тяги при струмі  $I_1$ , Н;

$G_T$  – вага тари, кН.

Встановлений перегрів при маневровій роботі розраховуємо за формулою:

$$\tau_y = \frac{I_{ef.m}^2}{I_\infty^2} \cdot \tau_{max}, \quad (12.6)$$

де  $I_\infty$  – тривало-припустимий струм кожного елемента (див. Додаток 11),  $A$ ;

$\tau_{max}$  – припустимий перегрів, який відповідає тривалому струму  $\tau_{max}=350^\circ C$ .

Перегрів елементів при маневровій роботі розраховуємо за формулою

$$\tau_0 = \frac{I_{ef}^2}{I_\infty^2} \cdot \tau_{max}, \quad (12.7)$$

де  $I_{ef}$  – ефективний струм кожного елемента (обирається з табл. 12.3),  $A$

Перегрів елементів у кінці маневрової роботи розраховуємо за формулою

$$\tau_m = \tau_y \cdot \left(1 - e^{-\frac{tm}{T}}\right) + \tau_0 \cdot e^{-\frac{tm}{T}}, \quad (12.8)$$

де  $t_m=5$  хв – час маневрової роботи;

$T$  – постійна нагріву резисторів, для реостатів з природним охолодженням

$T=3...6$  хв.

Дані з перевірки резисторів зводимо в таблицю.

Таблиця 12.5 – Дані з перевірки резисторів

Секція	Позначення елемента	$I_\infty$ , $A$	$I_{ef}$ , $A$	$\tau_y$ , $^\circ C$	$\tau_0$ , $^\circ C$	$\tau_m$ , $^\circ C$

Якщо в результаті розрахунків встановлено що нагрів будь-якої секції  $\tau > 450^\circ C$ , то вибирають для неї резистори з більшим тривалим струмом, що визначаємо за формулою

$$I_{\infty} \geq \sqrt{\frac{350}{450} \cdot \left[ I_{ef.m}^2 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{tm}{T}} \right) + I_{ef.m}^2 \cdot e^{-\frac{tm}{T}} \right]} \quad (12.9)$$

При необхідності компоновання ящика змінюється.

### Вибір елементів ланцюга ослаблення поля

Вибір опорів ланцюгів ослаблення поля виконуємо, виходячи з тривалого струму під час руху на останній позиції, при швидкості  $V=60$  км/год. Далі визначаємо допустимий тривалий струм, за значенням якого встановлюють технічні характеристики резисторів, що складають ланцюг опорів ослаблення поля. Керуючись величиною опорів резисторів, струмів  $I_{\infty}$  і  $I_{ef}$  викреслюють ланцюг опорів, і виконують компоновання ящика опорів ослаблення поля.

### Вибір елементів гальмівного контура

Вибір елементів гальмівного контура виконуємо наступним чином: гальмівну характеристику  $V(I)$  розбиваємо в межах від 10 до 60 км/год на 10 рівних частин. Знаходимо  $V_{ср}$ ,  $\Delta V$ ,  $B_{ср}$ ,  $I_{ср}$ . Далі виконуємо розрахунок по формулами

$$W_{срi} = 0,9 \cdot (12 + 0,004 \cdot V_{срi}^2) + i_e; \quad (12.10)$$

$$b_i = \frac{B_{срi} + W_{срi} \cdot G_p}{102 \cdot (1 + \gamma) \cdot G_p}; \quad (12.11)$$

$$\Delta t_i = \frac{\Delta V_i}{b_i}. \quad (10.12)$$

Результати розрахунків заносимо в табл. 12.6



Таблиця 12.6 – Данні по нагріву секцій

$N_{\text{ділянки}}$	$\Delta t, \text{с}$	$I_{\text{сер}}, \text{А}$	$I_{\text{сер}}^2 \cdot \Delta t, \text{А}$	$B_{\text{сер}}, \text{Н}$	$V_{\text{сер}}, \text{км/год}$	$\Delta V, \text{м/с}$	$w_{\text{сер}}, \text{Н/кН}$	$v_i, \text{м/с}^2$

Ефективний струм ділянок визначаємо за формулою (12.1), а отриманні значення зводимо до табл.12.7.

Таблиця 12.7– Визначення ефективних струмів для секцій реостата

№ ділянки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{\text{эф}}, \text{А}$										

Знаючи значення ефективних струмів, виконуємо вибір елементів реостатів за умовою  $I_{\text{эф}} \leq I_{\infty}$ . Технічні характеристики резисторів наведені у Додатку 10. Враховуючи величини  $R_{\text{ст}}$  і  $R_2$ , складаємо ланцюг елементів, і виконуємо компонування ящика опорів.

### Вибір елементів шунтового реостата

Розрахункові опори шунтового реостата:  $R = 1500 \text{ Ом}; R_{pp} = 380 \text{ Ом}; R_{\partial 1} = 70 \text{ Ом}; R_{\partial 2} = 70 \text{ Ом}$ . Для набору опорів секцій вибирають елементи типу СР. Технічні дані елементів СР, які входять у ланцюг опорів, наведені в Додатку 10. Далі складають ланцюг елементів шунтового реостата і виконують компонування ящика резисторів.

## 12.2 Вибір елементів пуско-гальмівного реостата для двигунів послідовного збудження

Вибір елементів прискорювача виконуємо за умовою забезпечення перегріву найбільш навантажених елементів не вище 350 °С. Найбільш навантаженим елементом є елемент відповідний до закінчення реостатного пуску. Розрахунок виконуємо в наступній послідовності:

Знаходимо час навантаження елемента за формулою

$$t_{II} = \frac{V_{III}}{a \cdot 3,6} \quad (12.13)$$

де  $V_{III}$  – швидкість виходу на автоматичну характеристику повного поля, км/год;

$a$  – прискорення вагону, обирають за вихідними даними.

Кількість тепла, що виділяється за цей час, визначається як

$$A_2 = 4 \cdot I_c^2 \cdot r_0 \cdot t_{II}, \quad (12.14)$$

де  $r_0$  – опір елемента, Ом.

Опір елемента знаходять за формулою

$$r_0 = \frac{\rho_n \cdot l}{h \cdot \delta}, \quad (12.15)$$

де  $\rho_n$  – питомий опір,  $\rho_n = 1,1$  Ом·мм<sup>2</sup>/м;

$l$  – довжина смужки,  $l = 0,9$  м;

$h$  – ширина смужки,  $h = 0,054$  м;

$\delta$  – товщина смужки,  $\delta = 0,0015$  м.

Це тепло спрямоване на підвищення температури  $M$ -подібного елемента та на розсівання тепла.

Кількість виділеної енергії визначаємо за формулою, Дж;

$$A_1 = Q_0 + Q_n, \quad (12.16)$$

де  $Q_0$  – кількість енергії, що розсіюється елементом, Дж;

$Q_n$  – кількість поглинутої енергії, Дж.

Кількість енергії, що розсіюється елементом, знаходимо за формулою

$$Q_0 = k \cdot h \cdot l (\Delta\tau)^{1,235} \cdot t_{II}, \quad (12.17)$$

де  $k$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $k = 53 \frac{\text{Вт}}{\text{°C} \cdot \text{м}^2}$  ;

$\Delta\tau$  – припустима температура перегріву при тривалому режимі,  $\Delta\tau = 350^\circ\text{C}$ .

Кількість енергії, що поглинається елементом, знаходять за формулою

$$Q_n = G_e \cdot C \cdot \Delta\tau, \quad (12.18)$$

де  $G_e$  – вага елемента;

$C$  – коефіцієнт теплоємності,  $C = 3 \text{ Дж} \cdot \text{кг} / \text{град}$ .

Вагу елемента розраховують як

$$G_e = \rho_m \cdot l \cdot h \cdot \delta, \quad (12.19)$$

де  $\rho_m$  – щільність речовини  $M$ -подібного елемента,  $\rho_m = 7200 \text{ кг} \cdot \text{м}^3$

Геометричні розміри елемента прискорювача вибирають таким чином, щоб виконувалась умова  $A1 \approx A2$ , тобто:

$$4 \cdot I_e^2 \cdot \frac{\rho_n \cdot l}{h \cdot \delta} t_{II} \approx k \cdot h \cdot l (\Delta\tau)^{1,235} \cdot t_{II} + \rho_m \cdot l \cdot h \cdot \delta \cdot C \cdot \Delta\tau.$$

## Перевірка елементів прискорювача за критерієм пожежної безпеки

Розрахунковим режимом вважаємо гальмовий. За даними гальмівної діаграми визначаємо прирощення швидкостей  $\Delta v_i$  м/с, та для кожного прирощення знаходиться середню швидкість  $v_{сер}$  км/год за формулами

$$\Delta v_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{3,6}, \quad (12.20)$$

$$v_{сер} = \frac{v_i + v_{i-1}}{2}, \quad (12.21)$$

де  $v_i, v_{i-1}$  –  $i$ -а та попередня швидкості, км/год.

Знаходимо за значенням  $v_{сер}$  питомий опір для кожної величини середньої швидкості за формулою

$$\omega_i = 0,9(5 + 0,0031 \cdot v_{сер}^2) + i_e. \quad (12.22)$$

Далі за розрахунковими характеристиками визначаємо величину гальмівної сили  $B_i$  для струму  $I_{сер}$ .

Знаходимо гальмове уповільнення за формулою

$$b_i = \frac{4 \cdot B_i + G_p \cdot \omega_i}{102 \cdot (1 + \gamma) \cdot G_p}. \quad (12.23)$$

Знаходимо час навантаження елементів. Спочатку встановлюємо прирощення часу за формулою

$$\Delta t_i = \frac{\Delta v_i}{b_i}. \quad (12.24)$$

Розрахунки доцільно звести до таблиці.

Таблиця 12.8 – Дані з нагріву елементів

$N_{ел.}$	$\Delta V_{i, м/с}$	$V_{сер, км/год}$	$\omega_{i, Н/кН}$	$B_{i, Н}$	$\nu_{i, м/с^2}$	$\Delta t_{i, с}$

Загальний час гальмування знаходимо за формулою

$$t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \dots \quad (12.25)$$

Далі в рівнянні теплового балансу замість  $t_{II}$  підставляємо  $t$  за умовою, що  $\Delta \tau = 350^\circ C$ , і перевіряємо перегрів прискорювача.

### Вибір елементів маневрових ступенів

Для вибору елементів визначаємо ефективний струм за формулою

$$I_{эф} = \sqrt{\frac{I' \cdot \Delta t \cdot N_{ц}}{3600}} \leq I_{сер}, \quad (12.26)$$

де  $I'$  – струм, що знаходиться за перетином швидкісних характеристик з віссю струмів, А;

$\Delta t$  – час перетинання струму через секцію, с;

$N_{ц}$  – кількість циклів пуску і гальмувань в годину (приймається 100...120).

При виборі резисторів враховуємо, що  $I_{эф} \leq I_{сер}$ .

Таблиця 12.9 – Визначення ефективних струмів для елементів прискорювача

№ елемента										
$I_{эф, А}$										

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Електричне обладнання рухомого складу міського електричного транспорту”. (Регулювання тягових електричних двигунів рухомого складу в режимі тяги): Конспект лекцій для студентів спеціальності 7.092202 - Електричний транспорт – Укл. В.П. Андрійченко, С.О. Закурдай. – Харків: ХНАМГ, 2006. - 81 с.
2. Ефремов И.С., Косарев В.Г. Теория и расчет троллейбусов (электрическое оборудование). Ч. 1, 2. - М.: Высш. шк., 1981. - 294 с. и 248 с.

Завдання на курсовий проект і контрольні роботи  
з дисципліни „Електричне обладнання рухомого складу МЕТ”

ГРУПА №1							
№ п/п	П.І.Б.	Тип рухомого складу	Тип електродвигунів	G <sub>T</sub> , кН	a, м/с <sup>2</sup>	b, м/с <sup>2</sup>	M, люд.
1		трамвай Т-3	ТЕ-022	160	1,81	1,79	185
2		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	110	1,3	1,2	95
3		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	100	1,4	1,2	80
4		трамвай Т-3	ТЕ-022	165	1,75	1,76	160
5		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	95	1,31	1,32	105
6		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	105	1,45	1,25	85
7		трамвай Т-3	ТЕ-022	170	1,69	1,7	165
8		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	120	1,25	1,26	90
9		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	110	1,5	1,3	90
10		трамвай Т-3	ТЕ-022	175	1,81	1,82	160
11		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	125	1,24	1,25	85
12		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	115	1,6	1,35	95
13		трамвай Т-3	ТЕ-022	195	1,55	1,56	190
14		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	108	1,23	1,24	105
15		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	120	1,8	1,4	100
16		трамвай Т-3	ТЕ-022	185	1,75	1,76	180
17		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	115	1,35	1,36	109
18		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	100	1,5	1,3	90
19		трамвай Т-3	ТЕ-022	180	1,61	1,62	180
20		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	105	1,32	1,33	110
21		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	112	1,37	1,37	98
22		трамвай Т-3	ТЕ-022	180	1,8	1,81	175
23		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	125	1,28	1,29	90
24		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	100	1,5	1,2	85

ГРУПА №2							
№ п/п	П.І.Б.	Тип рухомого складу	Тип електродвигунів	G <sub>T</sub> , кН	a, м/с <sup>2</sup>	b, м/с <sup>2</sup>	M, люд.
1		трамвай Т-3	ТЕ-022	170	1,76	1,77	180
2		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	95	1,25	1,26	105
3		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	100	1,65	1,35	98
4		трамвай Т-3	ТЕ-022	175	1,68	1,71	170
5		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	110	1,23	1,24	100
6		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	120	1,6	1,6	100
7		трамвай Т-3	ТЕ-022	180	1,71	1,72	170
8		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	100	1,29	1,31	105
9		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	112	1,42	1,28	97
10		трамвай Т-3	ТЕ-022	180	1,8	1,81	175
11		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	115	1,32	1,32	100
12		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	112	1,53	1,52	88
13		трамвай Т-3	ТЕ-022	175	1,68	1,72	170
14		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	118	1,4	1,41	110
15		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	109	1,41	1,22	93
16		трамвай Т-3	ТЕ-022	180	1,76	1,8	170
17		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	120	1,3	1,29	105
18		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	118	1,7	1,27	91
19		трамвай Т-3	ТЕ-022	185	1,78	1,79	170
20		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	125	1,28	1,25	110
21		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	106	1,42	1,35	85
22		трамвай Т-3	ТЕ-022	190	1,63	1,69	180
23		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	105	1,32	1,3	115
24		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	117	1,6	1,36	90



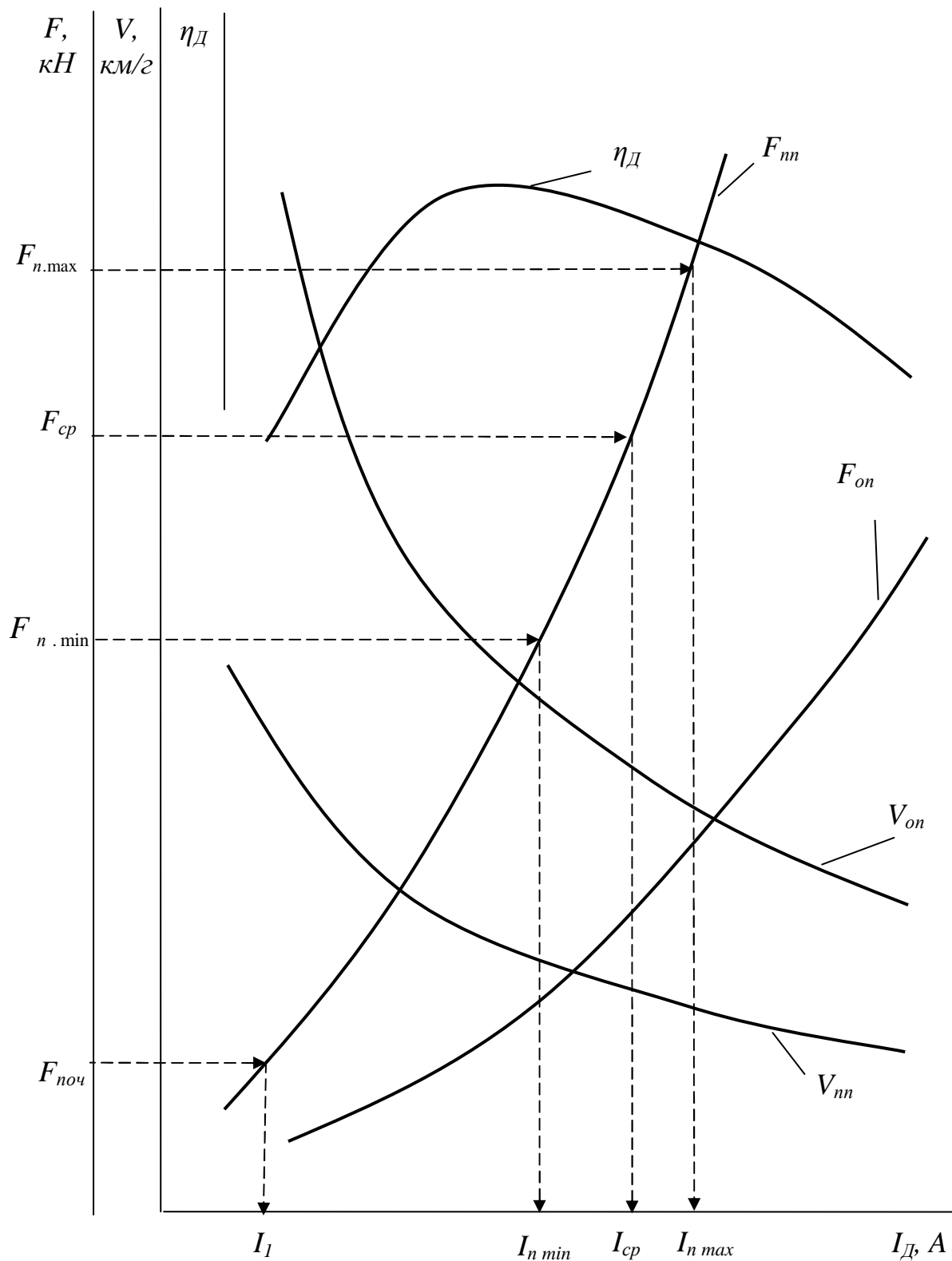
ГРУПА №3							
№ п/п	П.І.Б.	Тип рухомого складу	Тип електродвигунів	G <sub>T</sub> , кН	a, м/с <sup>2</sup>	b, м/с <sup>2</sup>	M, люд.
1		трамвай Т-3	ТЕ-022	165	1,75	1,76	160
2		тролейбус ЗіУ-9	ДК-210	100	1,28	1,27	100
3		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	105	1,4	1,25	86
4		трамвай Т-3	ТЕ-022	170	1,8	1,7	160
5		тролейбус ЗіУ-9	ДК-210	108	1,24	1,23	95
6		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	110	1,36	1,4	90
7		трамвай Т-3	ТЕ-022	160	1,85	1,85	155
8		тролейбус ЗіУ-9	ДК-210	120	1,27	1,26	90
9		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	115	1,7	1,35	80
10		трамвай Т-3	ТЕ-022	170	1,75	1,76	160
11		тролейбус ЗіУ-9	ДК-210	125	1,3	1,32	100
12		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	120	1,76	1,38	104
13		трамвай Т-3	ТЕ-022	170	1,65	1,63	165
14		тролейбус ЗіУ-9	ДК-210	115	1,31	1,29	105
15		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	98	1,42	1,29	98
16		трамвай Т-3	ТЕ-022	170	1,65	1,71	165
17		тролейбус ЗіУ-9	ДК-210	108	1,33	1,34	110
18		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	112	1,42	1,32	86
19		трамвай Т-3	ТЕ-022	180	1,73	1,75	170
20		тролейбус ЗіУ-9	ДК-210	121	1,28	1,31	105
21		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	117	1,5	1,2	80
22		трамвай Т-3	ТЕ-022	175	1,85	1,84	170
23		тролейбус ЗіУ-9	ДК-210	109	1,3	1,3	105
24		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	117	1,65	1,33	94

ГРУПА №4							
№ п/п	П.І.Б.	Тип рухомого складу	Тип електродвигунів	G <sub>T</sub> , кН	a, м/с <sup>2</sup>	b, м/с <sup>2</sup>	M, люд.
1		трамвай Т-3	ТЕ-022	175	1,81	1,82	190
2		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	120	1,26	1,27	80
3		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	120	1,78	1,38	90
4		трамвай Т-3	ТЕ-022	180	1,71	1,72	180
5		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	119	1,28	1,29	124
6		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	118	1,5	1,3	100
7		трамвай Т-3	ТЕ-022	190	1,81	1,82	190
8		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	118	1,31	1,31	115
9		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	110	1,4	1,4	95
10		трамвай Т-3	ТЕ-022	190	1,79	1,8	180
11		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	115	1,33	1,39	115
12		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	106	1,44	1,24	85
13		трамвай Т-3	ТЕ-022	185	1,71	1,75	180
14		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	116	1,29	1,32	115
15		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	119	1,68	1,36	95
16		трамвай Т-3	ТЕ-022	185	1,82	1,83	170
17		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	117	1,38	1,4	110
18		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	100	1,8	1,3	100
19		трамвай Т-3	ТЕ-022	190	1,7	1,6	180
20		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	113	1,37	1,36	115
21		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	110	1,33	1,33	92
22		трамвай Т-3	ТЕ-022	178	1,83	1,84	150
23		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	105	1,31	1,32	120
24		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	109	1,42	1,22	86

ГРУПА №5							
№ п/п	П.І.Б.	Тип рухомого складу	Тип електродвигунів	G <sub>T</sub> , кН	a, м/с <sup>2</sup>	b, м/с <sup>2</sup>	M, люд.
1		трамвай Т-3	ТЕ-022	180	1,6	1,65	200
2		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	115	1,31	1,32	100
3		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	118	1,73	1,32	96
4		трамвай Т-3	ТЕ-022	185	1,7	1,71	180
5		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	110	1,35	1,36	105
6		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	116	1,56	1,34	97
7		трамвай Т-3	ТЕ-022	185	1,75	1,76	182
8		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	95	1,36	1,37	95
9		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	109	1,68	1,35	86
10		трамвай Т-3	ТЕ-022	178	1,73	1,75	170
11		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	106	1,38	1,38	90
12		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	112	1,59	1,26	96
13		трамвай Т-3	ТЕ-022	175	1,85	1,86	150
14		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	108	1,39	1,4	100
15		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	101	1,65	1,3	85
16		трамвай Т-3	ТЕ-022	160	1,75	1,78	150
17		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	96	1,51	1,52	100
18		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	107	1,7	1,4	97
19		трамвай Т-3	ТЕ-022	175	1,82	1,81	170
20		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	116	1,54	1,5	105
21		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	111	1,5	1,38	96
22		трамвай Т-3	ТЕ-022	167	1,9	1,92	140
23		тролейбус ЗиУ-9	ДК-210	113	1,46	1,46	110
24		тролейбус ПМЗ-Т2	ДК-138А	115	1,45	1,35	100

Технічні дані тягових електричних двигунів рухомого складу міського електротранспорту

Технічні параметри ТЕД	Тип тягового електродвигуна		
	ДК-210А-3 (тролейбус ЗіУ-9)	ДК-138А (тролейбус ЮМЗ-Т2)	ТЕ-022Е (Трамвайний вагон Т-3)
Напруга на колекторі двигуна, $U_{\text{дв}}, B$	550	550	275
Часова потужність $P, кВт$	110	132	45
Часовий струм $I_2, A$	220	260	160
Опір обмотки якоря $R_a, Ом$	0,0816	0,0734	0,0745
Опір головних полюсів $R_{гп}, Ом$	0,063	0,057	0,0335
Опір додаткових полюсів $R_{дп}, Ом$	0,0465	0,0419	0,0335
Опір серієсної обмотки $R_c, Ом$	0,063	0,057	0,0335
Опір шунтової обмотки $R_{ш}, Ом$	95	95	-
Кількість витків обмотки послідовного збудження, $W_C$	24	24	20
Кількість витків обмотки паралельного збудження, $W_{III}$	930	930	-
Кількість колекторних пластин, $K$	175	175	145
Кількість провідників якірної обмотки, $N_a$	350	350	290
Кількість пар полюсів, $p$	2	2	2
Кількість пар паралельних гілок обмотки якоря, $m$	1	1	1



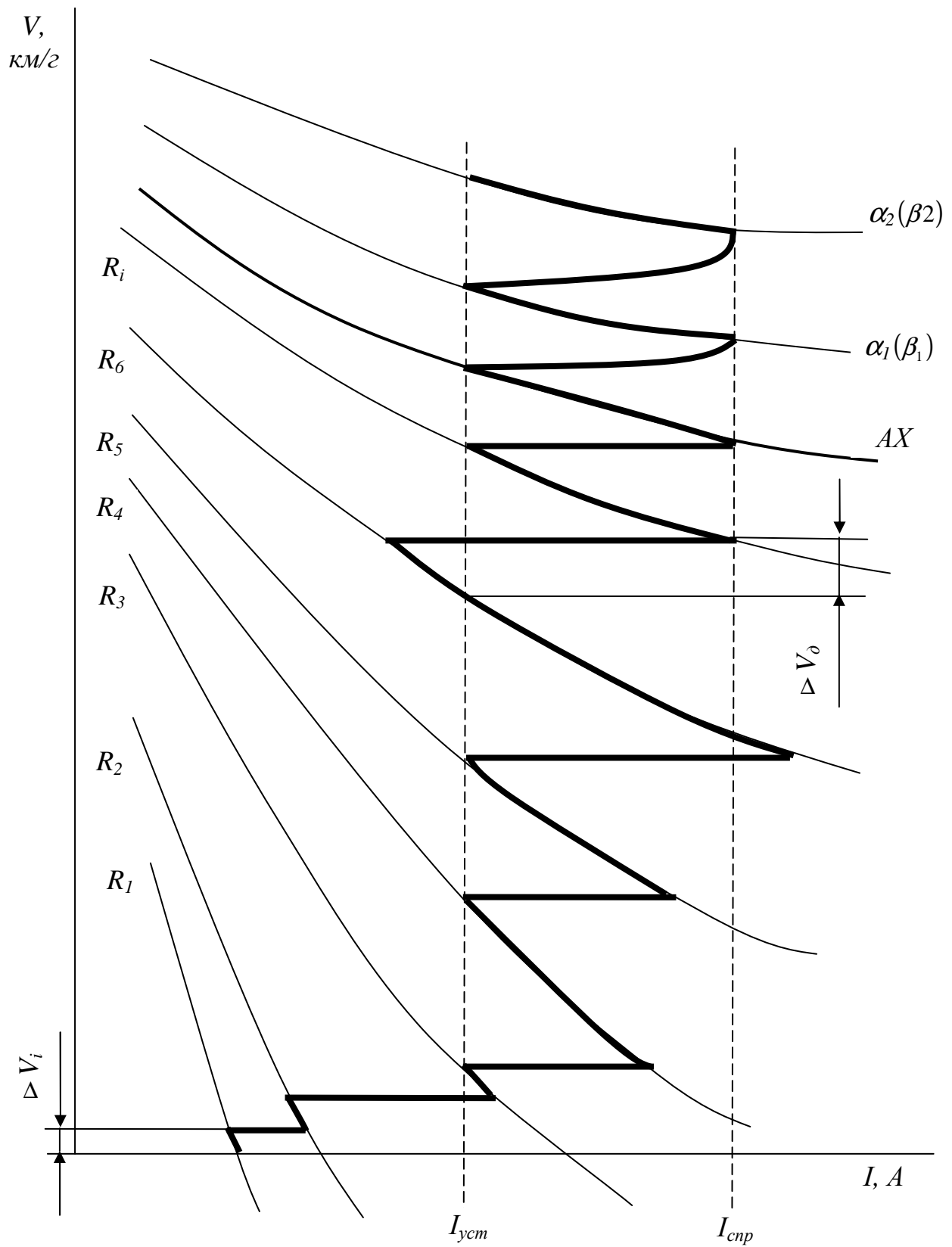
Знаходження пускових струмів за електромеханічними характеристиками тягового електродвигуна

Відношення опорів секцій до повного опору пускового реостата  
за верн'єрною схемою

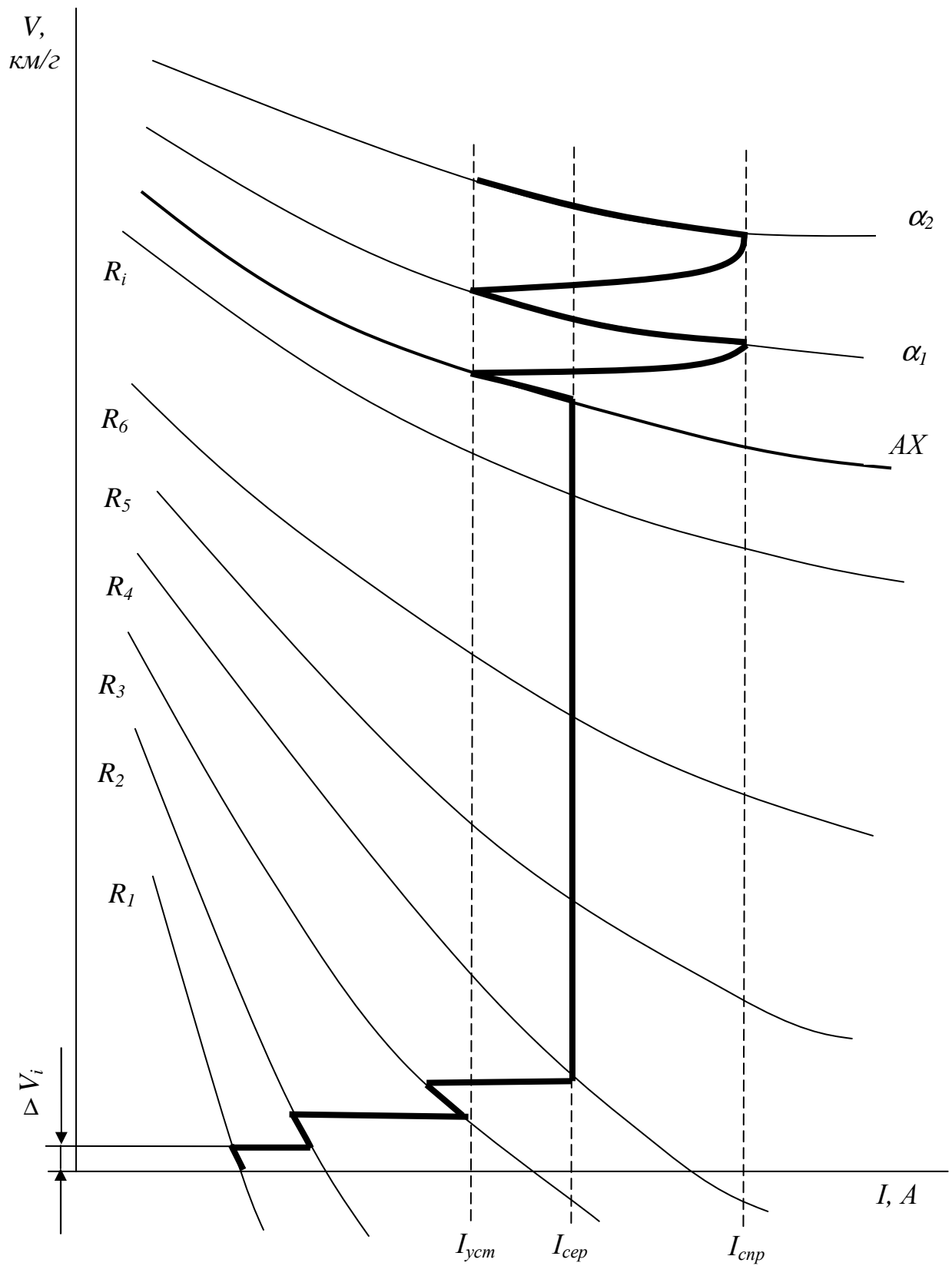
Секції реостату	Розрахункова кількість позицій								
	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<i>X1</i>	0,448	0,490	0,311	0,490	0,462	0,457	0,430	0,348	0,485
<i>X2</i>	0,146	0,157	0,103	0,173	0,150	0,158	0,177	0,163	0,153
<i>X3</i>	0,113	0,079	0,046	0,088	0,075	0,077	0,096	0,094	0,078
<i>X4</i>	-	0,047	0,045	0,054	0,044	0,046	0,060	0,061	0,044
<i>X5</i>	-	-	-	0,046	0,050	0,030	0,040	0,042	0,030
<i>X6</i>	-	-	-	-	-	0,021	0,030	0,035	0,021
<i>X7</i>	-	-	-	-	-	-	-	0,019	0,027
<i>X8</i>	0,240	-	0,025	-	0,190	-	0,033	-	0,146
<i>X9</i>	0,054	0,30	0,166	0,148	0,030	0,211	0,130	0,236	0,016

Резистори *X8* и *X9* включено тільки в нижню вітку верн'єрної схеми. Секції опорів, проти номерів яких в таблиці проставлені прочерки, у верн'єрної схемі відсутні.

Розрахунок виконується у вигляді таблиці опорів секцій. Після визначення опорів секцій розраховують фактичні значення опорів за позиціями реостатного контролера і порівнюють з розрахунковими.

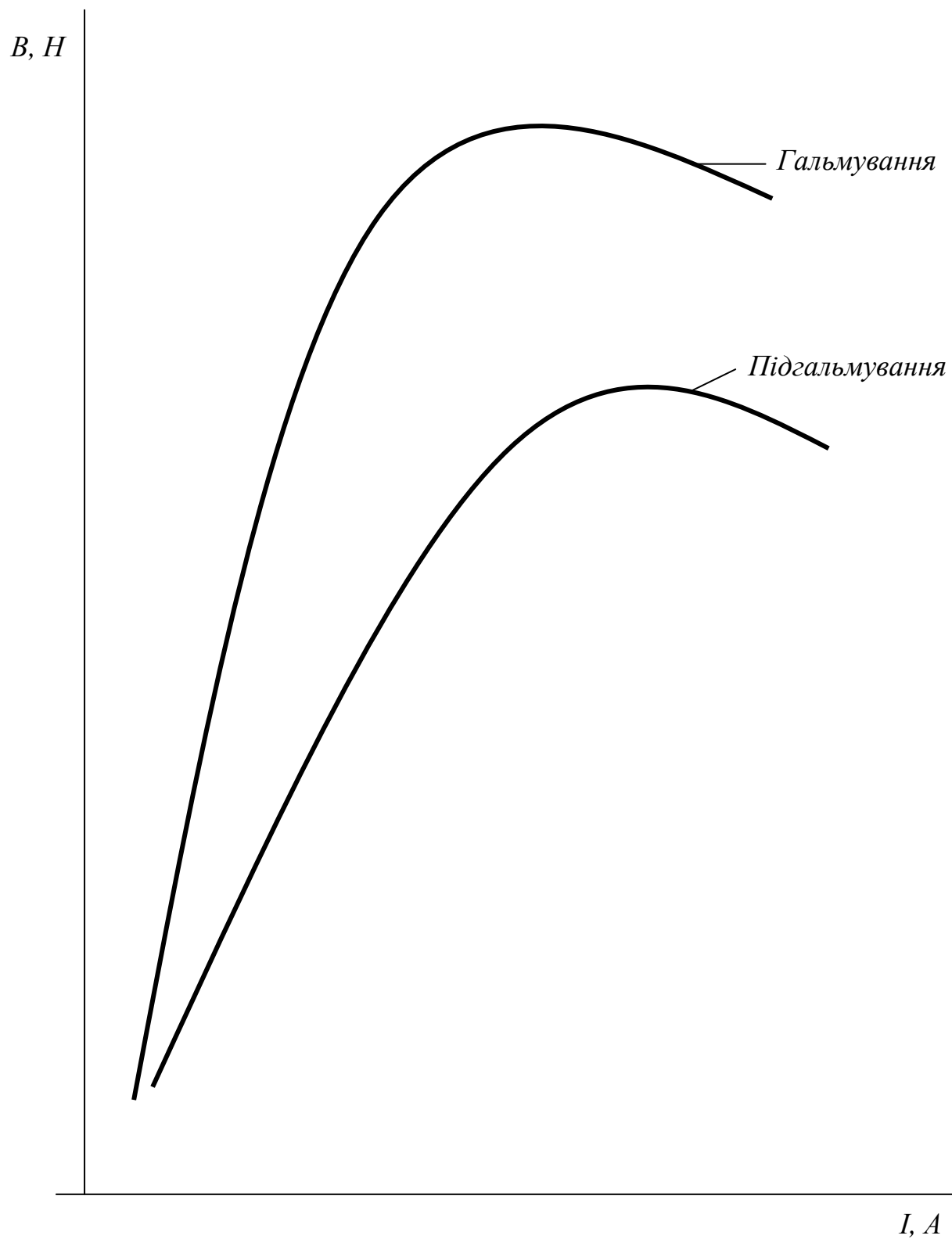


Побудова пускової діаграми (для ТЕД з ступінчастим реостатним пуском)

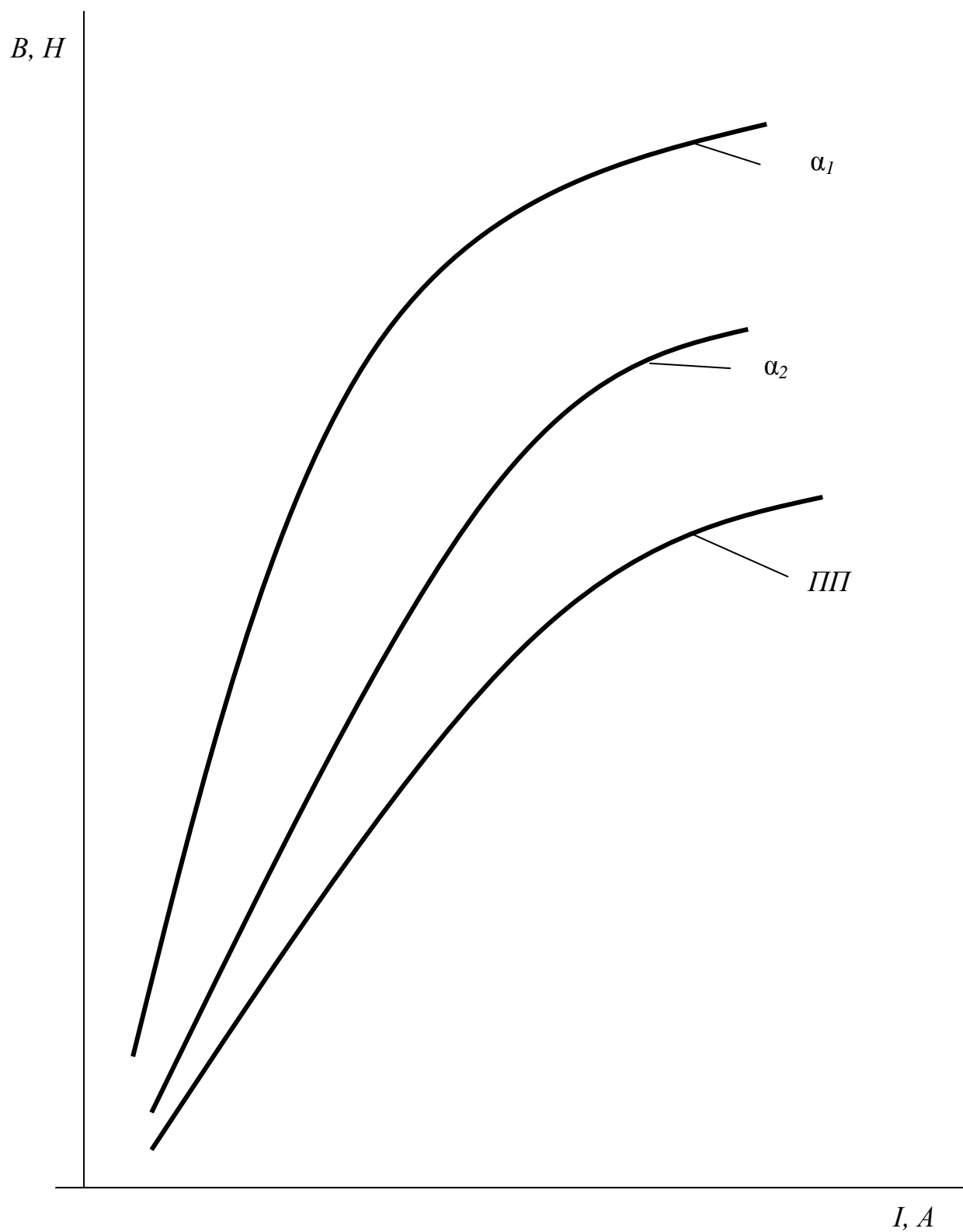


Побудова пускової діаграми (для ТЕД з плавним реостатним пуском)

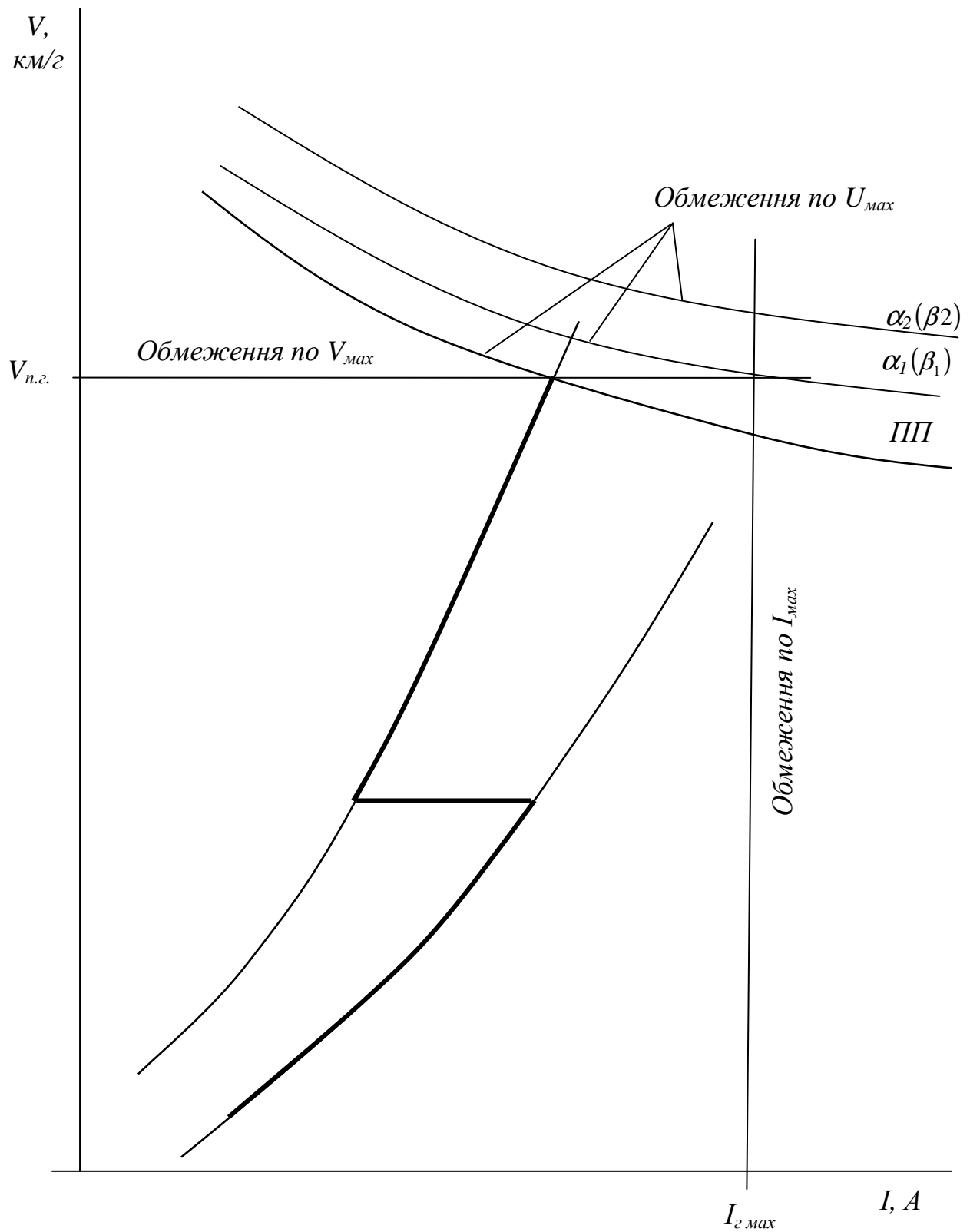




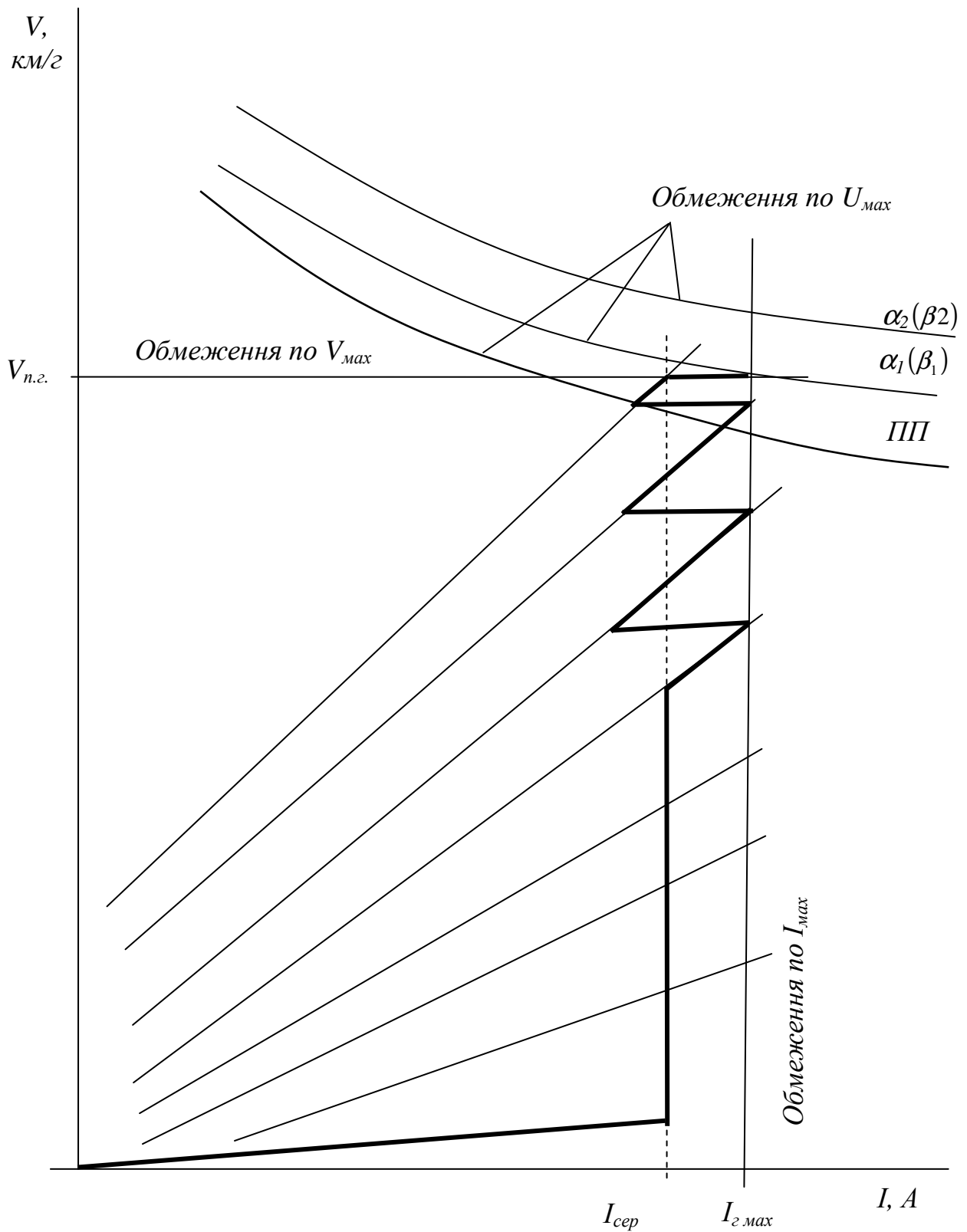
Гальмівні характеристики (для ТЕД змішаного збудження)



Гальмівні характеристики (для ТЕД послідовного збудження)



Побудова гальмівної діаграми (для ТЕД змішаного збудження)



Побудова гальмівної діаграми (для ТЕД послідовного збудження)

Технічні характеристики резисторів  $K\Phi$ 

Позначення елемента	Опір, $\Omega$	Кількість витків	Тривалий струм, $A$	Вага елемента, $kg$	Вага фехралю, $kg$
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Розмір кріплення 600 мм, потужність 2150 Вт</i>					
6ТД. 662.005.1	0,2	27	103	4,64	3,1
6ТД. 662.005.2	0,24	34	95	5,25	3,8
6ТД. 662.005.3	0,368	34	77	4,05	2,2
6ТД. 662.005.4	0,57	54	62	4,99	3,5
6ТД. 662.005.5	0,79	54	52	4,61	3,1
6ТД. 662.005.6	1,0	68	47	4,79	3,3
6ТД. 662.005.7	1,45	68	39	3,96	2,2
6ТД. 662.005.8	2,0	68	33	3,49	1,7
<i>Розмір кріплення 520 мм, потужність 1820 Вт</i>					
6ТД. 662.004.11	0,165	23	103	3,98	2,6
6ТД. 662.004.12	0,205	29	95	4,52	3,2
6ТД. 662.004.13	0,308	29	77	3,45	1,8
6ТД. 662.004.14	0,49	46	62	4,29	3,0
6ТД. 662.004.15	0,67	46	52	3,93	2,7
6ТД. 662.004.16	0,85	58	47	4,12	2,9
6ТД. 662.004.17	1,23	58	39	3,42	1,8
6ТД. 662.004.18	1,7	58	33	3,02	1,5
6ТД. 662.004.19	2,28	46	29,5	2,42	-
6ТД. 662.004.20	3,0	58	24,5	2,57	-

### Технічні характеристики резисторів *CP*

Позначення елемента	Опір, <i>Ом</i>	Кількість витків	Тривалий струм, <i>А</i>	Вага елемента, <i>кг</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Розмір кріплення 600 мм, потужність 2150 Вт</i>				
6ТД. 662.000.1	520	198	0,64	0,97
6ТД. 662.000.2	310	178	0,8	0,99
6ТД. 662.000.3	200	180	1,0	1,04
6ТД. 662.000.4	120	109	1,3	1,02
6ТД. 662.000.5	85	99	1,54	1,03
6ТД. 662.000.6	48	113	2,05	1,07
6ТД. 662.000.7	31	115	2,56	1,02
6ТД. 662.000.8	21	111	3,1	1,18
6ТД. 662.000.9	15	56	2,65	1,07
6ТД. 662.000.10	11	59	4,3	1,1
6ТД. 662.000.11	7,5	55	5,2	1,14
6ТД. 662.000.12	6,0	57	5,8	1,18
6ТД. 662.000.13	4,8	58	6,5	1,23
6ТД. 662.000.14	3,8	56	7,3	1,28
6ТД. 662.000.15	1,8	27	10,5	1,2
6ТД. 662.000.16	1,1	26	13,5	1,27
6ТД. 662.000.17	0,8	23	16,0	1,35

Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Електричне обладнання рухомого складу» (для студентів спеціальності 7.092202 – „Електричний транспорт”)

Укладачі: Карпушин Едуард Іванович,

Далека Василь Фомич,

Андрійченко Володимир Павлович,

Закурдай Світлана Олександрівна

Редактор: М.З. Аляб'єв

План 2007, поз.

---

Підп. до друку 10.10.2007 р.    Формат 60x84 1/16.    Умовн. – друк.арк. 3,0

Друк на ризографі.                      Папір офісний                      Обл.. – вид.арк. 3,5.

Тираж 300 прим.                      Зам. №

---

61002, Харків, ХНАМГ, вул. Революції, 12  
Сектор оперативної поліграфії ІОЦ ХНАМГ

---

61002, Харків, вул. Революції, 12